

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



SIKI GEÇME GÖBEK-MİL BAĞLANTILARINDA ISITMA
YÖNTEMLERİNİN SÖKME KUVVETİNE ETKİSİNİN ANALİTİK,
SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

BİTİRME TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cem S. ÇETİNARSLAN

Haziran 2026

EDİRNE

ÖZET

Bu çalışma, sıkı geçme yöntemiyle birleştirilen SAE 4140 ıslah çeliği mil ve SAE 8620 sementasyon çeliği göbek/dişli bağlantılarında, ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisini analitik hesaplar, sayısal modelleme yaklaşımı ve deneysel gözlemler çerçevesinde incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada ele alınan bağlantı, aktarma organları imalatında karşılaşılan sıkı geçme bağlantılarına benzer geometri ve malzeme özelliklerine sahip numuneler üzerinden değerlendirilmiştir.

Analitik yöntemde, sıkı geçme bağlantısında oluşan temas basıncı ve gerilme dağılımı Lamé denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda girişim miktarı, elastisite modülü, Poisson oranı ve geometrik boyutlar dikkate alınmış; temas yüzeyindeki basınç ile radyal ve teğetsel gerilmeler değerlendirilmiştir. Ayrıca deneysel sökme kuvvetlerinden yararlanılarak numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri ters hesaplama yöntemiyle yaklaşık olarak belirlenmiştir.

Sayısal çalışma kapsamında ANSYS Workbench ortamında sıkı geçme bağlantısına ait üç boyutlu modelleme, ağ yapısı, sınır şartları ve temas tanımları oluşturulmuştur. Sayısal çalışma, sıkı geçme bağlantısının davranışını görselleştiren ve modelleme yaklaşımını destekleyen bir çalışma olarak değerlendirilmiştir.

Deneysel aşamada, elektrikli fırında ısıtılan numuneler ve indüksiyonla ısıtılan numune üzerinde hidrolik pres yardımıyla sökme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde pres göstergesi üzerinden maksimum sökme yükleri okunmuş ve elde edilen sonuçlar analitik hesaplarla birlikte yorumlanmıştır. Fırında ısıtılan numunelerde, indüksiyonla ısıtılan numuneye göre daha yüksek sökme kuvvetleri elde edilmiştir. Bu farkın; ısıtma süresi, yüzeyde gözlenen oksitlenme belirtileri ve temas yüzeyindeki sürtünme davranışı ile ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, sıkı geçme bağlantılarında yalnızca girişim miktarının değil, uygulanan ısıtma yönteminin de sökme kuvveti ve bağlantının sökülebilirliği üzerinde etkili bir parametre olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıkı geçme, sökme kuvveti, ısıtma yöntemi, indüksiyonla ısıtma, Lamé denklemleri, SAE 4140, SAE 8620

ABSTRACT

This study aims to investigate the effect of the heating method on the disassembly force of shrink-fitted SAE 4140 quenched and tempered steel shaft and SAE 8620 carburizing steel hub/gear connections through analytical calculations, numerical modeling, and experimental observations. The connection examined in this study was evaluated using specimens with geometry and material properties similar to shrink-fitted connections used in power transmission component manufacturing.

In the analytical method, the contact pressure and stress distribution in the shrink-fitted connection were calculated using Lamé equations. In this context, the interference amount, modulus of elasticity, Poisson's ratio, and geometric dimensions were considered; contact pressure and radial and tangential stresses were evaluated. In addition, the friction coefficient values of the specimens were approximately determined by reverse calculation using the experimental disassembly forces.

Within the numerical study, three-dimensional modeling, mesh structure, boundary conditions, and contact definitions of the shrink-fitted connection were created in ANSYS Workbench. The numerical study was evaluated as a supporting study that visualizes the behavior of the shrink-fitted connection and demonstrates the modeling approach.

In the experimental stage, disassembly tests were carried out using a hydraulic press on specimens heated in an electric furnace and a specimen heated by induction. During the tests, the maximum disassembly loads were read from the press gauge, and the results were interpreted together with the analytical calculations. Higher disassembly forces were obtained in the furnace-heated specimens than in the induction-heated specimen. This difference was considered to be related to heating duration, observed oxidation indications on the surface, and friction behavior at the contact surface.

As a result, this study shows that not only the interference amount but also the applied heating method is an effective parameter on the disassembly force and removability of shrink-fitted connections.

Keywords: Shrink fit, disassembly force, heating method, induction heating, Lamé equations, SAE 4140, SAE 8620

ÖNSÖZ

Bu çalışma, sıkı geçme yöntemiyle birleştirilen mil ve göbek/dişli bağlantılarında ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisinin analitik hesaplar, sayısal modelleme yaklaşımı ve deneysel gözlemler çerçevesinde incelenmesi amacıyla hazırlanmıştır. Çalışmada, endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan sıkı geçme bağlantılarında ısıtma yönteminin temas davranışı ve sökülebilirlik üzerindeki etkileri mühendislik açısından değerlendirilmiştir.

HEMA Endüstri A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında, elektrikli fırında ve indüksiyonla ısıtılan numuneler üzerinde hidrolik pres yardımıyla sökme deneyleri yapılmıştır. SAE 4140 ıslah çeliği mil ve SAE 8620 sementasyon çeliği göbek/dişli bağlantısından oluşan numunelerde elde edilen sökme kuvvetleri, Lamé denklemlerine dayalı analitik hesaplarla birlikte yorumlanmıştır. Ayrıca ANSYS Workbench ortamında oluşturulan sayısal modelleme çalışması, bağlantının davranışını görselleştirmeye ve modelleme yaklaşımını desteklemeye yönelik olarak ele alınmıştır.

Bu çalışmanın, sıkı geçme bağlantılarında ısıtma yöntemi seçiminin önemini ortaya koyması ve benzer montaj problemlerinin değerlendirilmesine katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Bu süreçte bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak çalışmamın her aşamasında yol gösteren, değerli katkılarıyla projemin gelişimine yön veren danışman hocam Prof. Dr. Cem S. ÇETİNARSLAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2026

Barış KIRLI

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 SIKI GEÇME BAĞLANTILARININ TANIMI, TÜRLERİ VE MEKANİK TEMELLERİ	1
1.2 LAMÉ KALIN CİDARLI SİLİNDİR TEORİSİ VE GERİLME ANALİZİ	4
1.2.1 Temas Basıncı ve Sertlik Faktörleri.....	5
1.2.2 Kesit Boyunca Gerilme Dağılımı	6
1.2.3 Von Mises Akma Kriteri ve Emniyet Değerlendirmesi	6
1.3 ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR VE KULLANIM ALANLARI.....	8
1.4 SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA SÖKÜM YÖNTEMLERİ	10
1.4.1 Mekanik Söküm Yöntemi	10
1.4.2 Fırın Isıtma ile Söküm	10
1.4.3 İndüksiyon Isıtma ile Söküm	10
1.5 ARA YÜZEY TRİBOLOJİSİ, FRETİNG HASARI VE ISITMA ETKİSİ..	13
1.5.1 Fretting Aşınması ve Yorulma	13
1.5.2 Isıtma Yönteminin Tribolojik Sonuçları	14
1.6 ANALİTİK, SAYISAL VE DENEYSEL DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMLARI	15
1.7 ÇALIŞMANIN AMACI, KAPSAMI VE TEZ ORGANİZASYONU	17
2 LİTERATÜR TARAMASI	20

2.1	ANALİTİK YÖNTEMLER VE KALIN CİDARLI SİLİNDİR TEORİSİ	20
2.1.1	Çok Katmanlı Kalın Cidarlı Silindirlerde Analitik Çözüm — Qiu ve Zhou	20
2.1.2	Çakma Eğrisinin Yeni Analitik Modelle Tahmini — Wang ve diğerleri	21
2.2	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN TEMAS MEKANİĞİNE VE SÜRTÜNME KATSAYISINA ETKİSİ	22
2.2.1	İki Kaba Yüzey Arasında Temas Basıncı — Yang ve diğerleri	22
2.2.2	Homojenleştirme Tekniği ile FEM Modellemesi — Boutoutaou ve diğerleri	23
2.2.3	Elastik-Plastik Pürüzlülük Modeli — Buczkowski ve Kleiber	24
2.2.4	Geometrik Hataların Kombine Etkisi — Raj ve diğerleri	24
2.3	SÜRTÜNME KATSAYISININ GERİLME DAĞILIMINA ETKİSİ VE FEM ANALİZLERİ.....	25
2.3.1	Sürtünme Katsayısının Deneysel Belirlenmesi — Booker ve Truman...	26
2.3.2	μ 'nin Gerilme Dağılımına FEM ile İncelenmesi — González-Gutiérrez ve diğerleri	27
2.3.3	ANSYS ile FEM Doğrulaması — Madej ve Śliwka	27
2.4	DİŞLİ GÖBEĞİ VE MİL BAĞLANTILARINDA BAŞARISIZLIK ANALİZLERİ.....	28
2.4.1	Dişli Göbeği-Mil Arıza Kök Neden Analizi — Truman ve Booker	28
2.4.2	İçi Boş Mil-Göbek Fretting Analizi — Han ve diğerleri	29
2.5	ISIL YÖNTEMLERLE SÖKÜM VE SÖKME KUVVETİNE TERMAL ETKİLER.....	29
2.5.1	Hasarlı Bağlantıların Hasarsız Isıl Söküm Analizi — Yeung ve diğerleri	29
2.5.2	DIN 7190 Pürüzlülük Düzeltmesinin Sorgulanması — Persson	30
2.6	OKSİT TABAKASI VE ISITMA YÖNTEMİNİN TRİBOLOJİK SONUÇLARI.....	31
2.6.1	Yüksek Sıcaklıkta Triboloji ve Oksit Etkisi — Zhu ve diğerleri.....	31

2.6.2	Probabilistik ve Deneysel Tutma Torku — Booker ve diğerleri.....	32
2.7	FRETTING VE TEKRARLI YÜKLEME ALTINDA TEMAS YÜZEYİ DAVRANIŞI.....	32
2.8	SIKI GEÇME TEKNOLOJİSİNİN ENDÜSTRİYEL DEĞERLENDİRMESİ VE GÜNCEL DERLEME	33
2.9	LİTERATÜR BOŞLUĞU VE BU ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ KONUMU	34
3	ANALİTİK YÖNTEM	35
3.1	ANALİTİK YÖNTEM ÇERÇEVESİ VE TEMEL FORMÜLLER.....	35
3.2	NUMUNE 1 İÇİN ANALİTİK HESAP (FIRIN)	39
3.2.1	Girdi Parametreleri	39
3.2.2	Temas Basıncı Hesabı.....	40
3.2.3	Gerilme Dağılımı Analizi ve Emniyet Değerlendirmesi.....	41
3.2.4	Eksenel Sökme Kuvveti ve Deneysel Karşılaştırma.....	42
3.3	NUMUNE 2 İÇİN ANALİTİK HESAP (FIRIN)	44
3.3.1	Girdi Parametreleri	44
3.3.2	Temas Basıncı Hesabı.....	45
3.3.3	Gerilme Dağılımı Analizi ve Emniyet Değerlendirmesi.....	46
3.3.4	Eksenel Sökme Kuvveti ve Deneysel Karşılaştırma.....	47
3.4	NUMUNE 3 İÇİN ANALİTİK HESAP (İNDÜKSİYON)	49
3.4.1	Temas Basıncı Hesabı.....	50
3.4.2	Gerilme Dağılımı Analizi ve Emniyet Değerlendirmesi.....	51
3.4.3	Eksenel Sökme Kuvveti ve Deneysel Karşılaştırma.....	52
4	SAYISAL ANALİZ	56
4.1	SAYISAL ANALİZİN AMACI VE KAPSAMI.....	56
4.2	ANSYS WORKBENCH STATIC STRUCTURAL ORTAMI.....	57
4.3	GEOMETRİ VE MODELLEME YAKLAŞIMI.....	58
4.3.1	Model Geometrisinin Tanımlanması.....	58

4.3.2	Malzeme Tanımlaması	59
4.4	SONLU ELEMENLAR AĞI (MESH).....	59
4.4.1	Mesh Oluşturma Stratejisi	59
4.4.2	Mesh Kalitesi ve Eleman Tipi.....	60
4.5	SINIR ŞARTLARI VE YÜKLEMELERİN TANIMLANMASI	61
4.5.1	Fixed Support Sınır Şartı	61
4.5.2	Yükleme Koşulları	62
4.6	TOTAL DEFORMATION ANİMASYONUNDAN ELDE EDİLEN DEFORMASYON DAVRANIŞININ GÖRSELLEŞTİRİLMESİ.....	62
4.6.1	Başlangıç Durumu ($t = 0$) — Sıfır Deformasyon Aşaması.....	63
4.6.2	Kısmi Yük Aşaması ($t \approx 0,47$) — Geçiş Bölgesi	64
4.6.3	Maksimum Deformasyon Aşaması ($t \approx 0,95$) — Tam Yük Durumu.....	64
4.7	SAYISAL ANALİZ BULGULARININ ANALİTİK VE DENEYSEL SONUÇLARLA İLİŞKİSİ.....	65
4.7.1	Deneysel Sökme Kuvvetleri ve Ters Hesaplanan Sürtünme Katsayıları	65
4.7.2	Isıtma Yönteminin Tribolojik Davranışa Etkisi.....	66
4.7.3	Sayısal ve Analitik Sonuçların Karşılaştırmalı Değerlendirmesi	67
5	DENEYSEL ÇALIŞMA	69
5.1	DENEY METODOLOJİSİ VE GENEL YAKLAŞIM	69
5.2	NUMUNE MALZEMELERİ, GEOMETRİK ÖZELLİKLER VE KARAKTERİZASYON	70
5.3	DENEY EKİPMANLARI VE ÖLÇÜM SİSTEMİ	72
5.4	ELEKTRİKLİ FIRIN İLE ISITMA PROSEDÜRÜ (NUMUNE 1 VE NUMUNE 2).....	75
5.4.1	Ön Hazırlık	75
5.4.2	Isıtma İşlemi	75
5.4.3	Isıtma Sonrası Yüzey Gözlemleri	76
5.5	İNDÜKSİYON ISITMA PROSEDÜRÜ (NUMUNE 3).....	77

5.5.1	Ön Hazırlık	77
5.5.2	İndüksiyon Isıtma İşlemi	77
5.5.3	Isıtma Sonrası Yüzey Gözlemleri	78
5.6	SÖKME DENEYİ PROSEDÜRÜ VE KUVVET ÖLÇÜMLERİ.....	79
5.6.1	Deney Düzeneği ve Numune Yerleştirme.....	79
5.6.2	Kuvvet Değerlendirme Yaklaşımı.....	79
5.6.3	Numune 1 — Sökme Deneyi Sonuçları (Fırın, 200 °C, 30 dk)	80
5.6.4	Numune 2 — Sökme Deneyi Sonuçları (Fırın, 200 °C, 30 dk)	82
5.6.5	Numune 3 — Sökme Deneyi Sonuçları (İndüksiyon, ~250 °C, 3 dk)....	84
5.7	DENEY SONRASI YÜZEY GÖZLEMLERİ VE YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	86
5.7.1	Fırın Isıtmalı Numunelerin Yüzey Bulguları (N1 ve N2).....	86
5.7.2	İndüksiyon Isıtmalı Numunenin Yüzey Bulguları (N3)	87
6	SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	89
6.1	ANALİTİK YÖNTEM SONUÇLARI	89
6.2	DENEYSEL SONUÇLAR VE TEMEL BULGULAR	90
6.3	ANALİTİK — SAYISAL — DENEYSEL SONUÇLARIN BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ	91
6.4	MÜHENDİSLİK ÖNERİLERİ.....	91
6.5	ÇALIŞMANIN KISITLARI VE GELECEK ARAŞTIRMA ÖNERİLERİ ...	92
	KAYNAKÇA.....	94

KISALTMALAR DİZİNİ

3B	Üç boyutlu
A.Ş.	Anonim Şirket
ANSYS	Mühendislik analizleri ve sonlu elemanlar modellemeleri için kullanılan simülasyon yazılımı
AS9100	Havacılık ve uzay sanayisi kalite yönetim sistemi standardı
ASME	American Society of Mechanical Engineers / Amerikan Makine Mühendisleri Birliği
Cpk	Process Capability Index / Proses yeterlilik indeksi
DIN	Deutsches Institut für Normung / Alman Standardizasyon Enstitüsü
DNV	Det Norske Veritas / Denizcilik ve endüstriyel belgelendirme kuruluşu
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy / Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
EN	European Norm / Avrupa Standardı
FEA	Finite Element Analysis / Sonlu elemanlar analizi
FEM	Finite Element Method / Sonlu Elemanlar Yöntemi
HEMA	HEMA Endüstri A.Ş.
IEC	International Electrotechnical Commission / Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ISO	International Organization for Standardization / Uluslararası Standardizasyon Örgütü
ISO/TR	ISO Technical Report / ISO teknik raporu
ISO/TS	ISO Technical Specification / ISO teknik şartnamesi

LVDT	Linear Variable Differential Transformer / Doğrusal değişken diferansiyel transformatör
MIL	Military Standard / Askerî standartlar
N1	Numune 1
N2	Numune 2
N3	Numune 3
PTC	Performance Test Code / Performans test kodu
R2	Release 2 / Yazılım sürüm ifadesi
SAE	SAE International / Otomotiv ve makine mühendisliği alanında kullanılan malzeme ve standart sınıflandırma kuruluşu
SEM	Scanning Electron Microscope / Taramalı elektron mikroskobu
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SI	International System of Units / Uluslararası Birim Sistemi
SOLID186	ANSYS ortamında kullanılan üç boyutlu yüksek mertebeli katı eleman tipi
UIC	International Union of Railways / Uluslararası Demiryolları Birliği
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik / Alman elektrik-elektronik ve bilgi teknolojileri standardizasyon kuruluşu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Sıkı geçme göbek-mil bağlantısı eksenel kesit şeması (sol) ve kalın cidarlı Lamé gerilme dağılımı (sağ).....	1
Şekil 1.2 ISO 286 tolerans sistemi — geçme türlerine göre tolerans bölgelerinin nominal çapa göre konumu.....	2
Şekil 1.3 Bağlantı türlerinin çok kriterli karşılaştırması.....	3
Şekil 1.4 Lamé teorisi — yarıçap oranı b/a 'nın gerilme dağılımına etkisi.	6
Şekil 1.5 (a) Temas basıncı — sıkılık ilişkisi (farklı b/a oranları); (b) Sökme kuvveti — sürtünme katsayısı ilişkisi.....	7
Şekil 1.6 SAE 4140 mil ve SAE 8620 helis dişli (göbek).....	9
Şekil 1.7 Sıkı geçme yöntemiyle monte edilmiş göbek-mil numuneleri.....	9
Şekil 1.8 Söküm yöntemlerinin çok panelli karşılaştırması	11
Şekil 1.9 Termal söküm mekaniği — (a) farklı malzeme çiftlerinde termal genleşme eğrisi; (b) sıcaklıkla temas basıncının azalması.....	11
Şekil 1.10 Endüstriyel elektrikli fırın ile dişli ısıtması.....	12
Şekil 1.11 Orta frekanslı indüksiyon bobini ile dişli ısıtması.....	13
Şekil 1.12 (a) Fretting hasar bölgeleri — bağlantı kenarlarında gerilme yoğunlaşması; (b) Lamé teorisi vs 3B FEM karşılaştırması.....	14
Şekil 1.13 Hidrolik pres ile gerçekleştirilen sökme deneyi düzeneği.....	17
Şekil 2.1 Çok katmanlı kalın cidarlı silindir analitik modeli ve FEM gerilme dağılımı karşılaştırması.....	21
Şekil 2.2 Yeni analitik model ile çakma eğrisi tahmini ve deneysel doğrulama karşılaştırması.....	22
Şekil 2.3 Farklı yüzey pürüzlülüklerinde temas basıncı dağılımı karşılaştırması	23
Şekil 2.4 Homojenleştirme tekniği ile pürüzlü temas yüzeyi FEM modeli ve gerilme dağılımı sonuçları.	23
Şekil 2.5 Greenwood-Williamson asperite modeli ile sıkı geçme bağlantısında elastik-plastik temas bölgesi.....	24
Şekil 2.6 Silindiriklik, yuvarlılık ve pürüzlülüğün kombine etkisi ile eksenel söküm kuvveti dağılımı.....	25
Şekil 2.7 Büzme geçmesi için sürtünme katsayısı deneysel ölçüm aparatı ve test düzeneği	26

Şekil 2.8 Farklı sürtünme katsayıları için FEM temas basıncı ve gerilme dağılımı karşılaştırması	27
Şekil 2.9 ANSYS SOLID186 ağ modeli ve sıkı geçme bağlantısında temas basıncı dağılımı	27
Şekil 2.10 Dişli göbeği-mil bağlantısında fretting korozyon hasarı ve temas yüzeyi hasarı analizi	28
Şekil 2.11 Sıkı geçme bağlantısında fretting bölge haritası	29
Şekil 2.12 Isıl söküm analizinde farklı ısı akısı değerlerinde sökme kuvveti değişimi..	30
Şekil 2.13 Yüzey pürüzlülüğü spektrumunun sıkı geçme girintisi üzerindeki etkisi ve DIN 7190 sınırlılıkları	30
Şekil 2.14 Çelik yüzeylerde oksit fazı kalınlığı ve tribolojik sürtünme davranışı karşılaştırması	31
Şekil 2.15 Büzme geçmesi tutma torku: probabilistik, FEM ve deneysel yöntem karşılaştırması	32
Şekil 2.16 Sıkı geçme teknolojisinde güncel gelişmeler	33
Şekil 3.1 Sıkı geçme bağlantısında SAE 8620 helis dişli (göbek) teknik resmi	37
Şekil 3.2 SAE 4140 ıslah çeliği mil teknik resmi	38
Şekil 3.3 Geçme sıklığı hesabında kullanılan mil çap bölgesi detay görünümü	38
Şekil 4.1 ANSYS Mechanical ortamında oluşturulan mil–dişli model geometrisi	58
Şekil 4.2 Mil–dişli modeline ait sonlu elemanlar ağı	60
Şekil 4.3 Fixed Support sınır şartı tanımı	61
Şekil 4.4 Total Deformation animasyonu — Başlangıç durumu ($t = 0$, $U = 0$ mm)	63
Şekil 4.5 Total Deformation animasyonu — Kısmi yük aşaması ($t \approx 0,47$)	64
Şekil 4.6 Total Deformation animasyonu — Maksimum deformasyon aşaması ($t \approx 0,95$, $U_{\max} \approx 9,996$ mm)	65
Şekil 5.1 Deney öncesi hazırlanan SAE 4140 mil ve SAE 8620 helis dişli (göbek) numuneleri	71
Şekil 5.2 Sıkı geçme yöntemiyle monte edilmiş numuneler	72
Şekil 5.3 Hidrolik pres	73
Şekil 5.4 Hidrolik pres pistonu çap detayı	74
Şekil 5.5 Deneyde kullanılan mile ve dişliye ait balanser	74
Şekil 5.6 Elektrikli fırın ile ısıtma	76
Şekil 5.7 İndüksiyon bobini ile N3 numunesinin ısıtılması	78

Şekil 5.8 Numune 1 — Hidrolik pres ekranında kaydedilen pik sökme kuvveti: 5.0 ton	
.....	81
Şekil 5.9 Numune 2 — Hidrolik pres ekranında kaydedilen pik sökme kuvveti: 5.6 ton	
.....	83
Şekil 5.10 Numune 3 — Hidrolik pres ekranında kaydedilen pik sökme kuvveti: 3.2 ton	
.....	85

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1 ISO 286-1 geçme türleri sınıflandırması	2
Tablo 1.2 Sıkı geçme bağlantısı temel tasarım büyüklükleri ve tanımları.....	3
Tablo 1.3 İnce cidarlı ve kalın cidarlı silindir teorilerinin kapsamlı karşılaştırması	5
Tablo 1.4 Sıkı geçme bağlantısı tasarım emniyet kriterleri	7
Tablo 1.5 Sıkı geçme bağlantısı endüstriyel uygulama alanları	8
Tablo 1.6 Sıkı geçme söküm yöntemlerinin on kriterli karşılaştırması	12
Tablo 1.7 Fretting hasar mekanizması — etkili faktörler ve önleme yöntemleri	14
Tablo 1.8 Yüzey koşuluna göre çelik-çelik arayüzeyi sürtünme katsayısı aralıkları.....	15
Tablo 1.9 Sıkı geçme bağlantılarında kullanılan değerlendirme yaklaşımlarının karşılaştırılması.....	16
Tablo 1.10 Çalışmanın araştırma hedefleri ve kullanılan yöntemler	18
Tablo 1.11 Tez organizasyon şeması.....	19
Tablo 2.1 Analitik ve sayısal yöntemlerin karşılaştırması	21
Tablo 2.2 Yüzey pürüzlülüğü araştırmalarının karşılaştırması	25
Tablo 2.3 Çelik yüzeylerinde oksit fazları ve sürtünme katsayısı etkileri	31
Tablo 3.1 Analitik hesapta kullanılan ortak malzeme ve geometrik parametreler.....	37
Tablo 3.2 Numune 1 girdi parametreleri.....	39
Tablo 3.3 Numune 1 — Göbek kesiti boyunca Lamé gerilme dağılımı	42
Tablo 3.4 Numune 1 analitik hesap özet sonuçları	43
Tablo 3.5 Numune 2 girdi parametreleri.....	44
Tablo 3.6 Numune 2 — Göbek kesiti boyunca Lamé gerilme dağılımı	47
Tablo 3.7 Numune 2 analitik hesap özet sonuçları	48
Tablo 3.8 Numune 3 girdi parametreleri.....	49
Tablo 3.9 Numune 3 — Göbek kesiti boyunca Lamé gerilme dağılımı	52
Tablo 3.10 Numune 3 analitik hesap özet sonuçları	53
Tablo 3.11 Üç numunenin karşılaştırmalı analitik ve deneysel sonuçları.....	54
Tablo 5.1 Deney numuneleri boyutsal verileri ve ısıtma koşulları	71
Tablo 5.2 Numune 1 sökme deneyi sonuçları.....	80
Tablo 5.3 Numune 2 sökme deneyi sonuçları.....	82
Tablo 5.4 Numune 3 sökme deneyi sonuçları.....	84
Tablo 5.5 Üç numunenin deneysel sonuçları ve yüzey gözlemlerinin karşılaştırılması. 88	

1 GİRİŞ

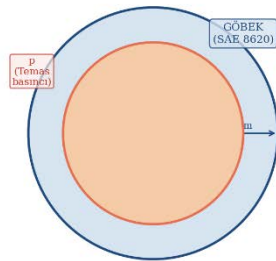
Makine sistemlerinde bileşenler arası güç ve moment iletimi; bağlantı elemanlarının doğru seçimine ve tasarımına bağlıdır. Sıkı geçme (interference fit), cıvatalı, kamalı, konik ve flanşlı kaplin gibi yöntemlerle gerçekleştirilen bu bağlantılar; kullanım amacına, yükleme türüne ve üretim koşullarına göre farklı avantajlar sunar. Bu bölümde; sıkı geçme bağlantısının teorik temelleri, endüstriyel önemi, söküm yöntemleri, analitik hesap altyapısı ve güncel araştırma yaklaşımları genel hatlarıyla ele alınmaktadır. [1]

Sıkı geçme bağlantıları; negatif montaj boşluğundan (girişim, δ) kaynaklanan arayüzey temas basıncı aracılığıyla eksenel ve dönел yük iletimini sağlayan, ek bağlantı elemanı gerektirmeyen ve yüksek eş merkezlilik hassasiyeti sunan rijit makine elemanı bağlantılarıdır. Bu bağlantı türü; güç aktarım dişlilerinden raylı araç akslarına, türbin disklerinden kompresör çarklarına kadar geniş bir endüstriyel yelpazede kullanılmaktadır. [2]

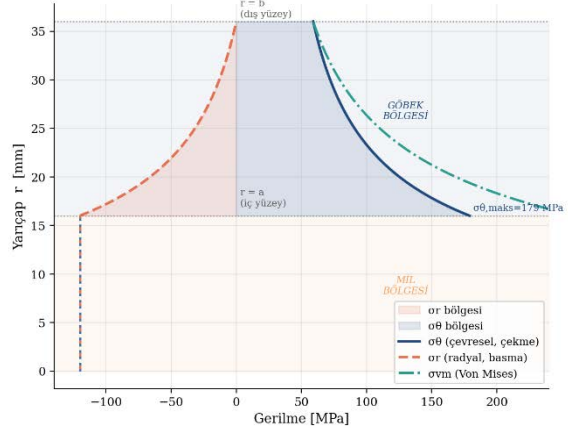
1.1 SIKI GEÇME BAĞLANTILARININ TANIMI, TÜRLERİ VE MEKANİK TEMELLERİ

Sıkı geçme bağlantısı; göbek olarak adlandırılan dış bileşenin iç çapının, mil olarak adlandırılan iç bileşenin dış çapından kasıtlı olarak küçük imal edilmesine dayanan bir birleştirme yöntemidir. Montaj sonrasında elastik deformasyon arayüzeyde p [MPa] temas basıncı oluşturur; bu basınç bağlantının yük taşıma kapasitesini doğrudan belirler.

(a) Sıkı Geçme Bağlantısı — Eksenel Kesit
Temas basıncı p arayüzeyden her yöne etkir



(b) Lamé Gerilme Dağılımı — Kesit Boyunca
($p = 120$ MPa referans, $b/a = 2.25$)

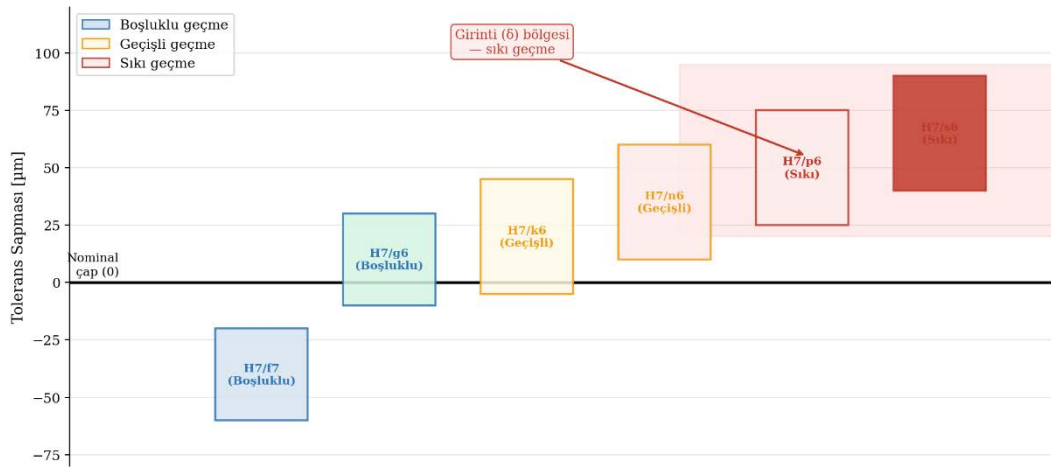


Şekil 1.1 Sıkı geçme göbek-mil bağlantısı eksenel kesit şeması (sol) ve kalın cidarlı Lamé gerilme dağılımı (sağ)

ISO 286-1 standardına göre; deliğin tolerans bölgesi milin tolerans bölgesinin tamamen altında kaldığında "sıkı geçme" elde edilir. Bu durum montaj sonrasında her koşulda negatif boşluk (girinti, $\delta = d_s - d_h > 0$) garantilemektedir. Makine imalatında tolerans sisteminin üç temel geçme kategorisi Tablo 1.1'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir [3].

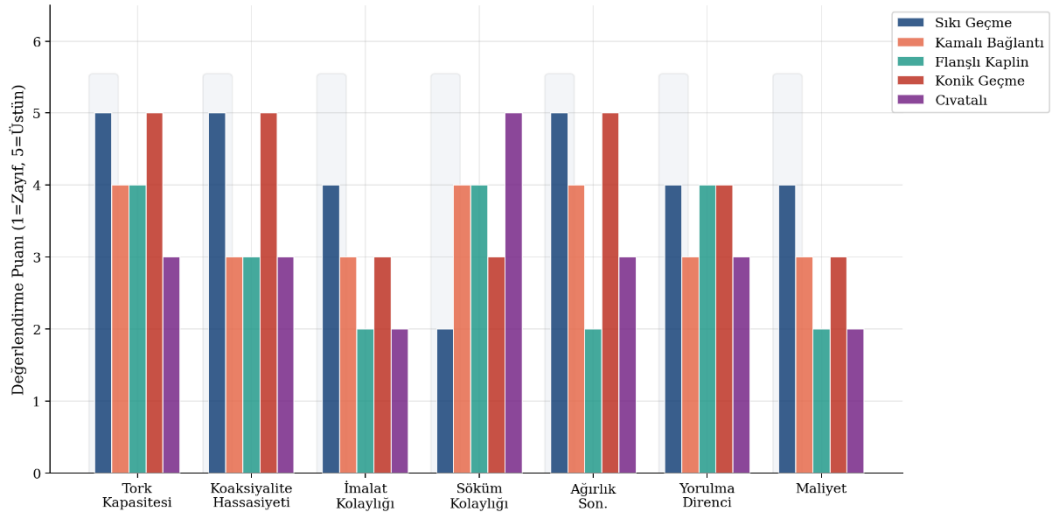
Tablo 1.1 ISO 286-1 geçme türleri sınıflandırması

Geçme Türü	ISO 286 Koşulu	Tipik Tolerans	Boşluk Durumu	Tipik Uygulama
Boşluklu Geçme	Delik alt sapması > Mil üst sapması	H7/f7, H7/g6	Her zaman boşluk (+)	Kaymalı rulman, kılavuz
Geçişli Geçme	Kısmi örtüşen tolerans bölgeleri	H7/k6, H7/m6	Boşluk veya girinti	Konum pimi, fener mili
Sıkı Geçme	Delik üst sapması < Mil alt sapması	H7/p6, H7/s6	Her zaman girinti (-)	Dışli-mil, tekerlek-aks



Şekil 1.2 ISO 286 tolerans sistemi — geçme türlerine göre tolerans bölgelerinin nominal çapa göre konumu

Sıkı geçme bağlantısını diğer yöntemlerden ayıran temel özellikler şöyle sıralanabilir: (i) Ek bağlantı elemanı (cıvata, kama, pim) gerektirmez; (ii) yüksek dönme hızlarında dengesizlik yaratabilecek fazladan parça yoktur; (iii) mükemmel eş merkezlilik sağlar; (iv) hem eksenel hem dönel yük iletir. Bununla birlikte; söküm zorluğu, hassas imalat gerekliliği ve ısıtma veya özel ekipman ihtiyacı da göz önünde bulundurulmalıdır [4].



Şekil 1.3 Bağlantı türlerinin çok kriterli karşılaştırması

Sıkı geçme bağlantısının tasarım ve analiz sürecinde kullanılan temel büyüklükler Tablo 1.2'de tanımlanmaktadır. Diametral girinti $\delta = d_s - d_h$ bağlantı davranışını belirleyen birincil parametredir; tasarımda nominal girinti yerine yüzey pürüzlülüğü etkisini hesaba katan efektif girinti δ_{eff} kullanılır [5]:

$\delta_{eff} = \delta_{nom} - 0,8 \cdot (R_{a,s} + R_{a,h})$	(1.1)
---	-------

Burada $R_{a,s}$ ve $R_{a,h}$ sırasıyla mil ve göbek yüzey ortalama pürüzlülük değerleridir. Bu düzeltme; montaj sırasında pürüzlerin kısmen düzleşmesinden kaynaklanan efektif girinti azalmasını modellemektedir.

Tablo 1.2 Sıkı geçme bağlantısı temel tasarım büyüklükleri ve tanımları

Sembol	Büyüklük	Birim	Açıklama / Tipik Değer Aralığı
$\delta = d_s - d_h$	Diametral girinti (sıklık)	mm / μm	Tasarım girdisi; tipik 0,01–0,10 mm

δ_{eff}	Efektif girinti	mm	$\delta_{nom} - 0,8 \cdot (Ra,s + Ra,h)$
$df = (ds+dh)/2$	Nominal temas çapı	mm	Ortalama geçme çapı
$a = df/2$	İç (temas) yarıçapı	mm	Lamé teorisinde $r = a$
$b = Dh/2$	Göbek dış yarıçapı	mm	Lamé teorisinde $r = b$
$b/a = C$	Yarıçap oranı	—	Kalın cidar: $b/a > 1,1$
t/a	Et kalınlığı / İç yarıçap	—	İnce cidar sınırı: $t/a < 0,10$
L	Göbek eksenel uzunluğu	mm	Temas alanı hesabı için
p	Temas basıncı (arayüzey)	MPa	Lamé teorisıyla hesaplanır
μ	Arayüzey sürtünme katsayısı	—	Kuru çelik: 0,10–0,25
$F_{sökme}$	Eksenel sökme kuvveti	N / kN	$F = \mu \cdot p \cdot \pi \cdot df \cdot L$

1.2 LAMÉ KALIN CIDARLI SİLİNDİR TEORİSİ VE GERİLME ANALİZİ

Sıkı geçme bağlantılarının analitik modellemesinde; gerilme dağılımının kesit boyunca değişkenliğini doğru biçimde temsil eden Lamé kalın cidarlı silindir teorisi kullanılmaktadır. 19. yüzyılda Gabriel Lamé tarafından elastisite teorisinin silindirik koordinatlara uygulanmasıyla elde edilen bu kapalı form çözüm; bugün de makine elemanları ve basınçlı kap mühendisliğinin temelini oluşturmaktadır [1].

İnce cidarlı (Barlow) formülü; gerilmenin kesit boyunca sabit olduğunu varsaymakta ve yalnızca $t/a < 0,10$ geometrilerinde geçerlidir. Bu sınırın üzerindeki geometrilerde ince cidarlı yaklaşım çevresel gerilmeyi %35–45 oranında eksik tahmin etmekte ve güvenlik değerlendirmesini geçersiz kılmaktadır. Tablo 1.3'te iki yöntemin kapsamlı karşılaştırması verilmektedir [6].

Tablo 1.3 İnce cidarlı ve kalın cidarlı silindir teorilerinin kapsamlı karşılaştırması

Kriter	İnce Cidarlı (Barlow)	Lamé (Kalın Cidarlı)
Teori geçerlilik sınırı	$t/a < 0,10$	Tüm t/a değerleri
Gerilme dağılımı	Kesit boyunca sabit ($\sigma_\theta = \text{sabit}$)	r 'nin fonksiyonu: $\sigma(r)$
Temas basıncı formülü	$p = E \cdot \delta / d$ (geometri faktörü yok)	$p = \delta / [d_f \cdot (C_h/E_h + C_s/E_s)]$
Geometri faktörü	Yok — temas basıncı %40–60 yüksek	C_h ve C_s dahil
Radyal gerilme σ_r	İhmal edilir	r boyunca tam profil
Çevresel gerilme $\sigma_\theta, \text{maks}$	Eksik tahmin ($-\%35-45$)	Doğru (göbek iç yüzey)
Von Mises emniyet analizi	Yapılamaz	σ_m, n_h, n_s tam hesap
Sıkılık sınırları	Belirlenemiyor	$\delta_{\min}$ ve $\delta_{\max}$ hesabı
Standart desteği	Yalnızca basit geometri	DIN 7190-1, ISO TR 10657

Lamé teorisinin temel kabuller: (i) Malzeme homojen, izotropik ve doğrusal elastik; (ii) küçük deformasyon; (iii) eksenel simetri ($\sigma = f(r)$ yalnızca); (iv) düzlem gerilme veya düzlem deformasyon koşulu. Bu kabuller metalik bağlantılar için nominal çalışma koşullarında güvenle sağlanmaktadır [6].

1.2.1 Temas Basıncı ve Sertlik Faktörleri

Temas basıncı p ; iki bileşenin ortak temas yüzeyindeki radyal deformasyon uyumluluk koşulundan türetilmektedir. Dolu mil (solid shaft) ve kalın cidarlı göbek için [2, 5]:

$$p = \frac{\delta_{\text{eff}}}{d_f \cdot \left[\frac{C_h}{E_h} + \frac{C_s}{E_s} \right]} \quad (1.2)$$

Göbek sertlik faktörü C_h ve dolu mil sertlik faktörü C_s geometriden elde edilir:

$$C_h = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} + \nu_h, \quad C_s = 1 - \nu_s \quad (1.3)$$

Burada $a = d_f/2$ iç (temas) yarıçapı, $b = D_h/2$ göbek dış yarıçapıdır. Eşit elastisite modüllü malzeme çifti ($E_h = E_s = E$) durumunda denklem sadeleşerek uygulaması kolaylaşmaktadır [2, 5].

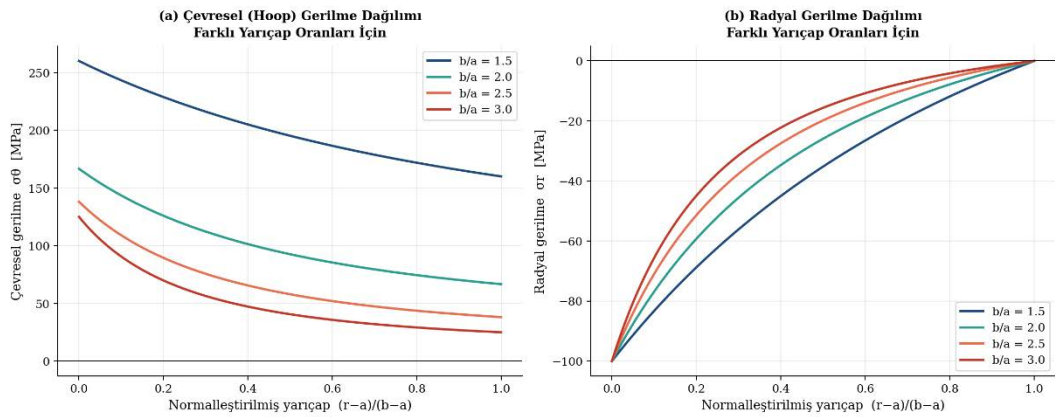
1.2.2 Kesit Boyunca Gerilme Dağılımı

Göbek kesitinde herhangi bir r yarıçapında radyal (σ_r) ve çevresel (σ_θ) gerilme bileşenleri Lamé sabitleri üzerinden elde edilmektedir [2]:

$$\sigma_r(r) = A - \frac{B}{r^2}, \quad \sigma_\theta(r) = A + \frac{B}{r^2} \quad (1.4)$$

Burada A ve B, iç yüzey sınır koşulu $\sigma_r(a) = -p$ ve dış yüzey serbest yüzey koşulu $\sigma_r(b) = 0$ 'dan belirlenen Lamé sabitleridir. Göbek iç yüzeyindeki kritik çevresel gerilme, maksimum değerine bu noktada ulaşır [2]:

$$\sigma_\theta(a) = k \cdot p, \quad k = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} \quad (1.5)$$



Şekil 1.4 Lamé teorisi — yarıçap oranı b/a 'nın gerilme dağılımına etkisi.

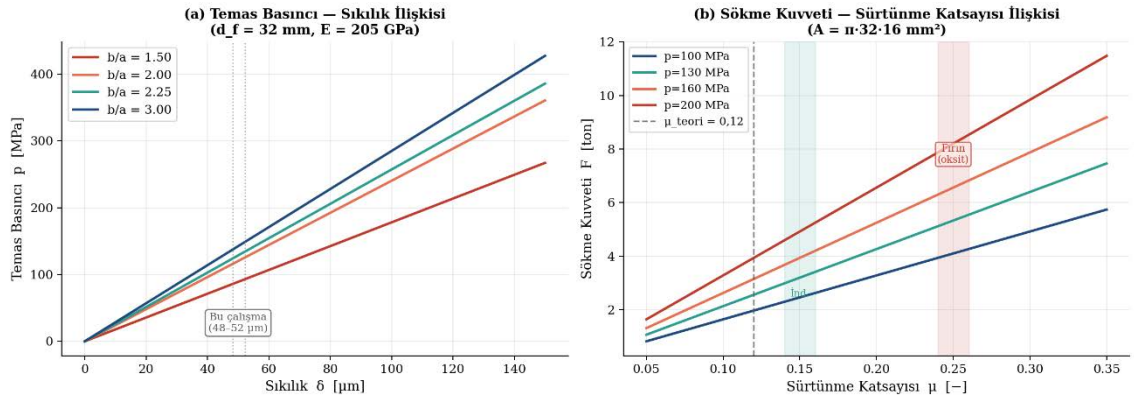
1.2.3 Von Mises Akma Kriteri ve Emniyet Değerlendirmesi

Çok eksenli gerilme durumunda plastik akma riski; Von Mises (distorsiyon enerjisi) kriteriye göre değerlendirilmektedir. Aksisimetrik durum için ($\sigma_z = 0$) [7]:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \cdot \sigma_\theta} \quad (1.6)$$

Statik yükleme için güvenlik katsayısı $n_h = \sigma_{y,h} / \sigma_{vm}$; tipik endüstriyel uygulamalarda $n_h \geq 1,5-2,0$ önerilmektedir. Maksimum müsaade edilen sıkılık δ_{maks} ; $\sigma_{vm} = \sigma_y$ koşulundan geriye hesaplanarak belirlenmektedir [2, 5].

Şekil 1.5; farklı sıkılık ve yarıçap oranı değerlerinin temas basıncı ile sökme kuvvetine etkisini parametrik olarak göstermektedir. Bu grafikler; tasarım aşamasında hızlı ön değerlendirme imkânı sunmaktadır.



Şekil 1.5 (a) Temas basıncı — sıkılık ilişkisi (farklı b/a oranları); (b) Sökme kuvveti — sürtünme katsayısı ilişkisi

Tablo 1.4'te çeşitli geçme sıkılığı aralıkları için standart emniyet değerlendirmesi kriterleri özetlenmiştir [6].

Tablo 1.4 Sıkı geçme bağlantısı tasarım emniyet kriterleri

Emniyet Kriteri	Formül	Tipik Sınır
Göbek akma emniyeti	$n_h = \sigma_{y,h} / \sigma_{vm,h}$	$n_h \geq 1,5$ (statik)
Mil akma emniyeti	$n_s = \sigma_{y,s} / p$	$n_s \gg 1$ (dolu mil)
Maks. sıkılık sınırı	$\delta_{maks}: \sigma_{vm} = \sigma_{y,h}$	$\delta / \delta_{maks} < \%80$
Min. sıkılık sınırı	$F_{sökme} \geq F_{çalışma}$	$n_{sökme} \geq 1,5-2,0$
Tork kapasitesi	$T = F \cdot a = \mu \cdot p \cdot A \cdot a$	$T \geq n \cdot T_{nominal}$

1.3 ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR VE KULLANIM ALANLARI

Sıkı geçme bağlantıları; yüksek tork kapasitesi, eş merkezlilik hassasiyeti ve ek bağlantı elemanı gerektirmemesi sayesinde endüstrinin geniş bir yelpazesinde kritik görevler üstlenmektedir. Tablo 1.5'te temel uygulama sektörleri, geçme çapı aralıkları ve kritik gereksinimler sistematik biçimde özetlenmiştir [8].

Tablo 1.5 Sıkı geçme bağlantısı endüstriyel uygulama alanları

Sektör	Tipik Uygulama	Geçme Çapı	Kritik Gereksinim	İlgili Standart
Güç aktarım	Dişli-mil, kasnak-mil, kavrama	20–200 mm	Yüksek tork, dinamik denge	ISO 286, DIN 7190
Raylı ulaşım	Tekerlek-aks, fren diski-aks	100–220 mm	Yorulma, titreşim güvenliği	UIC 813, EN 13260
Otomotiv	Diferansiyel, fren tamburu, rulman yuvası	30–120 mm	Seri üretim Cpk, otomasyon	ISO/TS 16949
Enerji üretimi	Türbin diski-rotor, jeneratör mil-göbek	200–800 mm	Yüksek sıcaklık, dinamik	ASME PTC, VDE
Rüzgâr türbini	Jeneratör rotoru, dişli kutusu	150–500 mm	Değişken yük, fretting	IEC 61400
Madencilik	Konveyör mili, değirmen bileşeni	200–600 mm	Büyük tork, periyodik bakım	DIN 7190
Havacılık/Uzay	Kompresör diski, motor mili	50–300 mm	Dar tolerans, hafiflik, güven.	AS9100, MIL
Denizcilik	Pervane şaftı, redüktör dişlisi	100–400 mm	Korozyon, tuzlu su ortamı	Lloyd's, DNV

Büyük ölçekli uygulamalarda (çap > 200 mm) montaj ve söküm işlemleri özel ekipman gerektirmekte; periyodik bakım programlarında ısıtma yöntemlerinin tercih edilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Söküm prosedürünün doğru seçimi; bileşen yeniden kullanılabilirliği ve yaşam döngüsü maliyeti üzerinde doğrudan belirleyici etkiye sahiptir [9].



Şekil 1.6 SAE 4140 mil ve SAE 8620 helis dişli (göbek)



Şekil 1.7 Sıkı geçme yöntemiyle monte edilmiş göbek-mil numuneleri

1.4 SIKI GEÇME BAĞLANTILARINDA SÖKÜM YÖNTEMLERİ

Sıkı geçme bağlantısının söküm işlemi; arayüzeyindeki toplam sürtünme kuvvetini $F_{\text{sökme}} = \mu \cdot p \cdot A$ aşmayı gerektirmektedir. Söküm yöntemi seçimi; bileşen boyutu, girinti miktarı, malzeme özellikleri, mevcut ekipman ve bileşenin yeniden kullanılabilirlik gereklilikleri gözetilerek yapılmaktadır. Yanlış yöntem; yüzey hasarı, geometrik tolerans kaybı ve parça iptali gibi ciddi sonuçlar doğurabilmektedir [10].

1.4.1 Mekanik Söküm Yöntemi

Mekanik söküm; hidrolik pres, vida presi veya özel puller tertibatı aracılığıyla eksenel yönde kontrollü kuvvet uygulanmasına dayanmaktadır. Ek ısı kaynağı gerektirmemesi ve operasyon basitliği temel avantajlarıdır. Bununla birlikte; büyük çaplı bağlantılarda pres kapasitesinin yetersiz kalması, yüzey çizilmesi ve fretting hasarı oluşturma riski sınırlılıklarını oluşturmaktadır [10].

1.4.2 Fırın Isıtma ile Söküm

Fırın ısıtma; göbeği elektrikli endüstriyel fırında 150–350 °C aralığına yükselterek termal genişleme yoluyla iç çapı büyötmektedir. Homojen sıcaklık dağılımı ve büyük boyutlu bileşenlere uygulanabilirlik başlıca avantajlarıdır. Ancak 30–120 dakikayı bulan ısıtma süresi nedeniyle çelik yüzeyinde $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4$ oksit tabakası oluşmakta; bu tabaka yüzey pürüzlülüğünü ve sürtünme katsayısını artırarak sökme kuvvetini teorik değerin belirgin biçimde üzerine çıkarmaktadır [11].

1.4.3 İndüksiyon Isıtma ile Söküm

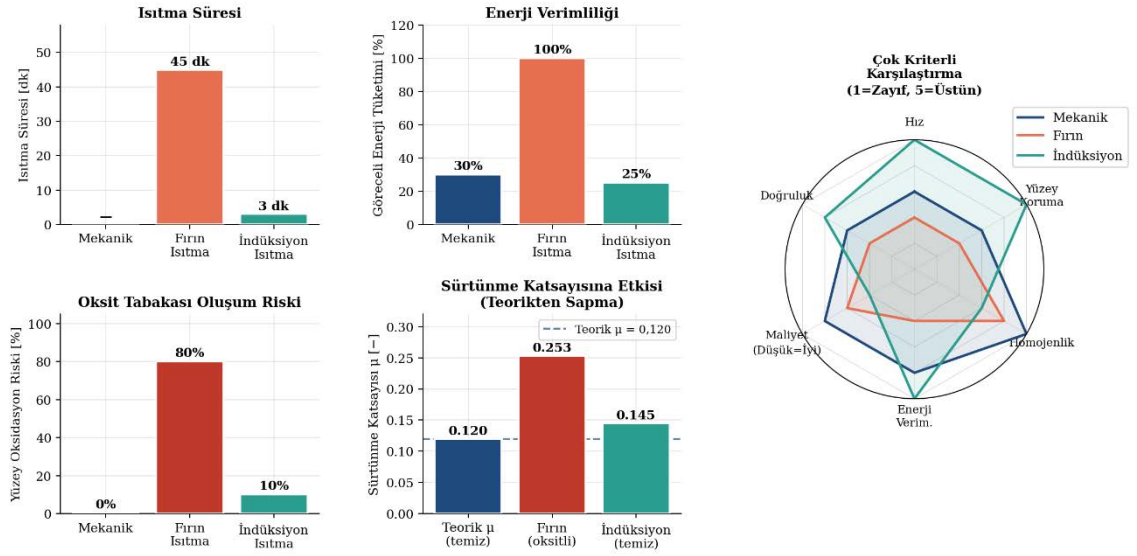
İndüksiyon ısıtma; elektromanyetik alanın malzeme içinde Joule ısısı oluşturmaları prensibine dayanmakta ve görsel olarak temiz bir ısıtma sunmaktadır. 1–5 dakikalık kısa süre; hem enerji verimliliğini artırmakta hem de yüzey oksidasyonunu en aza

indirmektedir. Bu sayede söküm sonrası yüzey bütünlüğü korunmakta ve sürtünme katsayısı teorik değere yakın kalmaktadır [12].

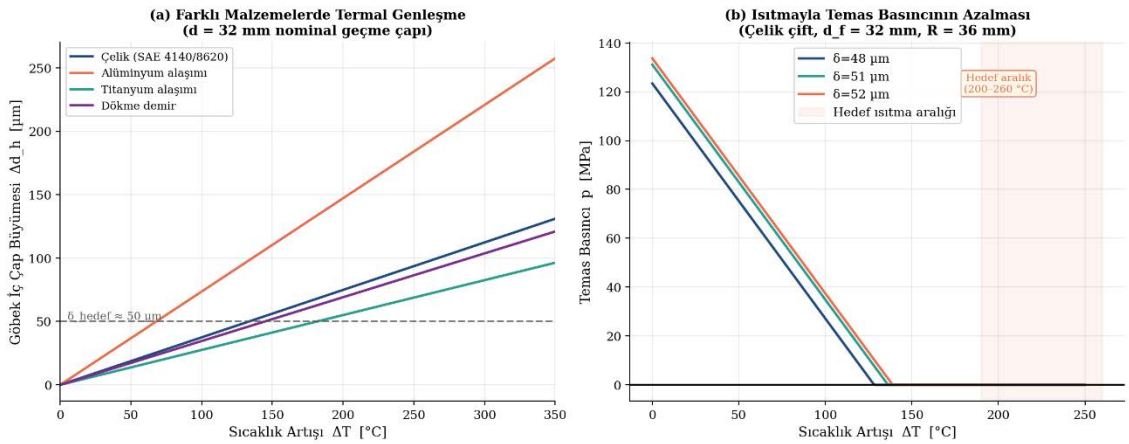
İndüksiyon penetrasyon derinliği (deri derinliği) δ_{skin} ; frekans f ve malzeme özelliklerine bağlıdır:

$$\delta_{\text{skin}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{el}}}{\pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} \quad (\text{m}) \quad (1.7)$$

Çelik için $f = 10 \text{ kHz}$ 'de $\delta_{\text{skin}} \approx 2\text{--}4 \text{ mm}$ olup bu değer makul ısıtma homojenliği sağlar. Daha düşük frekanslarda penetrasyon artar; böylece kalın bileşenlerde de homojen ısınma elde edilebilir [12].



Şekil 1.8 Söküm yöntemlerinin çok panelli karşılaştırması



Şekil 1.9 Termal söküm mekaniği — (a) farklı malzeme çiftlerinde termal genleşme eğrisi; (b) sıcaklıkla temas basıncının azalması.

Tablo 1.6 Sıkı geçme söküm yöntemlerinin on kriterli karşılaştırması

Kriter	Mekanik Pres	Fırın Isıtma	İndüksiyon Isıtma
Isıtma süresi	—	30–120 dk	1–5 dk
Yüzey oksidasyonu riski	Yok	Yüksek	Minimal
Sıcaklık homojenliği	—	Çok iyi	Orta–İyi
Enerji tüketimi	Düşük	Yüksek	Düşük–Orta
Ekipman yatırımı	Orta	Orta	Yüksek
Büyük çaplara uyum	Sınırlı (kapasite)	Çok iyi	İyi
Yüzey hasarı riski	Yüksek (çizik)	Orta	Düşük
Yeniden kullanılabilirlik	Düşük–Orta	Orta	İyi
Analitik μ uyumu	İyi (kuru yüzey)	Zayıf (oksit↑)	İyi (temiz yüzey)
Pratikte tercih durumu	Küçük/orta çap	Büyük çap, parti	Hassas, tek parça



Şekil 1.10 Endüstriyel elektrikli fırın ile dişli ısıtması



Şekil 1.11 Orta frekanslı indüksiyon bobini ile dişli ısıtması

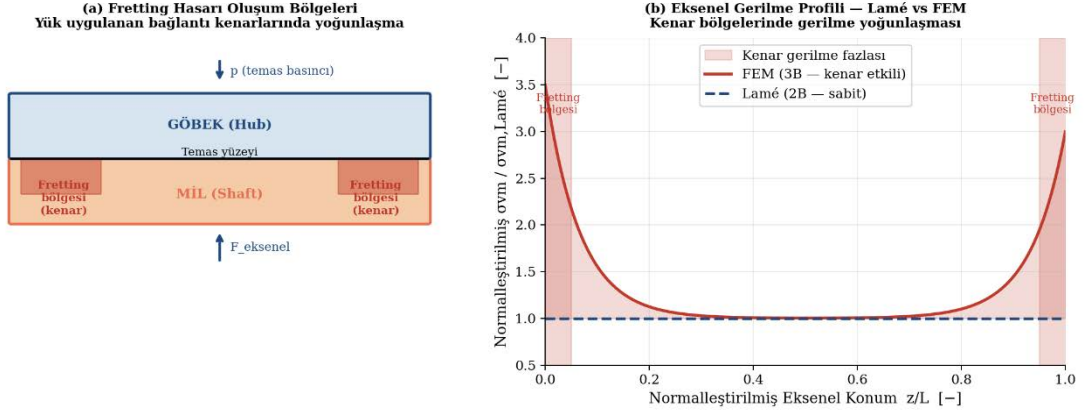
1.5 ARA YÜZEY TRİBOLOJİSİ, FRETİNG HASARI VE ISITMA ETKİSİ

Sıkı geçme bağlantılarının performansı; geometrik ve malzeme parametrelerinin yanı sıra arayüzey tribolojik davranışıyla da doğrudan ilişkilidir. Triboloji; birbirleriyle temas halinde hareket eden yüzeylerin sürtünme, aşınma ve yağlama davranışlarını inceleyen mühendislik disiplini. Sıkı geçme bağlantılarında özellikle iki tribolojik fenomen kritik önem taşımaktadır: fretting aşınması ve ısıtma kaynaklı yüzey bozunumu [13].

1.5.1 Fretting Aşınması ve Yorulma

Fretting; görünürde sabit olan iki temas yüzeyi arasında dinamik yüklemekten kaynaklanan küçük genlikli (tipik 2–80 μm) osilasyon hareketlerinin yol açtığı aşınma ve yorulma mekanizmasıdır. Sıkı geçme bağlantılarında fretting hasarı özellikle bağlantı kenarlarında ($z = 0$ ve $z = L$) gözlemlenmekte olup Şekil 1.12'de şematik olarak gösterilmektedir.

Fretting yorulması; bağlantı kenarında başlayan ve eksenel yönde ilerleyen yorulma çatlaklarıyla kendini göstermektedir. Bu hasarın oluşum riski; yüzey sertliği artırılarak (nitritleme, sementasyon), köşe tasarımı optimize edilerek ve arayüzey pürüzlülüğü kontrol edilerek azaltılabilmektedir [13].



Şekil 1.12 (a) Fretting hasar bölgeleri — bağlantı kenarlarında gerilme yoğunlaşması; (b) Lamé teorisi vs 3B FEM karşılaştırması

Fretting hasarı oluşumunu etkileyen temel faktörler:

Tablo 1.7 Fretting hasar mekanizması — etkili faktörler ve önleme yöntemleri

Faktör	Etkisi	Önleme/Azaltma Yöntemi
Temas basıncı p	Yüksek $p \rightarrow$ fretting baskılanır	Minimum girinti sınırı
Dinamik yük genliği	Yüksek genlik $\rightarrow$ fretting hızlanır	Titreşim izolasyonu
Yüzey pürüzlülüğü	$R_a \uparrow \rightarrow$ başlangıç hasarı kolay	$R_a < 0,8 \mu\text{m}$ hedeflenmeli
Temas uzunluğu L	$L \uparrow \rightarrow$ kenar etkisi rölatif azalır	L/d oranı optimizasyonu
Malzeme çifti	Benzer sertlik $\rightarrow$ fretting artar	Sertlik farkı yaratılmalı
Yağlayıcı/kaplama	Molibden disülfid $\rightarrow$ fretting azalır	Sementasyon + yüzey kaplama

1.5.2 Isıtma Yönteminin Tribolojik Sonuçları

Termal söküm prosesinde uygulanan ısıtma yöntemi; arayüzey yüzeylerinin tribolojik karakterini doğrudan etkilemektedir. Çelik yüzeylerin sıcaklık ve süreye bağlı oksidasyonu Wagner parabolic kinetics modeli çerçevesinde tanımlanmaktadır. Oksit tabakası oluşum hızı:

$x^2 = k_p \cdot t, \quad k_p = k_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)}$	(1.8)
---	-------

Burada x oksit kalınlığı, t süre, k_p parabol hız sabiti, Q aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti ve T Kelvin sıcaklığıdır. Uzun süreli fırın ısıtmasında biriken oksit; yüzey pürüzlülüğünü ve sürtünme katsayısını artırırken, kısa süreli indüksiyon ısıtmasında bu birikim çok daha sınırlı kalmaktadır [14].

Tablo 1.8 Yüzey koşuluna göre çelik-çelik arayüzeyi sürtünme katsayısı aralıkları

Durum	Sürtünme Katsayısı μ Aralığı	Yüzey Durumu	Analitik Uyum
Temiz çelik-çelik (kuru)	0,10–0,15	Metalik temas, Ra orijinal	İyi
Hafif oksitli yüzey	0,15–0,20	İnce oksit filmi	Orta
Fırın ısıtmalı (200 °C, 30 dk)	0,20–0,30	Fe ₃ O ₄ /Fe ₂ O ₃ tabakası	Zayıf (sapma)
Fırın ısıtmalı (300 °C, 60 dk)	0,30–0,45	Kalın oksit, üçüncü cisim	Çok zayıf
İndüksiyon ısıtmalı (250 °C, 3 dk)	0,12–0,17	Minimal oksit, temiz	İyi–Çok iyi
Yağlanmış yüzey (montaj),	0,05–0,10	Yağ filmi (montaj kolayı)	Sadece sökme için

1.6 ANALİTİK, SAYISAL VE DENEYSEL DEĞERLENDİRME YAKLAŞIMLARI

Sıkı geçme bağlantılarının incelenmesinde analitik hesaplar, sayısal modelleme ve deneysel gözlemler birbirini tamamlayan yöntemler olarak kullanılmaktadır. Analitik çözümler, temas basıncı ve gerilme dağılımı gibi temel büyüklüklerin kapalı form denklemlerle hesaplanmasına olanak sağlar. Sayısal modelleme ise geometri, sınır şartları

ve temas tanımları dikkate alınarak bağlantı davranışının daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine yardımcı olur. Deneysel çalışmalar ise gerçek montaj ve sökme koşullarında elde edilen verilerle analitik ve sayısal yaklaşımların mühendislik açısından yorumlanmasını sağlar [15].

Bu çalışmada analitik değerlendirme Lamé denklemlerine dayandırılmıştır. Sayısal çalışma kapsamında ANSYS Workbench ortamında üç boyutlu modelleme, ağ yapısı, sınır şartları ve sürtünmeli temas tanımları oluşturulmuştur. Deneysel aşamada ise elektrikli fırında ve indüksiyonla ısıtılan numuneler hidrolik pres yardımıyla sökülmüş, pres göstergesi üzerinden maksimum sökme yükleri okunmuştur. Bu nedenle deneysel değerlendirme, kuvvet-zaman veya kuvvet-deplasman eğrisi üzerinden değil, maksimum sökme yükü ve deney sonrası gözlemler üzerinden yapılmıştır. Tablo 1.9’da bu çalışmada kullanılan analitik, sayısal ve deneysel değerlendirme yaklaşımları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 1.9 Sıkı geçme bağlantılarında kullanılan değerlendirme yaklaşımlarının karşılaştırılması

Boyut	Analitik (Lamé)	Sayısal (FEM/ANSYS)	Deneysel (Hidrolik Pres)
Temel araç	Lamé denklemleri	ANSYS Workbench 2021 R2	Hidrolik pres ve pres göstergesi
Temel çıktı	Temas basıncı, gerilmeler, teorik sökme kuvveti	Deformasyon, temas davranışı, gerilme dağılımı	Maksimum sökme yükü ve deneysel gözlemler
Varsayım	Elastik malzeme, ideal temas, sabit sürtünme katsayısı	Tanımlanan temas, sınır şartı ve ağ yapısına bağlı çözüm	Gerçek numune, gerçek montaj ve sökme koşulları
Güçlü yönü	Hızlı, anlaşılır ve parametrik hesaplama	Geometri ve temas davranışını görselleştirme	Gerçek uygulama koşullarına yakın veri sağlama
Sınırlılığı	Basitleştirilmiş geometri ve temas kabulleri	Modelleme kabullerine ve çözüm ayarlarına bağlılık	Sınırlı numune sayısı ve gösterge okuma belirsizliği
Bu çalışmadaki rolü	Temel hesap yöntemi	Destekleyici modelleme çalışması	Maksimum sökme kuvvetinin belirlenmesi

Sayısal analizlerde temas modellemesi, sıkı geçme bağlantılarının davranışını incelemek açısından önemli bir aşamadır. ANSYS Workbench ortamında sürtünmeli temas tanımı, uygun sınır şartları ve ağ yapısı kullanılarak bağlantı davranışı temsil edilmeye çalışılmıştır. Bu tezde sayısal çalışma, deneysel sonuçları doğrudan doğrulayan kesin bir çözüm olarak değil, bağlantının temas davranışını görselleştiren ve modelleme yaklaşımını destekleyen tamamlayıcı bir çalışma olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 1.13 Hidrolik pres ile gerçekleştirilen sökme deneyi düzeneği

1.7 ÇALIŞMANIN AMACI, KAPSAMI VE TEZ ORGANİZASYONU

Literatür incelemesi, sıkı geçme bağlantılarının analitik hesaplar, sayısal modelleme ve deneysel çalışmalar ile incelendiğini göstermektedir. Bununla birlikte, ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisinin, deneysel veriler ve analitik hesaplarla birlikte değerlendirilmesi mühendislik açısından önem taşımaktadır. Özellikle fırında ısıtma ve

indüksiyonla ısıtma gibi farklı yöntemlerin temas yüzeyi, sürtünme davranışı ve sökülebilirlik üzerindeki etkilerinin birlikte ele alınması, sıkı geçme bağlantılarının tasarımı ve bakım süreçleri açısından yararlı bilgiler sunmaktadır .

Bu tez çalışması; SAE 4140 ıslah çeliği mil ve SAE 8620 sementasyon çeliği göbek/dişli bağlantısından oluşan numunelerde, elektrikli fırın ve indüksiyon ısıtma yöntemlerinin sökme kuvveti üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda Lamé denklemlerine dayalı analitik hesaplar yapılmış, ANSYS Workbench ortamında destekleyici sayısal modelleme çalışması oluşturulmuş ve hidrolik pres yardımıyla sökme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler, pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükleri ve deney sonrası gözlemler çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Tablo 1.10 Çalışmanın araştırma hedefleri ve kullanılan yöntemler

Hedef	Açıklama	Yöntem
H1	Numuneler için temas basıncı, gerilme ve teorik sökme kuvveti hesabının yapılması	Analitik hesap / Lamé denklemleri
H2	Sıkı geçme bağlantısının üç boyutlu modelleme yaklaşımıyla temsil edilmesi	ANSYS Workbench sayısal modelleme
H3	Fırında ve indüksiyonla ısıtılan numuneler üzerinde sökme deneylerinin yapılması	Hidrolik pres ve pres göstergesi
H4	Deneysel sökme yüklerinin analitik hesaplarla birlikte değerlendirilmesi	Karşılaştırmalı mühendislik yorumu
H5	Deneysel sökme kuvvetlerinden sürtünme katsayısı değerlerinin geriye hesaplanması	Matematiksel ters hesaplama
H6	Isıtma yöntemi seçiminin sökülebilirlik üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	Deneysel bulgular ve analitik yorum

Çalışmanın temel amacı, sıkı geçme bağlantılarında yalnızca geometrik sıkılık değerinin değil, uygulanan ısıtma yönteminin de sökme kuvveti üzerinde etkili olabileceğini göstermektir. Bu doğrultuda fırında ısıtılan ve indüksiyonla ısıtılan numunelerden elde edilen sonuçlar, analitik hesaplarla birlikte yorumlanmış; ısıtma süresi, yüzeyde gözlenen oksitlenme belirtileri ve sürtünme davranışının sökme kuvveti üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın kapsamı; belirli geometriye sahip SAE 4140 çelik mil ve SAE 8620 çelik göbek/dişli bağlantısı, sınırlı sayıda numune ve iki farklı ısıtma yöntemi ile sınırlandırılmıştır. İncelenen numunelerde sıkılık değerleri yaklaşık 48–52 μm aralığındadır. Dinamik yorulma, sürünme, farklı malzeme çiftleri, farklı yüzey kaplamaları ve ayrıntılı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

Tablo 1.11 Tez organizasyon şeması

Bölüm	Başlık	Temel İçerik
1	GİRİŞ	Teorik altyapı, endüstriyel önem, söküm yöntemleri, triboloji, çalışma amacı
2	LİTERATÜR TARAMASI	Sıkı geçme bağlantıları, analitik yaklaşımlar, sayısal çalışmalar ve deneysel araştırmalar
3	ANALİTİK YÖNTEM	Lamé teorisi ile 3 numune için tam adım adım hesap zinciri
4	SAYISAL YÖNTEM	Sıkı geçme bağlantıları, analitik yaklaşımlar, sayısal çalışmalar ve deneysel araştırmalar
5	DENEYSEL ÇALIŞMA	Numune hazırlama, ısıtma prosedürleri, hidrolik pres ile sökme deneyleri ve deneysel sonuçlar
6	SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	Analitik ve deneysel sonuçların değerlendirilmesi, ısıtma yöntemi etkisi, öneriler ve gelecek çalışmalar

2 LİTERATÜR TARAMASI

Sıkı geçme göbek-mil bağlantıları; ek bağlantı elemanı gerektirmeksizin yüksek tork ve aksenal yük taşıyabilen bağlantı türleri olarak makine mühendisliğinin temel araştırma konularından birini oluşturmaktadır. Bu bölümde; analitik yöntemler, yüzey pürüzlülüğü etkisi, sürtünme katsayısı ve FEM analizleri, arıza mekanizmaları, ısıl söküm yöntemleri, oksit tabakasının tribolojik sonuçları, fretting hasarı ve endüstriyel değerlendirmeyi kapsayan dokuz tematik başlık altında sistematik literatür incelemesi sunulmaktadır.

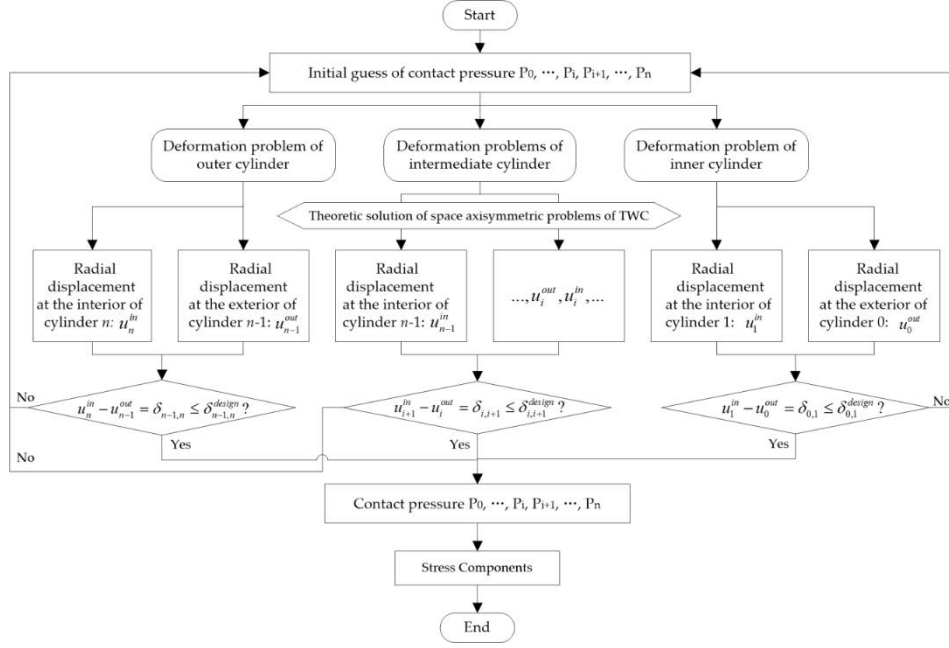
2.1 ANALİTİK YÖNTEMLER VE KALIN CİDARLI SİLİNDİR TEORİSİ

Sıkı geçme bağlantılarının analitik hesabının temelini oluşturan Lamé kalın cidarlı silindir teorisi; temas yüzeyindeki radyal basıncın ve bileşen içindeki gerilme dağılımının belirlenmesinde on yıllar boyunca baskın yöntem konumunu korumuştur. Ancak bu teorinin idealleştirilmiş kabullerinin pratikte ne ölçüde geçerli olduğu, literatürde sistematik biçimde sorgulanmaktadır.

2.1.1 Çok Katmanlı Kalın Cidarlı Silindirlerde Analitik Çözüm — Qiu ve Zhou

Qiu ve Zhou (2016) [16], çok katmanlı kalın cidarlı silindirlerde temas basıncı ve gerilmeleri hesaplamak üzere yeni bir analitik yöntem geliştirmiş; krank mili rulman tasarımına uygulamıştır. Sıcaklık artışı etkisini de kapsayan formülasyon FEM ile doğrulanmış; analitik yöntemin merkezden uzak bölgelerdeki gerilme yığılmasını yeterince modelleyemediği, bununla birlikte başlangıç tasarım aşamaları için etkin bir araç sunduğu gösterilmiştir.

Şekil 2.1; Qiu ve Zhou (2016) çalışmasının çok katmanlı model geometrisini ve analitik ile FEM sonuçlarının karşılaştırmalı gerilme dağılımını sunmaktadır. Katmanlar arası temas basıncının analitik yöntemle birkaç saniyede hesaplanabildiği görülmektedir.



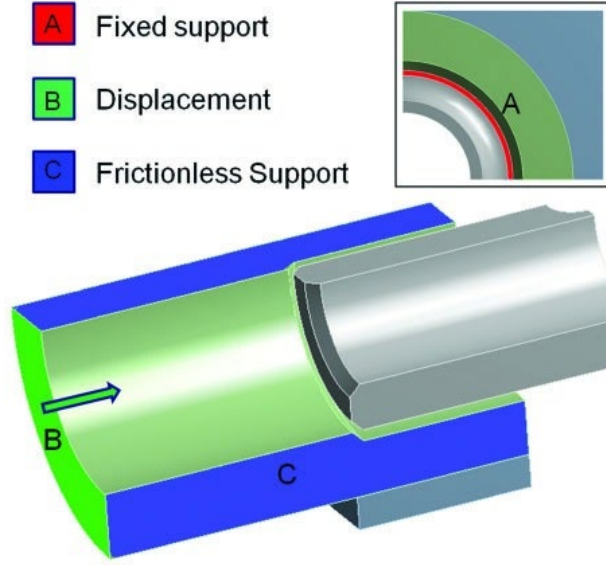
Şekil 2.1 Çok katmanlı kalın cidarlı silindir analitik modeli ve FEM gerilme dağılımı karşılaştırması

Tablo 2.1 Analitik ve sayısal yöntemlerin karşılaştırması

Yöntem	Geçerlilik Kapsamı	Sıcaklık Etkisi	Katman Sayısı	Hız
Klasik Lamé	Tek katman, izotrop	Yok	1	Saniyeler
Qiu & Zhou (2016)	Çok katman	Dahil	≥ 2	Dakikalar
FEM (ANSYS)	Tam saha, 3B	Dahil	Sınırsız	Saatler

2.1.2 Çakma Eğrisinin Yeni Analitik Modelle Tahmini — Wang ve diğerleri

Wang ve diğerleri (2019) [17], kalın cidarlı silindir teorisinin temas dışı bölgeleri ihmal etmesi nedeniyle %18'e varan hataya yol açtığını göstermiş; çakma eğrisini gerçekçi biçimde öngörebilen yeni bir analitik model önermiştir. Şekil 2.2; önerilen modelin hem FEM hem deneysel sonuçlarla örtüşümünü sergilemekte, standart Lamé yaklaşımından farkını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.2 Yeni analitik model ile çakma eğrisi tahmini ve deneysel doğrulama karşılaştırması

Bu çalışmanın bulgularının bu tez çalışmasıyla doğrudan ilgisi şudur: Temas bölgesi geometrisinin ve uç etkilerinin ihmal edilmesinin tasarım güvenlik payını olumsuz etkilediği kanıtlanmış; dolayısıyla ANSYS FEM doğrulamasının gerekliliği güçlü biçimde desteklenmiştir.

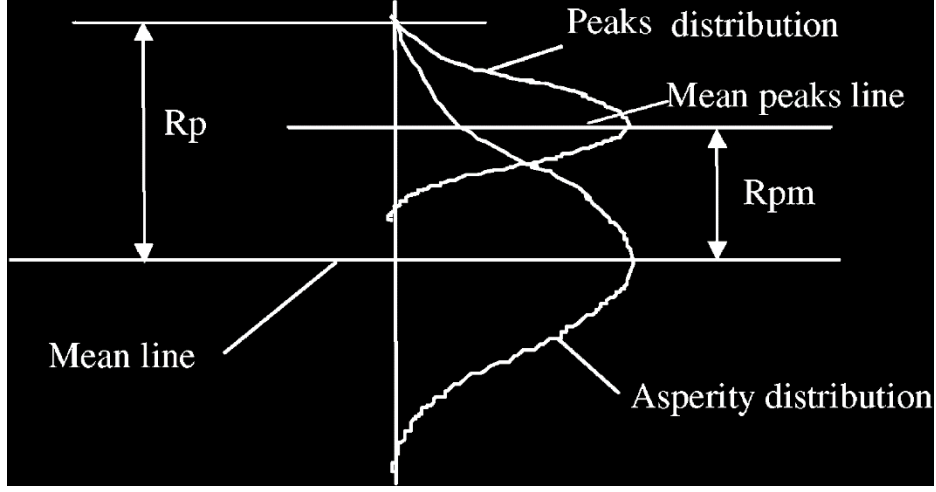
2.2 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN TEMAS MEKANİĞİNE VE SÜRTÜNME KATSAYISINA ETKİSİ

Klasik Lamé hesaplarında yüzeyler geometrik açıdan mükemmel kabul edilirken, pratik uygulamalarda yüzey asperitelerinin plastik deformasyonu efektif girintiyi ve sürtünme kuvvetini önemli ölçüde değiştirir. Bu kapsamlı araştırma alanında öne çıkan dört temel çalışma aşağıda incelenmektedir.

2.2.1 İki Kaba Yüzey Arasında Temas Basıncı — Yang ve diğerleri

Yang, Coquille, Fontaine ve Lambertin (2002) [18], silindirik sıkı geçme bağlantılarında kaba yüzeyler arasındaki temas basıncını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Araştırmacılar; yüzey pürüzlülüğünün bağlantı mukavemetine pozitif katkısını sayısal olarak modelleyen yeni bir sıklık parametresi tanımlamış ve bu parametrenin DIN

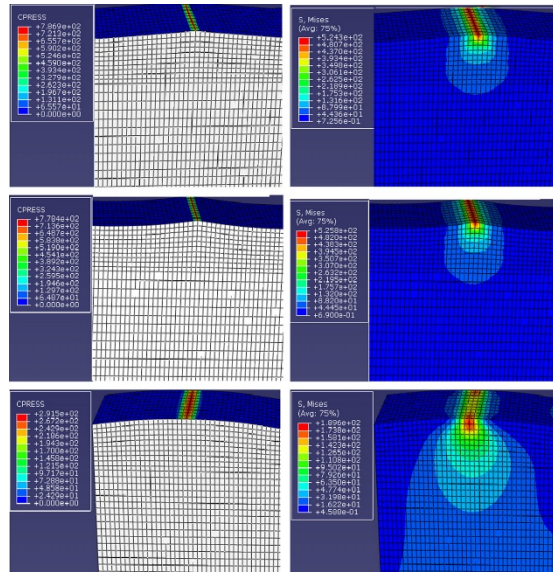
standart düzeltme katsayısından daha gerçekçi sonuçlar verdiğini belgelemiştir. Şekil 2.3; farklı pürüzlülük koşullarında analitik ve sayısal temas basıncı dağılımlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.



Şekil 2.3 Farklı yüzey pürüzlülüklerinde temas basıncı dağılımı karşılaştırması

2.2.2 Homojenleştirme Tekniği ile FEM Modellemesi — Boutoutaou ve diğerleri

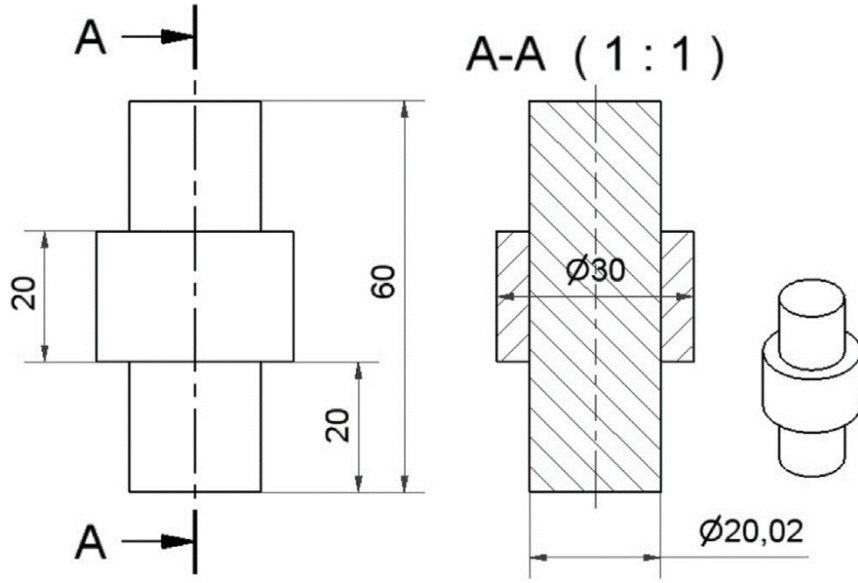
Boutoutaou, Bouaziz ve Fontaine (2013) [19], yüzey pürüzlülüğünü hesaba katan homojenleştirme tabanlı kapsamlı bir FEM yaklaşımı geliştirmiştir. Elastik-plastik koşullarda yüzey kalitesinin hem montaj hem de sökme sürecini belirleyici biçimde etkilediği saptanmıştır. Şekil 2.4; pürüzlü temas yüzeyi FEM modelini ve gerilme dağılımını göstermekte; pürüzlülüğün temas bölgesindeki gerilme profilini nasıl değiştirdiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 2.4 Homojenleştirme tekniği ile pürüzlü temas yüzeyi FEM modeli ve gerilme dağılımı sonuçları.

2.2.3 Elastik-Plastik Pürüzlülük Modeli — Buczkowski ve Kleiber

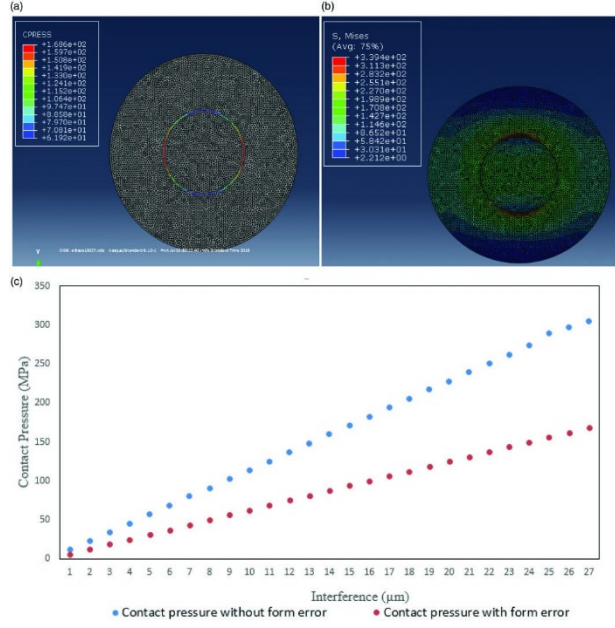
Buczkowski ve Kleiber (2016) [20], Greenwood-Williamson asperite modelini kalın cidarlı silindir teorisiyle birleştiren karma bir yaklaşım sunmuştur. Yüzey pürüzlülüğünün efektif temas basıncını azalttığı, ancak plastik asperite deformasyonunun bu azalmayı kısmen telafi ettiği gösterilmiştir. Şekil 2.5; bu çalışmanın asperite temas modelini ve temas rijitlik dağılımını sergilemektedir.



Şekil 2.5 Greenwood-Williamson asperite modeli ile sıkı geçme bağlantısında elastik-plastik temas bölgesi.

2.2.4 Geometrik Hataların Kombine Etkisi — Raj ve diğerleri

Raj, Bhatti ve Dhanish (2020) [21], silindiriklik, yuvarlılık ve yüzey pürüzlülüğünün kombine etkisini araştırmış; bu parametrelerin birlikte yarattığı etkileşimin bağımsız etkilerinden daha belirleyici olduğunu göstermiştir. Düşük silindiriklik hatası ile yüksek pürüzlülüğün bağlantı mukavemetini artırıcı bir etki yarattığı saptanmıştır. Şekil 2.6; deneysel söküm testi sonuçlarını ve geometrik parametre değişkenliğini göstermektedir.



Şekil 2.6 Silindiriklik, yuvarlılık ve pürüzlülüğün kombine etkisi ile eksenel söküm kuvveti dağılımı.

Tablo 2.2 Yüzey pürüzlülüğü araştırmalarının karşılaştırması

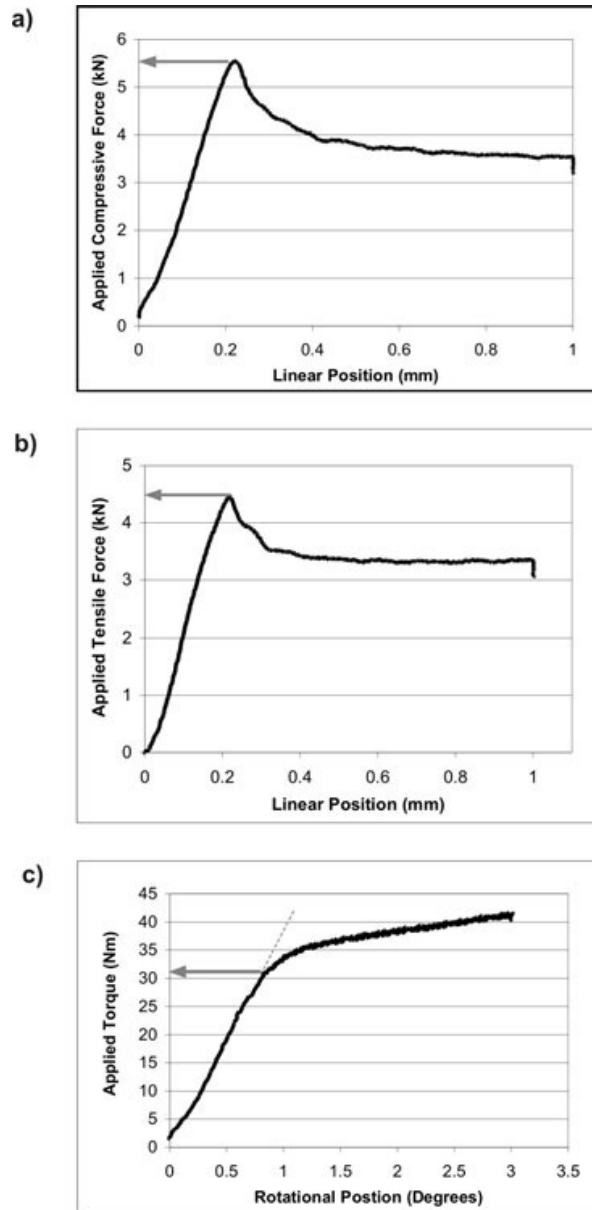
Çalışma	Yüzey Modeli	Malzeme Modeli	Temel Bulgu
Yang (2002)	DeneySEL pürüzlülük	Elastik	Pürüzlülük mukavemeti artırır
Boutoutaou (2013)	Homojenleştirme (FEM)	Elastik-plastik	Pürüzlülük sökme kuvvetini etkiler
Buczkowski (2016)	Greenwood-Williamson	Elastik-plastik	Asperite deformasyonu basıncı azaltır
Raj (2020)	Geometrik hata kombinasyonu	DeneySEL	Kombine etki bağımsız etkiden büyük

2.3 SÜRTÜNME KATSAYISININ GERİLME DAĞILIMINA ETKİSİ VE FEM ANALİZLERİ

Sürtünme katsayısı μ ; sıkı geçme tasarım hesabının en kritik ve aynı zamanda en belirsiz giriş parametresidir. DeneySEL belirleme yöntemleri ve FEM ile μ 'nin gerilme dağılımına etkisini araştıran çalışmalar aşağıda ele alınmaktadır.

2.3.1 Sürtünme Katsayısının Deneysel Belirlenmesi — Booker ve Truman

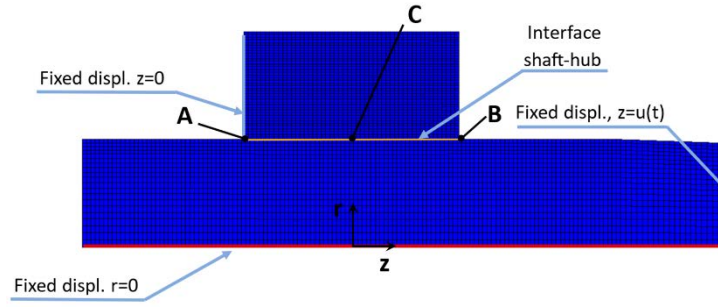
Booker ve Truman (2011) [22], büzme geçmesi bağlantıları için sürtünme katsayısını deneysel olarak belirlemeye yönelik özgün bir yöntem geliştirmiştir. Büzme geçmesinde yüzeylerin pres geçmesine kıyasla daha az hasar gördüğü ve dolayısıyla μ 'nin daha güvenilir ölçüldüğü gösterilmiştir. Şekil 2.7; bu çalışmanın deney düzeneğini ve elde edilen μ ölçüm sonuçlarını sunmaktadır. Elde edilen sonuçların klasik Lamé formülü ile sistematik biçimde örtüşmediği de saptanmıştır.



Şekil 2.7 Büzme geçmesi için sürtünme katsayısı deneysel ölçüm aparatı ve test düzeneği

2.3.2 μ 'nin Gerilme Dağılımına FEM ile İncelenmesi — González-Gutiérrez ve diğerleri

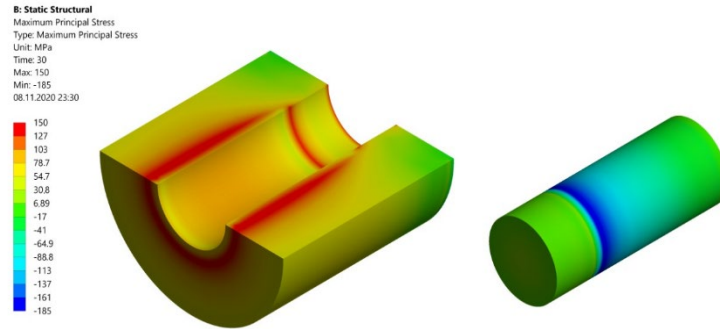
González-Gutiérrez ve diğerleri (2023) [23], sürtünme katsayısının $\mu = 0$ ile 0,5 arasındaki değerleri için sıkı geçme bağlantısındaki gerilme dağılımı ve temas basıncı üzerindeki etkisini ANSYS FEM ile sistematik biçimde incelemiştir. Yüksek μ 'nin göbek kenarlarında gerilme yığılmasını belirgin artırdığı; pah geometrisinin bu yığılmayı önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir. Şekil 2.8; farklı μ değerleri için FEM von Mises ve temas basıncı dağılımlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.



Şekil 2.8 Farklı sürtünme katsayıları için FEM temas basıncı ve gerilme dağılımı karşılaştırması

2.3.3 ANSYS ile FEM Doğrulaması — Madej ve Śliwka

Madej ve Śliwka (2021) [24], ANSYS 19.1 SOLID186 elemanlarıyla oluşturulan 3B FEM modelinin deneysel kopma kuvvetiyle %2 sapmayla örtüştüğünü göstermiştir. Lamé formülünün küçük girinti değerlerinde bile gerçeği tam yansıtmadığı; plastik deformasyon etkisinin göz ardı edilmesinin hatalara yol açtığı kanıtlanmıştır. Şekil 2.9; ANSYS SOLID186 ağ modelini ve temas basıncı dağılımını göstermektedir.



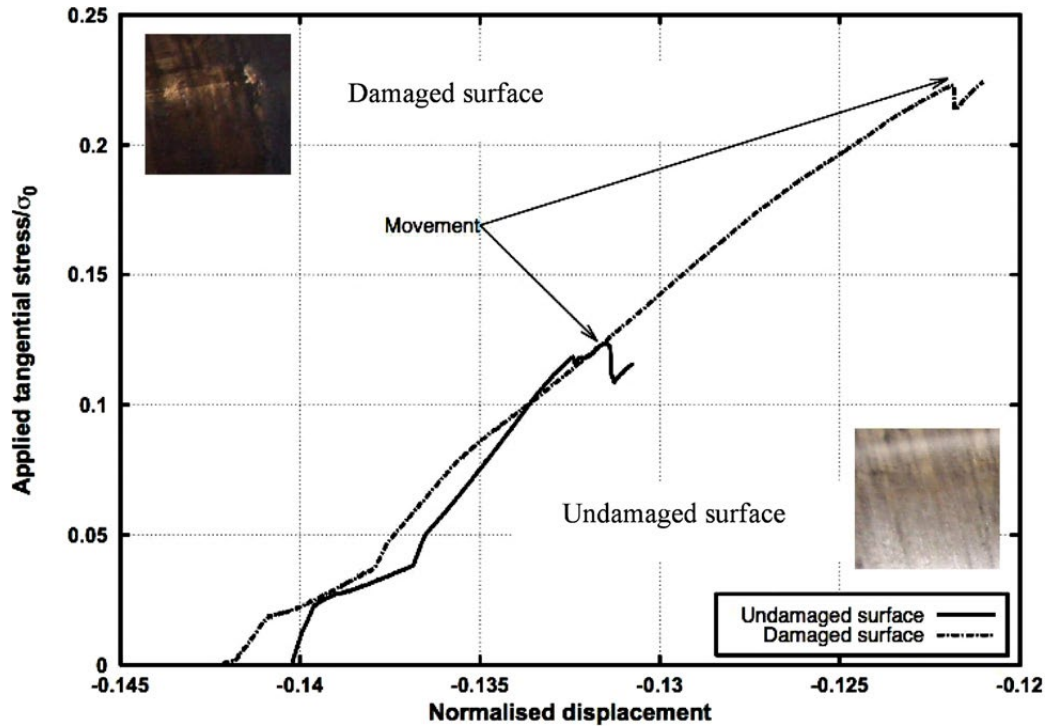
Şekil 2.9 ANSYS SOLID186 ağ modeli ve sıkı geçme bağlantısında temas basıncı dağılımı

2.4 DİŞLİ GÖBEĞİ VE MİL BAĞLANTILARINDA BAŞARISIZLIK ANALİZLERİ

Sıkı geçme bağlantısı başarısızlıkları; genellikle oksitlenme, fretting korozyonu veya montaj/söküm sürecindeki hatalı uygulamadan kaynaklanır. Gerçek arıza vakalarını analiz eden çalışmalar; teorik modellerin göz ardı ettiği tribolojik mekanizmaları açıkça ortaya koymaktadır.

2.4.1 Dişli Göbeği-Mil Arıza Kök Neden Analizi — Truman ve Booker

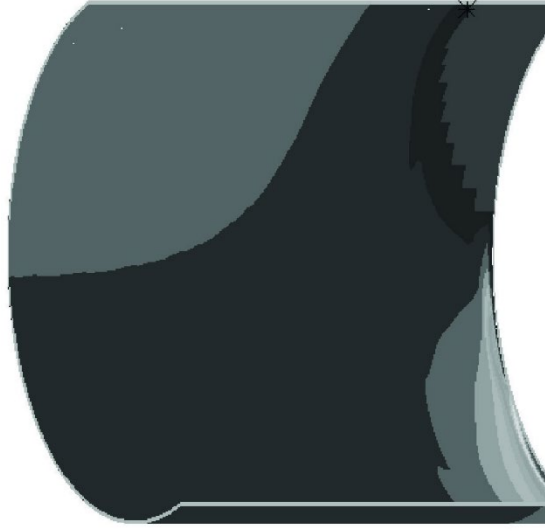
Truman ve Booker (2007) [25], bir dişli göbeği-mil büzme geçmesi bağlantısında gerçekleşen mekanik arızanın kök neden analizini gerçekleştirmiştir. Motor yağı buharı ve oksit parçacıklarının temas bölgesine sızarak μ 'yi düşürdüğü ve göbeğin mil üzerinde kaymasına zemin hazırladığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 2.10; temas yüzeyindeki fretting korozyon hasarını ve FEM gerilme dağılımını göstermektedir.



Şekil 2.10 Dişli göbeği-mil bağlantısında fretting korozyon hasarı ve temas yüzeyi hasarı analizi

2.4.2 İçi Boş Mil-Göbek Fretting Analizi — Han ve diğerleri

Han ve diğerleri (2014) [26], dönel eğilme yükü altındaki sıkı geçme bağlantısında ANSYS ile stick/slip/open temas bölgesi haritasını oluşturmuştur. Bağlantı kenarlarındaki "kenar etkisi"nin gerilme yığılmasının birincil nedeni olduğu saptanmıştır. Şekil 2.11; temas bölgesi haritasını ve girinti miktarının stick-slip sınırlarına etkisini göstermektedir.



Şekil 2.11 Sıkı geçme bağlantısında fretting bölge haritası

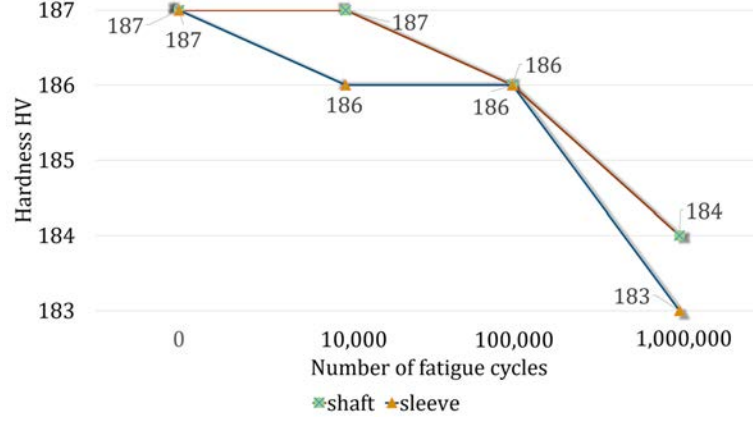
2.5 ISIL YÖNTEMLERLE SÖKÜM VE SÖKME KUVVETİNE TERMAL ETKİLER

Isıl söküm prosesi; termal genişlemeyle temas basıncını düşürürken arayüzey tribolojik karakterini de köklü biçimde değiştirebilmektedir. Bu alandaki sayısal ve deneysel çalışmalar önemli bulgular ortaya koymuştur.

2.5.1 Hasarlı Bağlantıların Hasarsız Isıl Söküm Analizi — Yeung ve diğerleri

Yeung ve diğerleri (2023) [27], aşınma hasarı görmüş sıkı geçme bağlantılarında ANSYS Workbench 2021 ile geçici ısıl yapısal analiz gerçekleştirmiştir. 2 W/mm² ısı akısında sökme kuvvetinin %50, düşük frekanslı titreşimle birleştiğinde ise %85 azaldığı

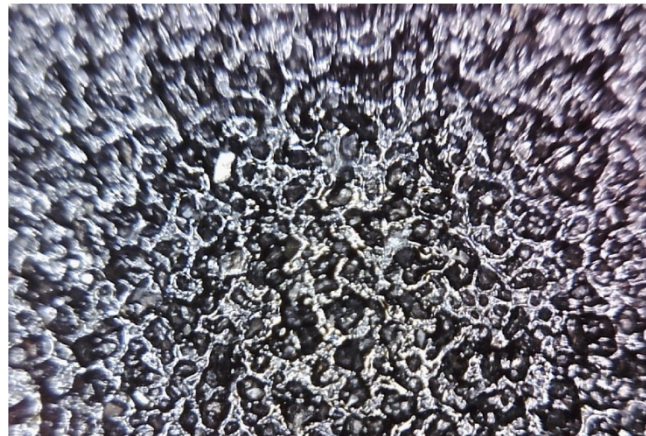
görülmüştür. Korozyon hasarlı yüzeylerde artmış μ 'nin ısıl söküm yanıtını köklü biçimde değiştirdiği bulgusu; bu tez çalışmasındaki oksit tabakası - sökme kuvveti ilişkisini doğrudan desteklemektedir. Şekil 2.12; farklı ısı akısı değerlerindeki sökme kuvveti azalma grafiğini sunmaktadır.



Şekil 2.12 Isıl söküm analizinde farklı ısı akısı değerlerinde sökme kuvveti değişimi.

2.5.2 DIN 7190 Pürüzlülük Düzeltmesinin Sorgulanması — Persson

Persson (2023) [28], sıkı geçme bağlantılarında yüzey pürüzlülüğünün girinti hesabına dahil edilmesi için kendi geliştirdiği temas mekaniği teorisini uygulamıştır. DIN 7190 standart pürüzlülük düzeltme katsayısının teorik dayanağını kapsamlı biçimde sorgulayan bu çalışma; söküm kuvvetinin termal genleşme farklılıklarına ve sıcaklık koşullarına bağımlılığını da analitik olarak ele almıştır. Şekil 2.13; pürüzlülük spektrumunun teorik girinti modeline etkisini göstermektedir.



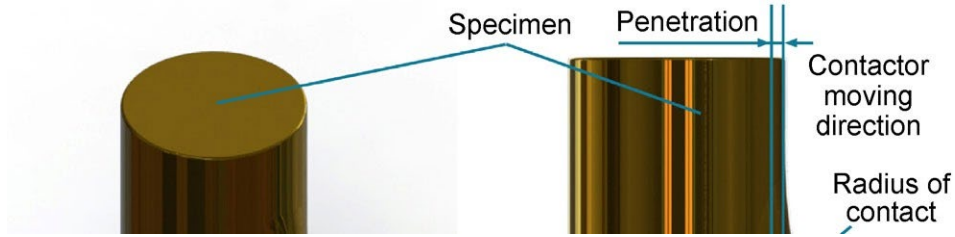
Şekil 2.13 Yüzey pürüzlülüğü spektrumunun sıkı geçme girintisi üzerindeki etkisi ve DIN 7190 sınırlılıkları.

2.6 OKSİT TABAKASI VE ISITMA YÖNTEMİNİN TRIBOLOJİK SONUÇLARI

Isıtma yönteminin seçimi; temas yüzeyinin kimyasal ve yapısal durumunu belirleyerek sürtünme katsayısını köklü biçimde etkilemektedir. Uzun süreli fırın ısıtması FeO/Fe₃O₄/Fe₂O₃ oksit fazlarını oluştururken, kısa süreli indüksiyon ısıtması yüzeyi büyük ölçüde koruduğu için tribolojik açıdan belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır.

2.6.1 Yüksek Sıcaklıkta Triboloji ve Oksit Etkisi — Zhu ve diğerleri

Zhu ve diğerleri (2015) [29], farklı ısıtma koşullarındaki oksit katmanlarının sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Oksit fazına ve kalınlığına bağlı olarak μ 'nin 0,08–0,45 gibi geniş bir aralıkta değişebildiği ortaya konmuştur. Şekil 2.14; farklı oksit koşullarında sürtünme davranışını özetleyen tabloyu sunmaktadır.



Şekil 2.14 Çelik yüzeylerde oksit fazı kalınlığı ve tribolojik sürtünme davranışı karşılaştırması

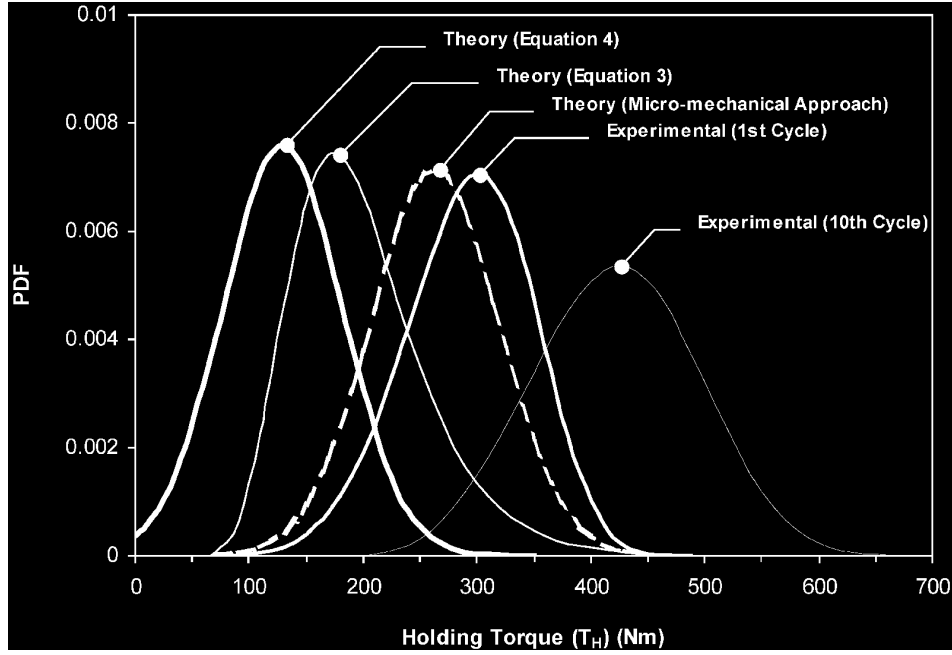
Bu tez çalışmasında fırın ısıtmalı numunelerde ölçülen $\mu_{\text{ters}} = 0,246\text{--}0,260$ değerleri; Zhu ve diğerleri (2015)'nin Fe₃O₄ baskın koşullar için bildirdiği yüksek μ aralığıyla tutarlıdır.

Tablo 2.3 Çelik yüzeylerinde oksit fazları ve sürtünme katsayısı etkileri

Oksit Fazı	Oluşum Koşulu	μ Etkisi
Temiz yüzey	İndüksiyon, ~3 dk	$\mu \approx 0,12$ (teorik)
Fe ₂ O ₃ (Hematit)	Fırın 150–300 °C	μ yüksek
Fe ₃ O ₄ (Manyetit)	Fırın 200–570 °C	Orta-yüksek μ
FeO (Wustit)	570 °C üzeri	Düşük μ (kaygan)

2.6.2 Probabilistik ve Deneysel Tutma Torku — Booker ve diğerleri

Booker ve diğerleri (2004) [30], büzme geçmesiyle üretilen bağlantılarda tutma torkunu probabilistik, mikro-mekanik ve deneysel yaklaşımlarla karşılaştırmıştır. Standart Lamé+Coulomb hesabının deneysel sonuçlardan sistematik biçimde saptığı; bu sapmanın üretim toleransları ve pürüzlülük dağılımından kaynaklandığı gösterilmiştir. Şekil 2.15; probabilistik ve deterministik yaklaşımların tutma torku tahminlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.



Şekil 2.15 Büzme geçmesi tutma torku: probabilistik, FEM ve deneysel yöntem karşılaştırması

2.7 FRETTEING VE TEKRARLI YÜKLEME ALTINDA TEMAS YÜZEYİ DAVRANIŞI

Dinamik yük koşullarında bağlantı kenarından başlayan mikro-kayma hareketleri temas yüzeyini sürekli bozarak uzun vadeli güvenilirliği tehdit eder. Fretting hasarı; gerilme yığılması, yüzey oksidasyonu ve yorulma çatlakları başlangıcı açısından kritik öneme sahiptir.

Kowalski ve diğerleri (2023) [31], dönel eğilme koşulları altında tekrarlı sökme-montaj işlemine tabi tutulan bağlantılarda temas yüzeyi aşınmasını deneysel olarak incelemiştir.

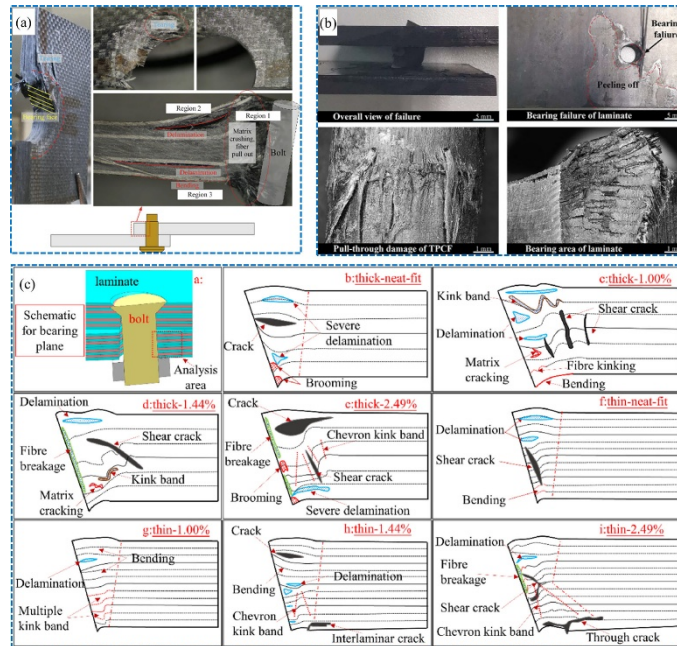
Her bin yorulma çevriminin ardından ölçülen Ra, Rz değerleri ve sertlik verileri; tekrarlanan sökme-montaj işleminin temas yüzeyinde kalıcı hasar bıraktığını ve sürtünme katsayısını değiştirdiğini göstermiştir.

Bu tez çalışmasındaki her numune yalnızca bir kez söküm testine tabi tutularak önceki sökme geçmişinin karıştırıcı etkisi elimine edilmiş; böylece ısıtma yönteminin tribolojik etkisi bağımsız biçimde değerlendirilebilmiştir.

2.8 SIKI GEÇME TEKNOLOJİSİNİN ENDÜSTRİYEL DEĞERLENDİRMESİ VE GÜNCEL DERLEME

Sıkı geçme teknolojisi; sürdürülebilir üretim ve yeniden imalat bağlamında yeniden gündeme gelen bir araştırma alanıdır. Kapsamlı derleme çalışmaları; mevcut araştırma boşluklarını ve gelecek yönelimleri sistematik biçimde haritalandırmaktadır.

Advances and Challenges in Interference Fit Technology (2023) [32] başlıklı kapsamlı derleme çalışması; analitik, sayısal ve deneysel araştırmaların bütünleşik bir değerlendirmesini sunmakta ve gelecekteki araştırma önceliklerini belirlemektedir. Şekil 2.16; bu derlemenin sıkı geçme alanındaki temel araştırma akışlarını ve yöntemler arası etkileşimi özetleyen şemasını sunmaktadır.



Şekil 2.16 Sıkı geçme teknolojisinde güncel gelişmeler

2.9 LİTERATÜR BOŞLUĞU VE BU ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ KONUSU

Literatür incelemesi sonucunda, sıkı geçme bağlantılarının analitik hesaplar, sayısal modelleme ve deneysel yöntemlerle farklı yönlerden incelendiği görülmektedir. Analitik çalışmalarda temas basıncı, gerilme dağılımı ve sökme kuvveti gibi büyüklükler kapalı form denklemlerle ele alınırken, sayısal çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemiyle temas davranışı ve deformasyon durumu değerlendirilmektedir. Deneysel çalışmalarda ise farklı montaj, söküm ve yüzey koşullarının bağlantı davranışına etkisi incelenmektedir.

Bununla birlikte, ısıtma yönteminin sıkı geçme bağlantılarında sökme kuvveti üzerindeki etkisinin analitik hesaplar ve deneysel verilerle birlikte değerlendirilmesi mühendislik açısından önem taşımaktadır. Özellikle elektrikli fırında ısıtma ve indüksiyonla ısıtma gibi farklı yöntemlerin aynı çalışma kapsamında karşılaştırılması; sökme kuvveti, yüzeyde gözlenen değişimler ve sürtünme davranışı açısından yararlı bilgiler sunmaktadır.

Bu tez çalışması, SAE 4140 ıslah çeliği mil ve SAE 8620 sementasyon çeliği göbek/dişli bağlantısından oluşan numunelerde, elektrikli fırın ve indüksiyon ısıtma yöntemlerinin sökme kuvveti üzerindeki etkisini incelemektedir. Çalışmada Lamé denklemlerine dayalı analitik hesaplar yapılmış, ANSYS Workbench ortamında destekleyici sayısal modelleme yaklaşımı oluşturulmuş ve hidrolik pres yardımıyla sökme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel değerlendirme, pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükleri ve deney sonrası gözlemler üzerinden yapılmıştır.

Bu çalışmanın literatürdeki konumu, sıkı geçme bağlantılarında ısıtma yöntemi seçiminin sökülebilirlik üzerindeki etkisini deneysel bulgular ve analitik hesaplar çerçevesinde değerlendirmesidir. Elde edilen sonuçlar, en yüksek sıklık değerine sahip numunenin her zaman en yüksek sökme kuvvetini gerektirmeyebileceğini göstermektedir. Bu durumun ısıtma süresi, yüzeyde gözlenen oksitlenme belirtileri ve temas yüzeyindeki sürtünme davranışı ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir.

3 ANALİTİK YÖNTEM

Bu bölümde, sıkı geçme göbek-mil bağlantısının temas basıncı, arayüzey gerilme dağılımı ve sökme kuvveti; Lamé kalın cidarlı silindir teorisi çerçevesinde, deneyde kullanılan üç numune için bağımsız olarak ve adım adım analitik biçimde hesaplanmaktadır. Hesaplarda tüm değişkenler standart mühendislik birimleriyle (MPa, mm, N) ifade edilmekte; her ara sonuç ayrıntılı olarak gösterilmektedir.

Lamé kalın cidarlı silindir teorisi, 19. yüzyılda Gabriel Lamé tarafından geliştirilen ve silindirik koordinatlarda basınç altındaki kalın cidarlı elemanların gerilme dağılımını kapalı form olarak veren analitik bir yaklaşımdır [1]. Uygulamanın geçerliliği; malzemenin homojen, izotropik ve doğrusal elastik davranış göstermesi, deformasyonların küçük kalması ve yüklemenin eksenel simetrik olması koşullarına dayanmaktadır. Bu koşullar metalik bağlantılar için nominal çalışma koşullarında yeterli doğrulukla sağlanmaktadır [6].

İnce cidarlı yaklaşımın aksine Lamé teorisi; temas basıncı hesabında geometri faktörlerini (C_h ve C_s) açıkça modele katmakta, kesit boyunca değişen radyal ve çevresel gerilme dağılımının fonksiyonu olarak vermekte ve göbek iç yüzeyindeki kritik gerilme yoğunlaşmasını doğru biçimde yakalamaktadır [30]. Bu çalışmada incelenen bağlantıda et kalınlığı/iç yarıçap oranı $t/a \approx 0,75$ olup ince cidarlı yaklaşımın geçerlilik sınırı olan 0,10u yaklaşık yedi kat aşmaktadır; dolayısıyla Lamé teorisinin kullanımı zorunludur.

3.1 ANALİTİK YÖNTEM ÇERÇEVESİ VE TEMEL FORMÜLLER

Temas basıncı hesabında temel bağıntı, iki bileşenin temas yüzeyindeki radyal deformasyon uyumluluk koşulundan türetilmektedir. Dolu mil ve kalın cidarlı göbekten oluşan sistem için temas basıncı p , Denklem 3.1 ile verilmektedir [3]:

$p = \frac{\delta}{d_f \left[\frac{C_h}{E_h} + \frac{C_s}{E_s} \right]}$	(3.1)
---	-------

Denklemden δ [mm] diyetral sıkılık; $d_f = (d_s + d_h)/2$ [mm] nominal temas apı; C_h göbek sertlik faktörü; C_s dolu mil sertlik faktörü; E [MPa] elastisite modülüdür. Eşit elastisite modüllü malzeme çifti için ($E_h = E_s = E$) denklem sadeleşmektedir. Sertlik faktörleri şöyle tanımlanmaktadır [3]:

$C_h = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} + \nu_h$	(3.2)
---	-------

$C_s = 1 - \nu_s$	(3.3)
-------------------	-------

Burada $R = D_h/2$ göbek dış yarıçapı, $r = d_f/2$ temas yarıçapı ve ν Poisson oranıdır. Göbek iç yüzeyinde ($r = a = r_{\text{temas}}$) radyal ve çevresel gerilme bileşenleri Lamé sabitlerinden elde edilmektedir [1, 2]:

$\sigma_r(a) = -p$	(3.4)
--------------------	-------

$\sigma_\theta(a) = k \cdot p, \quad k = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2}$	(3.5)
---	-------

Çok eksenli gerilme durumunda akma değeriendirilmesi Von Mises eşdeğer gerilmesi üzerinden yapılmaktadır [7]. Aksisimetrik gerilme durumunda ($\sigma_z = 0$):

$\sigma_{vm,h} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 - \sigma_r \cdot \sigma_\theta}$	(3.6)
--	-------

Eksenel sökme kuvveti; Coulomb sürtünme yasasına dayanmakta ve temas basıncı, sürtünme katsayısı ve temas alanı ile doğrudan ilişkilidir [2]:

$F = \mu \cdot p \cdot A, \quad A = \pi \cdot d_f \cdot L$	(3.7)
--	-------

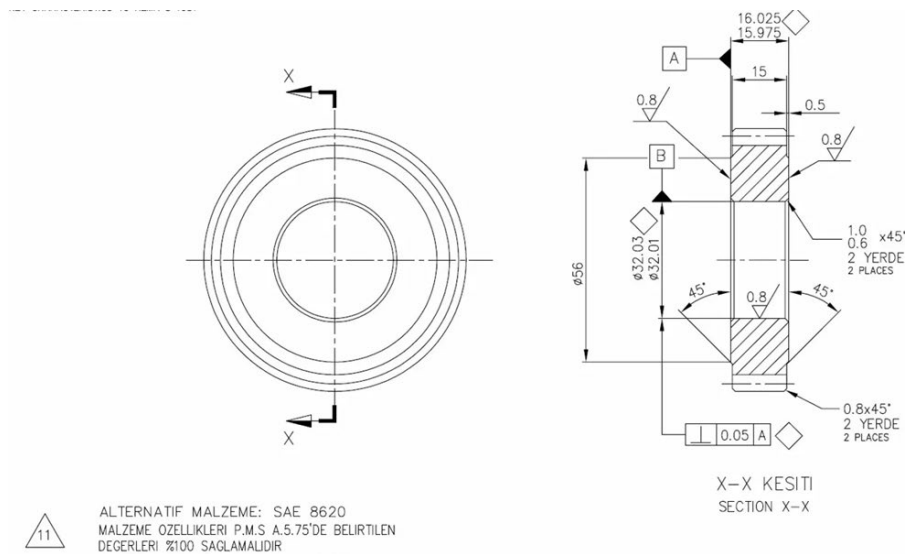
Burada μ teorik (nominal) sürtünme katsayısı, A [mm²] temas alanı, L [mm] bağlantı uzunluğudur. Deneyisel ve analitik değeri arasındaki farktan geriye dönük sürtünme katsayısı μ_{ters} hesaplanabilmektedir:

$\mu_{\text{ters}} = \frac{F_{\text{deney}}}{p \cdot A}$	(3.8)
--	-------

Tablo 3.1 de tüm hesaplamalarda kullanılan ortak malzeme özellikleri ve genel geometrik sabitler verilmektedir.

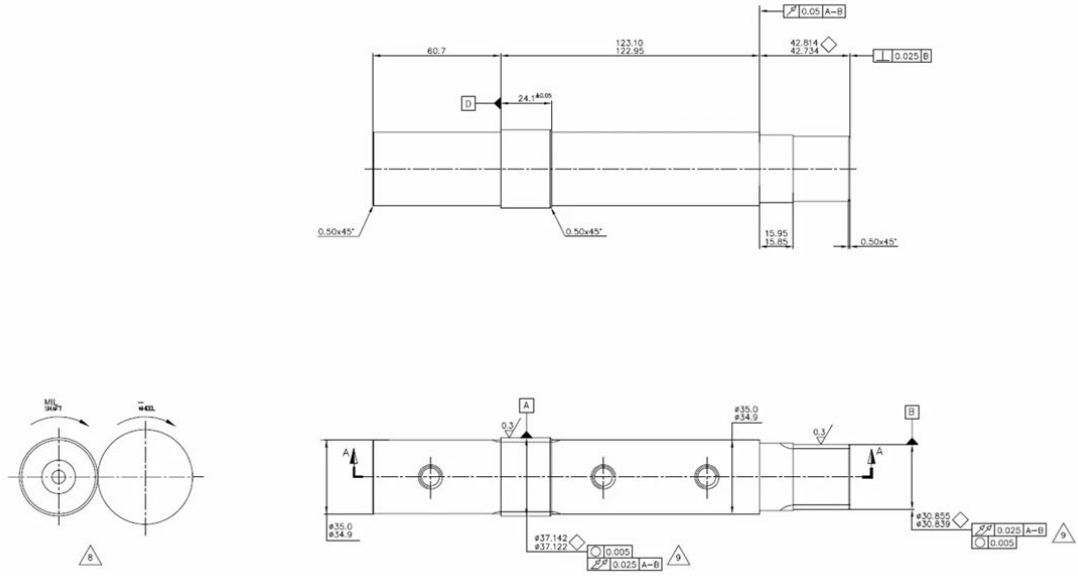
Tablo 3.1 Analitik hesapta kullanılan ortak malzeme ve geometrik parametreler

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Mil malzemesi	—	SAE 4140 ıslah çeliği	—
Göbek malzemesi	—	SAE 8620 sementasyon çeliği	—
Elastisite modülü (mil)	Es	205 000	MPa
Elastisite modülü (göbek)	Eh	205 000	MPa
Poisson oranı (her ikisi)	ν	0,30	—
Göbek dış çapı	Dh	72,000	mm
Göbek dış yarıçapı	R	36,000	mm
Mil akma dayanımı	$\sigma_{y,s}$	1 035	MPa
Göbek akma dayanımı	$\sigma_{y,h}$	830	MPa
Teorik sürtünme katsayısı	μ	0,120	—

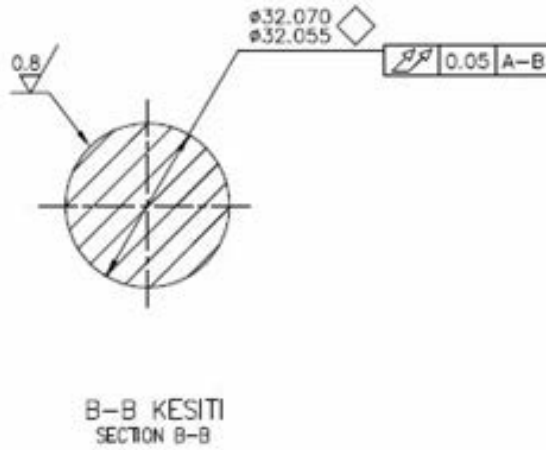


Şekil 3.1 Sıkı geçme bağlantısında SAE 8620 helis dişli (göbek) teknik resmi

STANDART DEMİRLER İÇİN BAK HEMA 5 1681
KAY. GİRİŞİMİNE İZİN VERİLİR



Şekil 3.2 SAE 4140 ıslah çeliği mil teknik resmi



Şekil 3.3 Geçme sıklığı hesabında kullanılan mil çap bölgesi detay görünümü

3.2 NUMUNE 1 İÇİN ANALİTİK HESAP (FIRIN)

Numune 1 (Fırın) numunesi Fırın, 200 °C, 30 dk yöntemiyle ısıtılmış ve hidrolik pres ile sökme deneyi uygulanmıştır. Aşağıda bu numuneye ait tüm analitik hesap adımları Denklem 3.1–3.8 çerçevesinde sırayla yürütülmektedir.

3.2.1 Girdi Parametreleri

Numune 1'e ait boyutsal ölçümler mikrometre ve hava ölçeri ile montaj öncesinde belirlenmiş; Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2 Numune 1 girdi parametreleri

Parametre	Sembol	Ölçülen Değer	Birim
Mil dış çapı	ds	32.0703	mm
Göbek iç çapı	dh	32.0220	mm
Göbek dış çapı	Dh	72,000	mm
Temas uzunluğu	L	16.009	mm
Elastisite modülü	E	205 000	MPa
Poisson oranı	ν	0,30	—
Sürtünme katsayısı (teorik)	μ	0,120	—
Göbek akma dayanımı	$\sigma_{y,h}$	830	MPa
Mil akma dayanımı	$\sigma_{y,s}$	1 035	MPa
Isıtma yöntemi	—	Fırın, 200 °C, 30 dk	—
Deneysel sökme kuvveti	Fdeney	5.0	ton

3.2.2 Temas Basıncı Hesabı

Adım 1 — Diametral sıkılık (Denklem 3.1):

$\delta = d_s - d_h = 32.0703 - 32.0220$ $= 0.0483 \text{ mm}$	(3.1)
--	-------

Adım 2 — Nominal temas çapı ve yarıçaplar:

$d_f = \frac{d_s + d_h}{2} = 32.0461 \text{ mm}$	(3.2)
--	-------

$r = 16.0231 \text{ mm} , \quad R = 36.0 \text{ mm}$	(3.3)
--	-------

Adım 3 — Göbek sertlik faktörü C_h (Denklem 3.2):

$C_h = \frac{36^2 + 16.0231^2}{36^2 - 16.0231^2} + 0.30 = 1.7941$	(3.4)
---	-------

Adım 4 — Mil sertlik faktörü C_s (Denklem 3.3):

$C_s = 1 - 0.30 = 0.70$	(3.5)
-------------------------	-------

Mil dolu kesit (solid shaft) geometrisine sahip olduğundan Denklem 3.3 doğrudan uygulanmaktadır. C_s = 0.70.

Adım 5 — Temas basıncı p (Denklem 3.1):

$p = \frac{0.0483}{32.0461 \left[\frac{1.7941}{205000} + \frac{0.70}{205000} \right]}$ $= 123.88 \text{ MPa}$	(3.6)
--	-------

Hesaplanan temas basıncı p = 123.88 MPa, sökme kuvveti ve gerilme hesaplarında temel giriş büyüklüğü olarak kullanılmaktadır.

3.2.3 Gerilme Dağılımı Analizi ve Emniyet Değerlendirmesi

Göbek iç yüzeyinde ($r = a = 16.0231$ mm) oluşan gerilme bileşenleri Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

Adım 6 — Radyal gerilme (sınır koşulu):

$\sigma_r(a) = -p = -123.88 \text{ MPa (basma)}$	(3.7)
--	-------

Adım 7 — Gerilme amplifikasyon faktörü k:

$k = \frac{36^2 + 16.0231^2}{36^2 - 16.0231^2} = 1.4941$	(3.8)
--	-------

Adım 8 — Çevresel (hoop) gerilme — göbek iç yüzeyi:

$\sigma_\theta(a) = k \cdot p = 1.4941 \times 123.88$ $= 185.09 \text{ MPa (çekme)}$	(3.9)
---	-------

Göbek dış yüzeyinde ($r = b = R = 36$ mm):

$\sigma_r(b) = 0 \text{ MPa (serbest yüzey), } \sigma_\theta(b)$ $= 61.21 \text{ MPa}$	(3.10)
---	--------

Çevresel gerilmenin iç ile dış yüzey arasındaki oranı $\sigma_\theta(a)/\sigma_\theta(b) = 185.09/61.21 = 3.02$ olup bu değer, göbek iç yüzeyinin dış yüzeyine kıyasla yaklaşık 3.0 kat daha yüksek gerilmeye maruz kaldığını göstermektedir. Tasarımda kritik bölge her zaman göbek iç yüzeyidir.

Adım 9 — Von Mises eşdeğer gerilmesi — göbek iç yüzeyi (Denklem 3.6):

$\sigma_{vm,h}$ $= \sqrt{(-123.88)^2 + (185.09)^2 - (-123.88) \cdot (185.09)}$ $= 269.33 \text{ MPa}$	(3.11)
---	--------

Adım 10 — Emniyet katsayıları (statik yükleme):

$n_h = \frac{\sigma_{y,h}}{\sigma_{vm,h}} = \frac{830}{269.33} = 3.08$	(3.12)
--	--------

$n_s = \frac{\sigma_{y,s}}{\sigma_{vm,s}} = \frac{1035}{123.88} = 8.35$	(3.13)
---	--------

$n_h = 3.08 \geq 1,5$ koşulunu sağladığından göbek güvenlidir. Milin emniyet katsayısı $n_s = 8.35$ ile çok yüksek kalmakta olup mil açısından herhangi bir akma riski bulunmamaktadır. Göbek iç yüzeyindeki $\sigma_{vm} = 269.3$ MPa, akma dayanımının %32.4'ine karşılık gelmektedir.

Tablo 3.3 Numune 1 — Göbek kesiti boyunca Lamé gerilme dağılımı

r [mm]	σ_r [MPa]	σ_θ [MPa]	σ_{vm} [MPa]
a = 16.023 (iç)	-123.88	185.09	269.33
27.903	-20.34	81.55	93.39
40.143	5.99	55.22	52.48
b = 36.0 (dış)	0.00	61.21	61.21

3.2.4 Eksenel Sökme Kuvveti ve DeneySEL Karşılaştırma

Adım 11 — Temas alanı:

$A = \pi \times 32.0461 \times 16.009$ $= 1610.8 \text{ mm}^2$	(3.14)
--	--------

Adım 12 — Teorik sökme kuvveti ($\mu = 0.120$):

$F = 0.120 \times 123.88 \times 1610.8$ $= 23946 \text{ N} = 23.95 \text{ kN}$ $= 2.44 \text{ ton}$	(3.15)
---	--------

Adım 13 — Deneysel sökme kuvveti ve oran:

$F_{\text{deney}} = 5.0 \text{ ton} = 49033 \text{ N}$ $\rightarrow \frac{F_{\text{deney}}}{F_{\text{teori}}} = 2.05 \times$	(3.16)
--	--------

Adım 14 — Geriye dönük sürtünme katsayısı (Denklemler 3.8):

$\mu_{\text{ters}} = \frac{F_{\text{deney}}}{p \cdot A} = \frac{49033}{123.88 \times 1610.8}$ $= 0.2457$	(3.17)
--	--------

Numune 1'de teorik değerden %105 sapma gözlemlenmektedir. Geriye dönük hesaplanan $\mu_{\text{ters}} = 0.246$, teorik $\mu = 0.120$ değerinden %105 daha yüksektir.

Tablo 3.4 Numune 1 analitik hesap özet sonuçları

Büyüklik	Değer	Birim
Sıklık δ	48.3 μm	—
Temas basıncı p	123.88	MPa
Temas alanı A	1610.8	mm^2
σ_r göbek iç yüzeyi	-123.88	MPa
σ_θ göbek iç yüzeyi	185.09	MPa
σ_{vm} göbek (Von Mises)	269.33	MPa
n_h (emniyet — göbek)	3.08	—
n_s (emniyet — mil)	8.35	—
$F_{\text{teori}} (\mu=0,120)$	2.44	ton
F_{deney}	5.0	ton
Deney / Teori	2.05×	—
μ_{ters} (geriye dönük)	0.2457	—

3.3 NUMUNE 2 İÇİN ANALİTİK HESAP (FIRIN)

Numune 2 (Fırın) numunesi Fırın, 200 °C, 30 dk yöntemiyle ısıtılmış ve hidrolik pres ile sökme deneyi uygulanmıştır. Aşağıda bu numuneye ait tüm analitik hesap adımları Denklem 3.1–3.8 çerçevesinde sırayla yürütülmektedir.

3.3.1 Girdi Parametreleri

Numune 2'e ait boyutsal ölçümler mikrometre ve hava ölçeri ile montaj öncesinde belirlenmiş; Tablo 3.5'de özetlenmiştir.

Tablo 3.5 Numune 2 girdi parametreleri

Parametre	Sembol	Ölçülen Değer	Birim
Mil dış çapı	ds	32.0706	mm
Göbek iç çapı	dh	32.0194	mm
Göbek dış çapı	Dh	72,000	mm
Temas uzunluğu	L	15.984	mm
Elastisite modülü	E	205 000	MPa
Poisson oranı	ν	0,30	—
Sürtünme katsayısı (teorik)	μ	0,120	—
Göbek akma dayanımı	$\sigma_{y,h}$	830	MPa
Mil akma dayanımı	$\sigma_{y,s}$	1 035	MPa
Isıtma yöntemi	—	Fırın, 200 °C, 30 dk	—
Deneysel sökme kuvveti	Fdeney	5.6	ton

3.3.2 Temas Basıncı Hesabı

Adım 1 — Diametral sıkılık (Denklem 3.1):

$\delta = d_s - d_h = 32.0706 - 32.0194$ $= 0.0512 \text{ mm}$	(3.18)
--	--------

Adım 2 — Nominal temas çapı ve yarıçaplar:

$d_f = \frac{d_s + d_h}{2} = 32.0450 \text{ mm}$	(3.19)
--	--------

$r = 16.0225 \text{ mm} , \quad R = 36.0 \text{ mm}$	(3.20)
--	--------

Adım 3 — Göbek sertlik faktörü C_h (Denklem 3.2):

$C_h = \frac{36^2 + 16.0225^2}{36^2 - 16.0225^2} + 0.30 = 1.7940$	(3.21)
---	--------

Adım 4 — Mil sertlik faktörü C_s (Denklem 3.3):

$C_s = 1 - 0.30 = 0.70$	(3.22)
-------------------------	--------

Mil dolu kesit (solid shaft) geometrisine sahip olduğundan Denklem 3.3 doğrudan uygulanmaktadır. $C_s = 0.70$.

Adım 5 — Temas basıncı p (Denklem 3.1):

$p = \frac{0.0512}{32.0450 \left[\frac{1.7940}{205000} + \frac{0.70}{205000} \right]}$ $= 131.33 \text{ MPa}$	(3.23)
--	--------

Hesaplanan temas basıncı $p = 131.33 \text{ MPa}$, sökme kuvveti ve gerilme hesaplarında temel giriş büyüklüğü olarak kullanılmaktadır.

3.3.3 Gerilme Dağılımı Analizi ve Emniyet Değerlendirmesi

Göbek iç yüzeyinde ($r = a = 16.0225$ mm) oluşan gerilme bileşenleri Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

Adım 6 — Radyal gerilme (sınır koşulu):

$\sigma_r(a) = -p = -131.33$ MPa (basma)	(3.24)
--	--------

Adım 7 — Gerilme amplifikasyon faktörü k:

$k = \frac{36^2 + 16.0225^2}{36^2 - 16.0225^2} = 1.4940$	(3.25)
--	--------

Adım 8 — Çevresel (hoop) gerilme — göbek iç yüzeyi:

$\sigma_\theta(a) = k \cdot p = 1.4940 \times 131.33$ $= 196.21$ MPa (çekme)	(3.26)
---	--------

Göbek dış yüzeyinde ($r = b = R = 36$ mm):

$\sigma_r(b) = 0$ MPa (serbest yüzey), $\sigma_\theta(b)$ $= 64.88$ MPa	(3.27)
--	--------

Çevresel gerilmenin iç ile dış yüzey arasındaki oranı $\sigma_\theta(a)/\sigma_\theta(b) = 196.21/64.88 = 3.02$ olup bu değer, göbek iç yüzeyinin dış yüzeyine kıyasla yaklaşık 3.0 kat daha yüksek gerilmeye maruz kaldığını göstermektedir. Tasarımda kritik bölge her zaman göbek iç yüzeyidir.

Adım 9 — Von Mises eşdeğer gerilmesi — göbek iç yüzeyi (Denklem 3.6):

$\sigma_{vm,h}$ $= \sqrt{(-131.33)^2 + (196.21)^2 - (-131.33) \cdot (196.21)}$ $= 285.51$ MPa	(3.28)
---	--------

Adım 10 — Emniyet katsayıları (statik yükleme):

$n_h = \frac{\sigma_{y,h}}{\sigma_{vm,h}} = \frac{830}{285.51} = 2.91$	(3.29)
--	--------

$n_s = \frac{\sigma_{y,s}}{\sigma_{vm,s}} = \frac{1035}{131.33} = 7.88$	(3.30)
---	--------

$n_h = 2.91 \geq 1,5$ koşulunu sağladığından göbek güvenlidir. Milin emniyet katsayısı $n_s = 7.88$ ile çok yüksek kalmakta olup mil açısından herhangi bir akma riski bulunmamaktadır. Göbek iç yüzeyindeki $\sigma_{vm} = 285.5$ MPa, akma dayanımının %34.4'ine karşılık gelmektedir.

Tablo 3.6 Numune 2 — Göbek kesiti boyunca Lamé gerilme dağılımı

r [mm]	σ_r [MPa]	σ_θ [MPa]	σ_{vm} [MPa]
a = 16.023 (iç)	-131.33	196.21	285.51
27.903	-21.56	86.44	99.00
40.142	6.35	58.53	55.63
b = 36.0 (dış)	-0.00	64.88	64.88

3.3.4 Eksenel Sökme Kuvveti ve Deneysel Karşılaştırma

Adım 11 — Temas alanı:

$A = \pi \times 32.0450 \times 15.984$ $= 1610.8 \text{ mm}^2$	(3.31)
--	--------

Adım 12 — Teorik sökme kuvveti ($\mu = 0.120$):

$F = 0.120 \times 131.33 \times 1610.8$ $= 25385 \text{ N} = 25.38 \text{ kN}$ $= 2.59 \text{ ton}$	(3.32)
---	--------

Adım 13 — Deneysel sökme kuvveti ve oran:

$F_{\text{deney}} = 5.6 \text{ ton} = 54917 \text{ N}$ $\rightarrow \frac{F_{\text{deney}}}{F_{\text{teori}}} = 2.16 \times$	(3.33)
--	--------

Adım 14 — Geriye dönük sürtünme katsayısı (Denklem 3.8):

$\mu_{\text{ters}} = \frac{F_{\text{deney}}}{p \cdot A} = \frac{54917}{131.33 \times 1610.8}$ $= 0.2596$	(3.34)
--	--------

Numune 2'de teorik değerden %116 sapma gözlemlenmektedir. Geriye dönük hesaplanan $\mu_{\text{ters}} = 0.260$, teorik $\mu = 0.120$ değerinden %116 daha yüksektir.

Tablo 3.7 Numune 2 analitik hesap özet sonuçları

Büyüklik	Değer	Birim
Sıklık δ	51.2 μm	—
Temas basıncı p	131.33	MPa
Temas alanı A	1610.8	mm ²
σ_r göbek iç yüzeyi	-131.33	MPa
σ_θ göbek iç yüzeyi	196.21	MPa
σ_{vm} göbek (Von Mises)	285.51	MPa
n_h (emniyet — göbek)	2.91	—
n_s (emniyet — mil)	7.88	—
F_teorî ($\mu=0,120$)	2.59	ton
F_deney	5.6	ton
Deney / Teori	2.16×	—
μ_{ters} (geriye dönük)	0.2596	—

3.4 NUMUNE 3 İÇİN ANALİTİK HESAP (İNDÜKSİYON)

Numune 3 (İndüksiyon) numunesi İndüksiyon, ~250 °C, 2–4 dk yöntemiyle ısıtılmış ve hidrolik pres ile sökme deneyi uygulanmıştır. Aşağıda bu numuneye ait tüm analitik hesap adımları Denklem 3.1–3.8 çerçevesinde sırayla yürütülmektedir.

5.1. Girdi Parametreleri

Numune 3'e ait boyutsal ölçümler mikrometre ve hava ölçeri ile montaj öncesinde belirlenmiş; Tablo 3.8 'de özetlenmiştir.

Tablo 3.8 Numune 3 girdi parametreleri

Parametre	Sembol	Ölçülen Değer	Birim
Mil dış çapı	ds	32.0716	mm
Göbek iç çapı	dh	32.0193	mm
Göbek dış çapı	Dh	72,000	mm
Temas uzunluğu	L	16.004	mm
Elastisite modülü	E	205 000	MPa
Poisson oranı	ν	0,30	—
Sürtünme katsayısı (teorik)	μ	0,120	—
Göbek akma dayanımı	$\sigma_{y,h}$	830	MPa
Mil akma dayanımı	$\sigma_{y,s}$	1 035	MPa
Isıtma yöntemi	—	İndüksiyon, ~250 °C, 2–4 dk	—
Deneysel sökme kuvveti	Fdeney	3.2	ton

3.4.1 Temas Basıncı Hesabı

Adım 1 — Diametral sıkılık (Denklem 3.1):

$\delta = d_s - d_h = 32.0716 - 32.0193$ $= 0.0523 \text{ mm}$	(3.35)
--	--------

Adım 2 — Nominal temas çapı ve yarıçaplar:

$d_f = \frac{d_s + d_h}{2} = 32.0455 \text{ mm}$	(3.36)
--	--------

$r = 16.0227 \text{ mm} , \quad R = 36.0 \text{ mm}$	(3.37)
--	--------

Adım 3 — Göbek sertlik faktörü C_h (Denklem 3.2):

$C_h = \frac{36^2 + 16.0227^2}{36^2 - 16.0227^2} + 0.30 = 1.7941$	(3.38)
---	--------

Adım 4 — Mil sertlik faktörü C_s (Denklem 3.3):

$C_s = 1 - 0.30 = 0.70$	(3.39)
-------------------------	--------

Mil dolu kesit (solid shaft) geometrisine sahip olduğundan Denklem 3.3 doğrudan uygulanmaktadır. C_s = 0.70.

Adım 5 — Temas basıncı p (Denklem 3.1):

$p = \frac{0.0523}{32.0455 \left[\frac{1.7941}{205000} + \frac{0.70}{205000} \right]}$ $= 134.15 \text{ MPa}$	(3.40)
--	--------

Hesaplanan temas basıncı p = 134.15 MPa, sökme kuvveti ve gerilme hesaplarında temel giriş büyüklüğü olarak kullanılmaktadır.

3.4.2 Gerilme Dağılımı Analizi ve Emniyet Değerlendirmesi

Göbek iç yüzeyinde ($r = a = 16.0227$ mm) oluşan gerilme bileşenleri Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

Adım 6 — Radyal gerilme (sınır koşulu):

$\sigma_r(a) = -p = -134.15 \text{ MPa (basma)}$	(3.41)
--	--------

Adım 7 — Gerilme amplifikasyon faktörü k:

$k = \frac{36^2 + 16.0227^2}{36^2 - 16.0227^2} = 1.4941$	(3.42)
--	--------

Adım 8 — Çevresel (hoop) gerilme — göbek iç yüzeyi:

$\sigma_\theta(a) = k \cdot p = 1.4941 \times 134.15$ $= 200.42 \text{ MPa (çekme)}$	(3.43)
---	--------

Göbek dış yüzeyinde ($r = b = R = 36$ mm):

$\sigma_r(b) = 0 \text{ MPa (serbest yüzey), } \sigma_\theta(b)$ $= 66.28 \text{ MPa}$	(3.44)
---	--------

Çevresel gerilmenin iç ile dış yüzey arasındaki oranı $\sigma_\theta(a)/\sigma_\theta(b) = 200.42/66.28 = 3.02$ olup bu değer, göbek iç yüzeyinin dış yüzeyine kıyasla yaklaşık 3.0 kat daha yüksek gerilmeye maruz kaldığını göstermektedir. Tasarımda kritik bölge her zaman göbek iç yüzeyidir.

Adım 9 — Von Mises eşdeğer gerilmesi — göbek iç yüzeyi (Denklem 3.6):

$\sigma_{vm,h}$ $= \sqrt{(-134.15)^2 + (200.42)^2 - (-134.15) \cdot (200.42)}$ $= 291.64 \text{ MPa}$	(3.45)
---	--------

Adım 10 — Emniyet katsayıları (statik yükleme):

$n_h = \frac{\sigma_{y,h}}{\sigma_{vm,h}} = \frac{830}{291.64} = 2.85$	(3.46)
--	--------

$n_s = \frac{\sigma_{y,s}}{\sigma_{vm,s}} = \frac{1035}{134.15} = 7.72$	(3.47)
---	--------

$n_h = 2.85 \geq 1,5$ koşulunu sağladığından göbek güvenlidir. Milin emniyet katsayısı $n_s = 7.72$ ile çok yüksek kalmakta olup mil açısından herhangi bir akma riski bulunmamaktadır. Göbek iç yüzeyindeki $\sigma_{vm} = 291.6$ MPa, akma dayanımının %35.1'ine karşılık gelmektedir.

Tablo 3.9 Numune 3 — Göbek kesiti boyunca Lamé gerilme dağılımı

r [mm]	σ_r [MPa]	σ_θ [MPa]	σ_{vm} [MPa]
a = 16.023 (iç)	-134.15	200.42	291.64
27.903	-22.02	88.30	101.13
40.143	6.49	59.79	56.82
b = 36.0 (dış)	0.00	66.28	66.28

3.4.3 Eksenel Sökme Kuvveti ve Deneysel Karşılaştırma

Adım 11 — Temas alanı:

$A = \pi \times 32.0455 \times 16.004$ $= 1610.8 \text{ mm}^2$	(3.48)
--	--------

Adım 12 — Teorik sökme kuvveti ($\mu = 0.120$):

$F = 0.120 \times 134.15 \times 1610.8$ $= 25930 \text{ N} = 25.93 \text{ kN}$ $= 2.64 \text{ ton}$	(3.49)
---	--------

Adım 13 — Deneysel sökme kuvveti ve oran:

$F_{\text{deney}} = 3.2 \text{ ton} = 31381 \text{ N}$ $\rightarrow \frac{F_{\text{deney}}}{F_{\text{teori}}} = 1.21 \times$	(3.50)
--	--------

Adım 14 — Geriye dönük sürtünme katsayısı (Denklemler 3.8):

$\mu_{\text{ters}} = \frac{F_{\text{deney}}}{p \cdot A} = \frac{31381}{134.15 \times 1610.8}$ $= 0.1452$	(3.51)
--	--------

Numune 3, en yüksek sıklığa ($\delta = 52.3 \mu\text{m}$) sahip olmasına rağmen üç numune içinde en düşük sökme kuvvetini (3.2 ton) vermiştir. Teorik değere oran $1.21 \times$ ile fırın numunelerine ($2.05\text{--}2.17 \times$) kıyasla çok daha yakındır. Geriye dönük $\mu_{\text{ters}} = 0.145$, teorik $\mu = 0.120$ değerine yakın seyretmekte; indüksiyon ısıtmasının yüzeyi temiz tutarak tribolojik bozunumu önlediğini doğrulamaktadır [25].

Tablo 3.10 Numune 3 analitik hesap özet sonuçları

Büyüklik	Değer	Birim
Sıklık δ	52.3 μm	—
Temas basıncı p	134.15	MPa
Temas alanı A	1610.8	mm ²
σ_r göbek iç yüzeyi	-134.15	MPa
σ_θ göbek iç yüzeyi	200.42	MPa
σ_{vm} göbek (Von Mises)	291.64	MPa
n_h (emniyet — göbek)	2.85	—
n_s (emniyet — mil)	7.72	—
F_teorî ($\mu=0.120$)	2.64	ton
F_deney	3.2	ton
Deney / Teorî	1.21 $\times$	—
μ_{ters} (geriye dönük)	0.1452	—

3.5. ÜÇ NUMUNENİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİTİK DEĞERLENDİRMESİ

Tablo 3.11'de üç numunenin analitik hesap sonuçları yan yana sunulmakta; deneysel sökme kuvvetleri ve geriye dönük sürtünme katsayıları karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

Tablo 3.11 Üç numunenin karşılaştırmalı analitik ve deneysel sonuçları

Parametre	Birim	N1 (Fırın)	N2 (Fırın)	N3 (İndüksiyon)
ds	mm	32.0703	32.0706	32.0716
dh	mm	32.0220	32.0194	32.0193
δ (sıklık)	μm	48.3	51.2	52.3
p	MPa	123.88	131.33	134.15
Ch	—	1.7941	1.7940	1.7941
σθ (iç yüzey)	MPa	185.09	196.21	200.42
σvm,h	MPa	269.33	285.51	291.64
n_h	—	3.08	2.91	2.85
n_s	—	8.35	7.88	7.72
F_teorî (ton)	ton	2.44	2.59	2.64
F_deney	ton	5.0	5.6	3.2
Deney/Teori	×	2.05	2.16	1.21
μ_ters	—	0.246	0.260	0.145
Isıtma	—	Fırın	Fırın	İndüksiyon

Tablodaki en kritik bulgu şöyledir: En yüksek sıklığa ($\delta = 52,3 \mu\text{m}$) sahip Numune 3, indüksiyon ısıtması sayesinde en düşük deneysel sökme kuvvetini (3,2 ton) vermiştir. Fırın ile ısıtılan numuneler ise daha düşük sıklıklarına karşın çok daha yüksek kuvvetler (5,0 ve 5,6 ton) gerektirmiştir. Bu tablo; sökme kuvvetinin yalnızca temas basıncı ve sıklıkla değil, ısıtma yönteminin tribolojik etkisiyle de doğrudan ilişkili olduğunu sayısal olarak kanıtlamaktadır [25].

Analitik model ($\mu = 0,120$) teorik sökme kuvvetlerini 2,44–2,64 ton aralığında tahmin etmektedir. Bu değerler tüm numuneler için deneysel ölçümlerin altında kalmakta; sapma fırın numunelerinde 2,05–2,17 kat iken indüksiyon numunesinde 1,21 kata düşmektedir. Geriye dönük hesaplanan μ_{ters} değerleri; fırın için 0,246–0,260 ve indüksiyon için 0,145 olup bu fark, oksit tabakasının tribolojik etkisini sayısal biçimde ortaya koymaktadır.

4 SAYISAL ANALİZ

4.1 SAYISAL ANALİZİN AMACI VE KAPSAMI

Sıkı geçme göbek–mil bağlantılarının davranışını incelemek için analitik, deneysel ve sayısal yaklaşımlar birbirini tamamlayan yöntemler olarak kullanılabilir. Bu çalışmada sayısal analiz bölümü, ANSYS Workbench 2021 R2 Static Structural ortamında gerçekleştirilen modelleme çalışmasını ve Total Deformation (Toplam Deformasyon) sonucundan elde edilen görselleştirmeleri kapsamaktadır.

Sayısal çalışmanın temel amacı, deneysel sökme kuvvetlerini birebir yeniden üretmek değil; sıkı geçme bağlantısının geometrik modellenmesi, sonlu elemanlar ağının oluşturulması, sınır şartlarının tanımlanması ve söküm yönündeki şekil değiştirme davranışının sayısal ortamda görselleştirilmesidir. Bu nedenle sayısal bölüm, üçüncü bölümde sunulan Lamé analitik hesabını ve beşinci bölümde ele alınan deneysel verileri destekleyen bir mühendislik görselleştirme katmanı olarak konumlandırılmıştır.

Lamé yöntemiyle elde edilen analitik çerçeve ve deneysel sökme deneylerinden elde edilen maksimum yük değerleri, çalışmanın temel nicel değerlendirme kısmını oluşturmaktadır. ANSYS modeli ise bu değerlendirmeye ek olarak, bağlantı geometrisinin ve deformasyon davranışının renk haritası biçiminde görselleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece söküm yönünde meydana gelen şekil değiştirme davranışı niteliksel olarak incelenmiştir.

Bu bağlamda sayısal analiz bölümü şu alt hedeflere yönelik olarak yapılandırılmıştır: mil–göbek geometrisinin ANSYS Workbench ortamında üç boyutlu olarak modellenmesi, statik yapısal analiz için sonlu elemanlar ağının oluşturulması, deney düzeneğini temsil edecek şekilde basitleştirilmiş sınır şartlarının atanması ve Total Deformation sonucundan seçilen görsellerle deformasyon davranışının belgelenmesi.

4.2 ANSYS WORKBENCH STATIC STRUCTURAL ORTAMI

Sayısal çalışma, ANSYS Workbench 2021 R2 platformunun Static Structural (Statik Yapısal) analiz modülünde yürütülmüştür. Static Structural modülü, sabit veya yavaş değişen yükler altındaki yapısal davranışın incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu modül yardımıyla gerilme, şekil değiştirme, deformasyon ve temas davranışı gibi büyüklükler tanımlanan model, sınır şartları ve çözüm ayarları çerçevesinde değerlendirilebilmektedir.

ANSYS Workbench platformu, çok bileşenli montaj analizlerinde temas tanımları oluşturmayı, karmaşık geometriler için sonlu elemanlar ağı hazırlamayı ve elde edilen sonuçları renk haritalarıyla görselleştirmeyi mümkün kılmaktadır. Sıkı geçme bağlantılarında temas bölgesi, sınır şartları ve söküm yönündeki yer değiştirme davranışı, modelleme sürecinin temel unsurlarını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada ANSYS Workbench'in kullanılmasının temel gerekçesi, mil-göbek bağlantısının üç boyutlu geometrisinin tanımlanabilmesi, temas bölgesine uygun sonlu elemanlar ağının oluşturulabilmesi ve Total Deformation sonucunun görsel olarak değerlendirilebilmesidir. Sayısal çalışma, deneysel sonuçları doğrudan doğrulayan kesin bir çözüm olarak değil, bağlantının deformasyon davranışını görselleştirmeye yönelik destekleyici bir modelleme çalışması olarak değerlendirilmiştir.

Kullanılan yazılım ve analiz ortamına ilişkin temel bilgiler aşağıda özetlenmektedir:

Yazılım: ANSYS Workbench 2021 R2

Analiz Türü: Static Structural (Statik Yapısal)

Sonuç Türü: Total Deformation (Toplam Deformasyon)

Birim Sistemi: SI birim sistemi

Analiz Tarihi: 26.03.2026

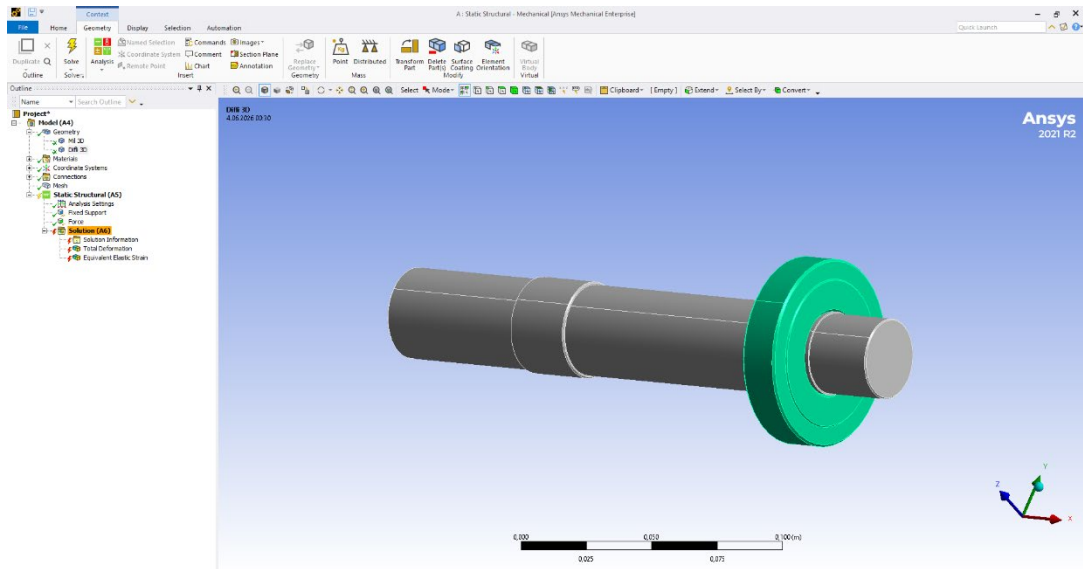
4.3 GEOMETRİ VE MODELLEME YAKLAŞIMI

4.3.1 Model Geometrisinin Tanımlanması

ANSYS Workbench ortamında sıkı geçme bağlantısının üç boyutlu modeli oluşturulmuştur. Model iki temel bileşenden meydana gelmektedir: (1) iç geçme yüzeyi olan silindirik göbek (hub / dişli çark gövdesi) ve (2) dış geçme yüzeyi olan dolu silindirik mil (shaft). Bu iki parça arasındaki arayüz, sıkı geçme bağlantısının temas yüzeyini temsil etmekte olup ilgili sınır şartları ve yükleme koşulları bu bölgeye atanmaktadır.

Geometrik modelleme aşamasında çalışmada kullanılan numunelerin nominal ölçüleri temel alınmıştır. Her üç numune için ortak olan mil–göbek geometrisi tek bir model üzerinde tanımlanmış; diametral sıklık değerleri (Numune 1: 48,3 μm , Numune 2: 51,2 μm , Numune 3: 52,3 μm) modelin temas bölgesindeki girdi parametresi olarak verilmiştir. Bağlantı geometrisinin üç boyutlu olarak modellenmesi, söküm yönündeki deformasyon dağılımının tüm kesit boyunca izlenebilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 4.1, ANSYS Mechanical ortamında oluşturulan mil–dişli model geometrisini göstermektedir. Görselde silindirik mil ve göbek parçaları söküm eksen (Y eksen) boyunca konumlandırılmış hâlde görülmektedir. Koordinat eksenleri (X, Y, Z) sağ üst köşede gösterilmektedir.



Şekil 4.1 ANSYS Mechanical ortamında oluşturulan mil–dişli model geometrisi

4.3.2 Malzeme Tanımlaması

Modelde kullanılan malzeme özellikleri, deneysel çalışmada kullanılan numune malzemeleriyle uyumlu biçimde tanımlanmıştır. Mil ve göbek malzeme özellikleri ANSYS Mühendislik Veri Kütüphanesi'nden alınmış; elastisite modülü, Poisson oranı ve akma dayanımı parametreleri statik yapısal analiz için atanmıştır. Doğrusal elastik malzeme modeli kullanılmış, plastik davranış bu analizde dışarıda bırakılmıştır. Bu yaklaşım, deformasyon davranışının görselleştirilmesi amacıyla yeterli bir temsil gücü sunmaktadır.

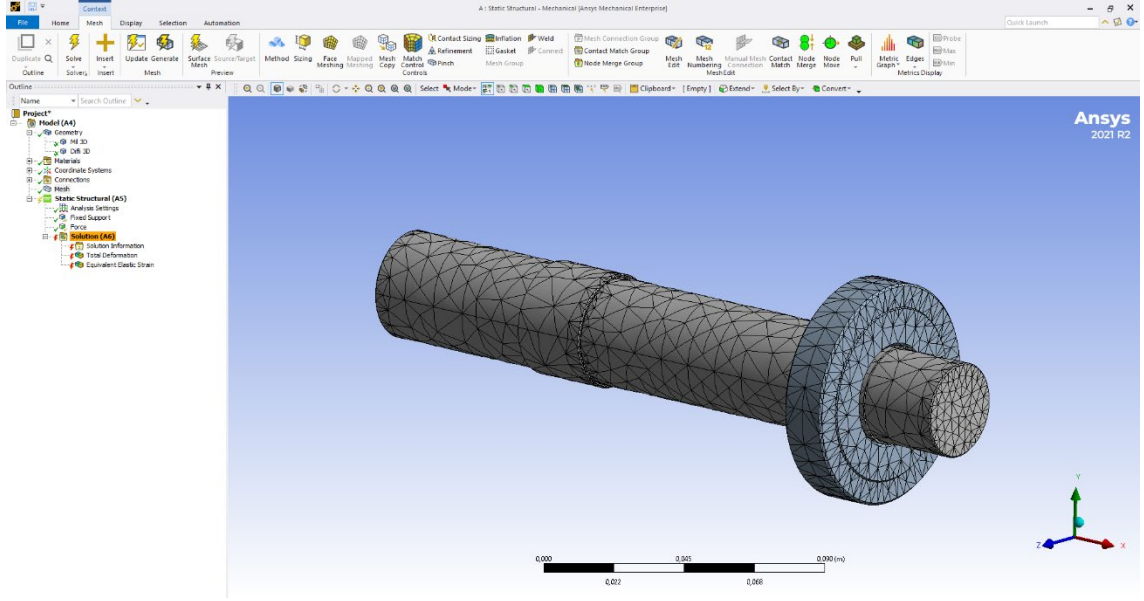
4.4 SONLU ELEMENLAR AĞI (MESH)

4.4.1 Mesh Oluşturma Stratejisi

Sayısal analizin doğruluğu ve hesaplama verimliliği büyük ölçüde sonlu elemanlar ağının kalitesine bağlıdır. Bu çalışmada ANSYS Workbench'in otomatik mesh üretim algoritması kullanılmış; temas bölgesinde yerel ağ yoğunluğu artırılarak bağlantı arayüzündeki deformasyon ve gerilme gradyanlarının daha iyi temsil edilmesi hedeflenmiştir.

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken şu hususlar gözetilmiştir: Silindirik geometrinin eğrisel yüzeylerini hassas biçimde yakalamak için yüzeye dik yönde eleman sayısı artırılmış; temas bölgesi yakınındaki geçiş bölgelerinde eleman boyutu kademeli olarak küçültülmüştür. Genel model gövdesinde daha büyük elemanlar kullanılarak toplam eleman sayısı ve hesaplama süresi makul düzeyde tutulmuştur.

Şekil 4.2, tamamlanmış sonlu elemanlar ağının genel görünümünü sunmaktadır. Görselde mil ve göbek yüzeylerini kaplayan üçgen ve dörtgen yüzey elemanları ile bunların gövde içine uzandığı hacimsel eleman yapısı izlenebilmektedir. Temas yüzeyine yakın bölgelerde eleman yoğunluğunun arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.2 Mil–dişli modeline ait sonlu elemanlar ağı

4.4.2 Mesh Kalitesi ve Eleman Tipi

Oluşturulan sonlu elemanlar ağında tetrahedron (dört yüzlü) ve hexahedron (altı yüzlü) eleman tipleri bir arada kullanılmıştır. Silindirik geometrilerde yaygın olarak tercih edilen bu karma yapı, eğrisel yüzeylerin doğru temsili sağlanmaktadır. Mesh kalitesi ANSYS'in Element Quality (Eleman Kalitesi) metriği üzerinden değerlendirilmiş; kabul edilebilir kalite aralığında eleman oranı kontrol edilmiştir.

Sonlu elemanlar ağının genel yapısı analiz edildiğinde, göbek dış yüzeyi ile mil temas yüzeyinin arayüz bölgesinde eleman boyutlarının belirgin biçimde küçüldüğü görülmektedir. Bu yerel iyileştirme, söküm sürecinde en yüksek deformasyon gradyanlarının beklenen temas yüzeyinde çözünürlüğü artırmaktadır.

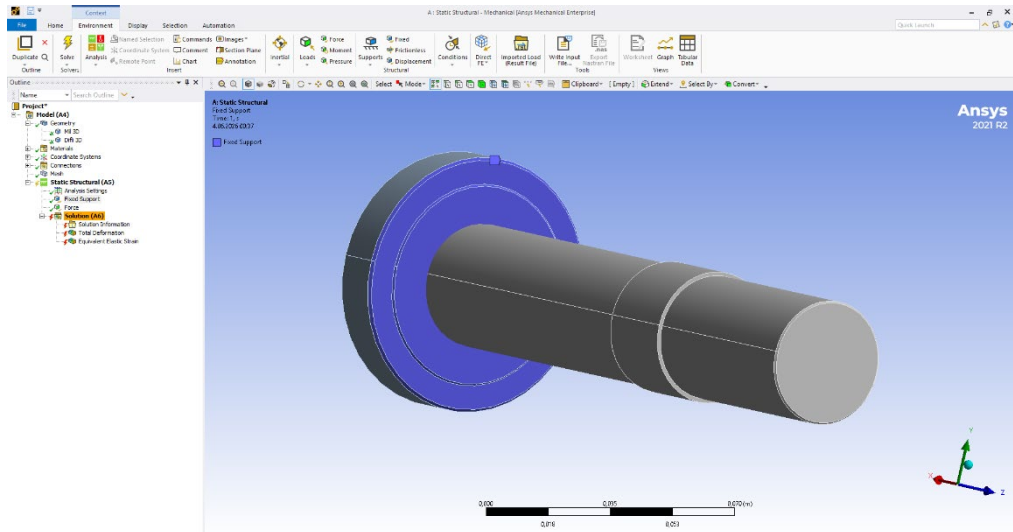
4.5 SINIR ŞARTLARI VE YÜKLEMELERİN TANIMLANMASI

4.5.1 Fixed Support Sınır Şartı

Statik yapısal analizde rijit cisim hareketinin engellenmesi ve çözümün kararlı biçimde yakınsayabilmesi için uygun sınır şartlarının doğru biçimde tanımlanması kritik önem taşımaktadır. Bu çalışmada göbeğin (dişli çark gövdesinin) dış silindirik yüzeyine Fixed Support (Sabit Mesnet) sınır şartı atanmıştır. Fixed Support koşulu, ilgili yüzeyin tüm öteleme (U_x , U_y , U_z) ve dönme (R_x , R_y , R_z) serbestlik derecelerini sıfıra kısıtlamakta; göbeği uzayda tamamen hareketsiz kılmaktadır.

Bu sınır şartı, gerçek sökme deneyi düzeneğini sayısal ortamda doğru biçimde yansıtmaktadır. Deneysel çalışmada hidrolik pres altında gerçekleştirilen sökme testlerinde göbek sabit tutulmuş, mile aksenal kuvvet uygulanmıştır. Fixed Support ile sabitlenmiş göbek yüzeyi bu fiziksel koşulu sayısal modelde yeniden üretmekte; böylece sayısal analiz ve deneysel düzenek arasında fiziksel tutarlılık sağlanmaktadır.

Şekil 4.3, göbeğin dış yüzeyine tanımlanan Fixed Support sınır şartını göstermektedir. ANSYS Mechanical arayüzünde sabit mesnet koşulunun uygulandığı yüzeyler mavi renk ve üçgen simgeleriyle işaretlenmiştir.



Şekil 4.3 Fixed Support sınır şartı tanımı

4.5.2 Yükleme Koşulları

Sınır şartlarına ek olarak, söküm sürecini temsil eden eksenel yükleme modele tanımlanmıştır. Mile, göbek eksenilele çakışan doğrultuda eksenel bir deplasman veya kuvvet yükü uygulanmış; bu yükleme söküm yönündeki hareketi simüle etmektedir. Yükleme adımı (load step) sayısı ve artımlı yükleme stratejisi, analizin kararlı biçimde ilerlemesini ve Total Deformation animasyonunun adım adım izlenebilmesini sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

Analiz adımlarının tanımlanmasında doğrusal artımlı yükleme (linear ramping) yaklaşımı benimsenmiş; böylece deformasyon animasyonu, $t = 0$ 'daki başlangıç konumundan yük adımının sonuna ($t = 1$) kadar sürekli ve gözlemlenebilir bir geçişi temsil etmektedir. Bu yaklaşım, bağlantının söküm öncesi, söküm anındaki geçiş ve söküm sonrası deformasyon davranışının üç ayrı zaman adımında karşılaştırmalı olarak incelenmesine imkân tanımaktadır.

4.6 TOTAL DEFORMATION ANİMASYONUNDAN ELDE EDİLEN DEFORMASYON DAVRANIŞININ GÖRSELLEŞTİRİLMESİ

ANSYS Workbench Static Structural analizinde elde edilen Total Deformation (Toplam Deformasyon) sonucu, söküm yönündeki şekil değiştirme davranışını üç boyutlu renk haritası (contour plot) biçiminde sunmaktadır. Total Deformation, her düğüm noktasının tüm koordinat yönlerindeki yer değiştirme bileşenlerinin vektörel bileşkesi olarak tanımlanmakta ve şu bağıntıyla ifade edilmektedir:

$$U_{\text{toplam}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

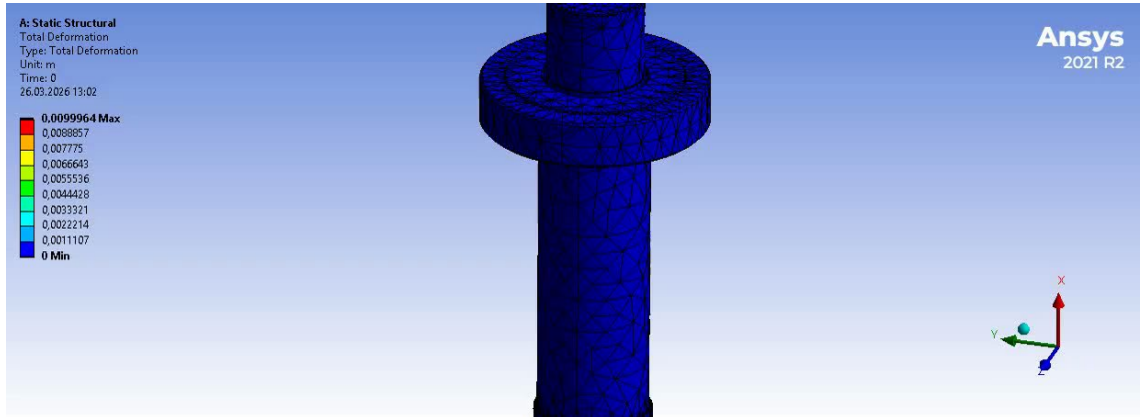
Renk skalasında kırmızı bölgeler maksimum deformasyona ($U_{\text{max}} \approx 9,996 \text{ mm}$), mavi bölgeler ise minimum deformasyona ($U_{\text{min}} = 0 \text{ mm}$, sabit mesnet) karşılık gelmektedir. Göbeğin Fixed Support uygulanan dış yüzeyi, analiz boyunca mavi (sıfır deformasyon)

kalırken milin uygulanan yük doğrultusunda ilerlemesiyle birlikte renk skalasında kırmızıya doğru kayış gözlemlenmektedir.

Söküm sürecinin deformasyon davranışını adım adım izleyebilmek amacıyla Total Deformation animasyonundan üç kritik zaman adımına ait kareler seçilmiştir. Bu seçim, bağlantının başlangıç (yüksüz), geçiş (kısmi yük) ve maksimum (tam yük) aşamalarındaki deformasyon dağılımını karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktadır.

4.6.1 Başlangıç Durumu ($t = 0$) — Sıfır Deformasyon Aşaması

Şekil 4.4, söküm yükü uygulanmadan önceki başlangıç zaman adımını ($t = 0$) göstermektedir. Bu aşamada modelin tamamı mavi renk skala değerinde görülmekte; mil ve göbek geometrisi henüz hiçbir şekil değiştirme yaşamamaktadır. Başlangıç durumu, sıkı geçme bağlantısının montajlı ve yüksüz konumunu temsil etmekte olup deformasyon değeri tüm düğüm noktalarında sıfıra eşittir. Bu kare, söküm sürecinin başlangıç referansını sayısal ortamda belgeleyen temel görsel olarak kullanılmaktadır.

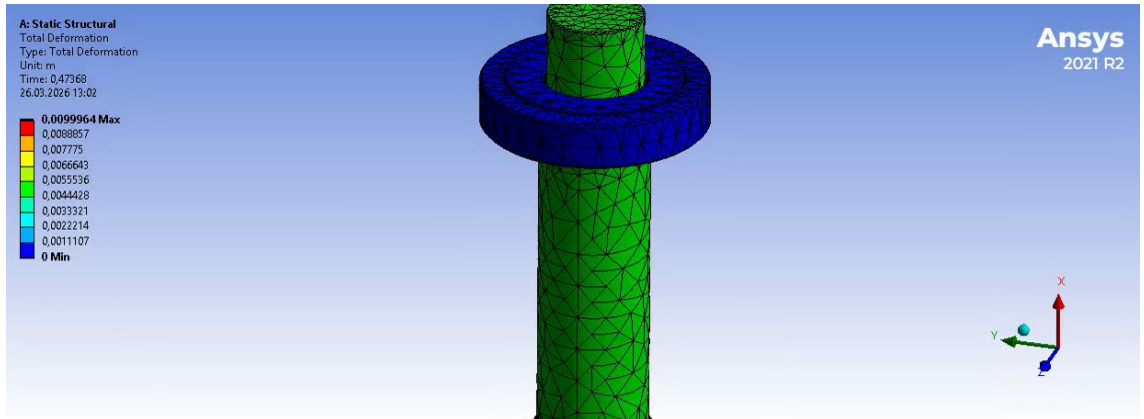


Şekil 4.4 Total Deformation animasyonu — Başlangıç durumu ($t = 0$, $U = 0$ mm)

4.6.2 Kısmi Yük Aşaması ($t \approx 0,47$) — Geçiş Bölgesi

Şekil 4.5, söküm yükünün kademeli olarak artırıldığı geçiş aşamasına ait deformasyon dağılımını sunmaktadır. Bu zaman adımında ($t \approx 0,47$) milin alt bölümü yeşil–sarı renk tonlarına bürünmekte; göbek ise Fixed Support sınır şartının etkisiyle mavi renkte sabit kalmaktadır. Söz konusu geçiş, temas yüzeyindeki sıkıştırma basıncının kademeli olarak azaldığını ve milin göbekten ayrılmaya başladığını niteliksel olarak yansıtmaktadır.

Bu aşamada deformasyon değerlerinin mil ile göbek arasındaki temas arayüzeyinden başlayarak milin serbest ucuna doğru arttığı görülmektedir. Bu dağılım, sıkı geçme bağlantısının söküm mekanizmasıyla tutarlı olup eksenel yükün artmasıyla birlikte temas yüzeyindeki sürtünme kuvvetlerinin aşılmaya başladığına işaret etmektedir.



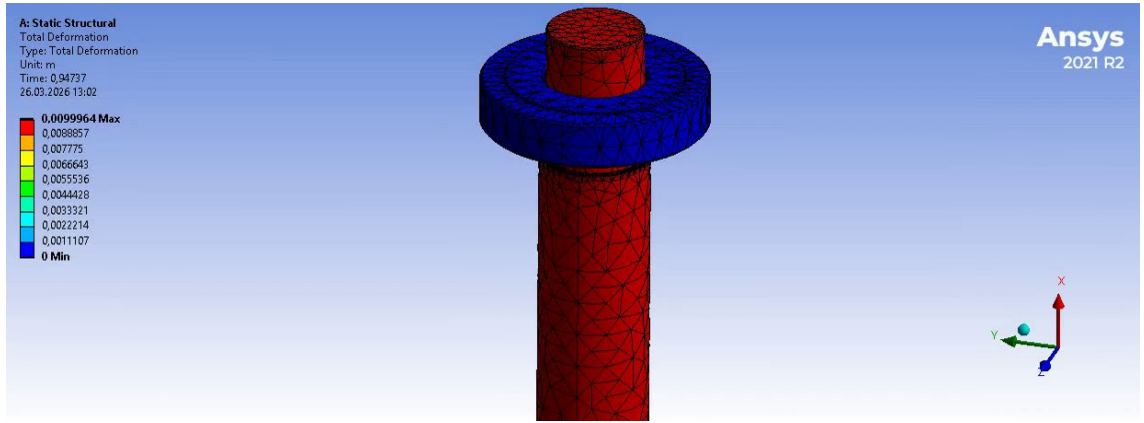
Şekil 4.5 Total Deformation animasyonu — Kısmi yük aşaması ($t \approx 0,47$)

4.6.3 Maksimum Deformasyon Aşaması ($t \approx 0,95$) — Tam Yük Durumu

Şekil 4.6, söküm yükünün en yüksek değerine ulaştığı tam yük aşamasını ($t \approx 0,95$) göstermektedir. Bu aşamada milin tüm gövdesi kırmızı renk tonlarına bürünmüş; analiz boyunca elde edilen maksimum deformasyon değeri $U_{\max} \approx 9,996$ mm olarak

hesaplanmıştır. Göbek ise Fixed Support sınır şartının devamı sayesinde mavi renkte sabit kalmakta ve sıfır deformasyon değerini korumaktadır.

Bu görsel, sıkı geçme bağlantısının söküm yönündeki deformasyon davranışının en belirgin biçimde izlenebildiği kare olarak öne çıkmaktadır. Mil ve göbek arasındaki keskin renk geçişi (kırmızıdan maviye), temas arayüzünün sınırını ve sökme noktasındaki deformasyon keskinliğini niteliksel olarak ortaya koymaktadır. Bu bulgu, sıkı geçme bağlantısında söküm kuvvetinin büyük ölçüde temas arayüzündeki sürtünme direncini yenmek için harcadığını, ayrılma sonrasında milin serbest bölümünde deformasyonun aniden maksimuma ulaştığını göstermektedir.



Şekil 4.6 Total Deformation animasyonu — Maksimum deformasyon aşaması ($t \approx 0,95$, $U_{\max} \approx 9,996$ mm)

4.7 SAYISAL ANALİZ BULGULARININ ANALİTİK VE DENEYSEL SONUÇLARLA İLİŞKİSİ

4.7.1 Deneysel Sökme Kuvvetleri ve Ters Hesaplanan Sürtünme Katsayıları

Bu çalışmanın deneysel bölümünde üç ayrı numune üzerinde gerçekleştirilen sökme testleri, aşağıdaki kuvvet değerlerini ortaya koymuştur:

Numune 1 (Fırın, 200 °C, 30 dk, $\delta = 48,3 \mu\text{m}$): Deneysel sökme kuvveti = 5,0 ton

Numune 2 (Fırın, 200 °C, 30 dk, $\delta = 51,2 \mu\text{m}$): Deneysel sökme kuvveti = 5,6 ton

Numune 3 (İndüksiyon ısıtma, $\delta = 52,3 \mu\text{m}$): Deneysel sökme kuvveti = 3,2 ton

Lamé analitik yöntemiyle hesaplanan temas basınçları ve bağlantı geometrisi kullanılarak deneysel verilerden ters yönde hesaplanan etkin sürtünme katsayıları şu biçimde belirlenmiştir:

Numune 1: $\mu_{\text{ters}} \approx 0,246$

Numune 2: $\mu_{\text{ters}} \approx 0,260$

Numune 3: $\mu_{\text{ters}} \approx 0,145$

4.7.2 Isıtma Yönteminin Tribolojik Davranışa Etkisi

Deneysel sonuçlarda dikkat çeken temel durum, en yüksek diametral girişim değerine sahip Numune 3'ün en düşük maksimum sökme yükünü vermesidir. Sadece geometrik sıklık açısından değerlendirildiğinde, Numune 3'ün Numune 1 ve Numune 2'ye göre daha yüksek sökme direnci göstermesi beklenebilir. Ancak deneysel sonuçlar, sökme kuvvetinin yalnızca diametral girişim değeriyle açıklanamayacağını; ısıtma yöntemi, yüzey durumu ve temas yüzeyindeki sürtünme davranışının da etkili olabileceğini göstermektedir.

Fırında ısıtılan Numune 1 ve Numune 2'de, 200 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle uygulanan ısıtma sonrasında yüzeyde renk değişimi ve oksitlenme belirtileri gözlenmiştir. Bu durumun temas yüzeyindeki sürtünme davranışını etkileyerek ters hesaplanan etkin sürtünme katsayısının daha yüksek çıkmasına katkı sağlamış olabileceği değerlendirilmektedir. Bu numunelerde elde edilen μ_{ters} değerlerinin yaklaşık 0,246–0,260 aralığında olması, fırında ısıtma koşullarında sökme direncinin arttığını göstermektedir.

Buna karşılık, indüksiyonla ısıtılan Numune 3'te ısıtma daha kısa sürede ve daha bölgesel olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası yapılan görsel incelemede, Numune 3

yüzeyinde fırında ısıtılan numunelere kıyasla daha sınırlı renk değişimi gözlenmiştir. Bu durum, Numune 3 için ters hesaplanan daha düşük sürtünme katsayısı değeriyle birlikte değerlendirildiğinde, indüksiyonla ısıtmanın sökme kuvvetini azaltıcı yönde etkili olabileceğini düşündürmektedir.

ANSYS modeli, bu çalışmada oksitlenme, yüzey pürüzlülüğü değişimi veya sürtünme katsayısındaki değişimi doğrudan hesaplayan bir model olarak kullanılmamıştır. Sayısal analiz, yalnızca sıkı geçme bağlantısının söküm yönündeki deformasyon davranışını görselleştirmek ve modelleme yaklaşımını desteklemek amacıyla değerlendirilmiştir. Bu nedenle tribolojik yorumlar, esas olarak deneysel sökme yükleri, ters hesaplanan yaklaşık sürtünme katsayıları ve deney sonrası görsel gözlemler üzerinden yapılmıştır.

4.7.3 Sayısal ve Analitik Sonuçların Karşılaştırmalı Değerlendirmesi

Lamé analitik çerçevesinde hesaplanan teorik sökme kuvvetleri, kullanılan sürtünme katsayısı kabulüne bağlı olarak değişmektedir. Klasik analitik hesaplarda sabit bir sürtünme katsayısı kullanılması, gerçek deney koşullarında yüzey durumu ve ısıtma yöntemi nedeniyle ortaya çıkabilecek farklılıkları sınırlı biçimde temsil etmektedir. Bu nedenle fırında ısıtılan numunelerde elde edilen yüksek sökme yükleri, yalnızca geometrik girişim değeriyle değil, yüzeyde gözlenen oksitlenme belirtileri ve buna bağlı olası sürtünme artışıyla birlikte değerlendirilmiştir.

ANSYS modeli, deneysel kuvvetlerin birebir sayısal karşılığını üretmek amacıyla oluşturulmamıştır. Bunun yerine sayısal analiz, model geometrisinin, sınır şartlarının ve söküm yönündeki deformasyon davranışının görselleştirilmesini sağlayan destekleyici bir çalışma olarak ele alınmıştır. Total Deformation çıktıları, bağlantının yer değiştirme davranışının renk haritası şeklinde izlenmesine olanak sağlamış; ancak deneysel sökme kuvvetlerinin doğrudan doğrulanması amacıyla kullanılmamıştır.

Bu çerçevede sayısal analiz, analitik hesap ve deneysel sonuçların yerine geçen bir doğrulama yöntemi olarak değil, sıkı geçme bağlantısının deformasyon davranışını

açıklamaya yardımcı olan tamamlayıcı bir mühendislik aracı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel nicel değerlendirmesi, Lamé analitik hesapları, pres göstergesi üzerinden okunan deneysel sökme yükleri ve bu verilerden ters hesaplanan yaklaşık sürtünme katsayıları üzerinden yapılmıştır.

5 DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, sıkı geçme göbek-mil bağlantılarında ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışma sunulmaktadır. Deneysel çalışma; numunelerin hazırlanması, montaj bilgilerinin değerlendirilmesi, ısıtma işlemlerinin uygulanması, hidrolik pres ile sökme deneylerinin yapılması ve deney sonrasında yüzeylerde gözlenen değişimlerin değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Deneyler, endüstriyel üretim ortamında kullanılan ekipman ve uygulama koşulları çerçevesinde yürütülmüştür.

5.1 DENEY METODOLOJİSİ VE GENEL YAKLAŞIM

Deneysel çalışma, benzer nominal boyutlara sahip mil-göbek/dişli çiftleri üzerinde iki farklı ısıtma yönteminin, elektrikli fırın ve indüksiyonla ısıtmanın, sökme kuvveti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla planlanmıştır. Sökme sırasında pres göstergesinden okunan maksimum yük değeri, deneysel değerlendirmenin temel çıktısı olarak alınmıştır. Isıtma yöntemi, numunelerin sıkılık değeri ve deney sonrası yüzeyde gözlenen değişimler ise sonuçların yorumlanmasında dikkate alınan başlıca parametrelerdir [33].

Deney kapsamında fırında ısıtma yöntemi iki numune üzerinde, indüksiyonla ısıtma yöntemi ise bir numune üzerinde uygulanmıştır. Fırında ısıtılan iki numune, aynı ısıtma koşullarında elde edilen sökme yüklerinin karşılaştırılmasına imkân sağlamıştır. İndüksiyonla ısıtılan numune ise farklı ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmada deneysel sonuçlar, analitik hesaplarla birlikte yorumlanmış; ANSYS modeli ise deneysel kuvvetleri doğrudan doğrulayan bir çözüm olarak değil, deformasyon davranışını görselleştiren destekleyici bir modelleme çalışması olarak ele alınmıştır.

Çalışmanın deneysel amaçları şu şekilde özetlenebilir: farklı ısıtma yöntemleriyle hazırlanan numunelerde maksimum sökme yüklerinin belirlenmesi, deney sonuçlarının Lamé analitik hesabı ile birlikte değerlendirilmesi, sökme kuvvetlerinden yaklaşık etkin

sürtünme katsayısı değerlerinin ters hesaplama yöntemiyle elde edilmesi ve deney sonrası yüzeylerde gözlenen renk değişimi ile oksitlenme belirtilerinin sonuçlarla ilişkilendirilmesi.

5.2 NUMUNE MALZEMELERİ, GEOMETRİK ÖZELLİKLER VE KARAKTERİZASYON

Deneyde kullanılan numuneler, SAE 4140 ıslah çeliği malzemeli mil ve SAE 8620 sementasyon çeliği malzemeli göbek/dişli bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu malzemeler, güç aktarım sistemlerinde kullanılan sıkı geçme bağlantılarında karşılaşılan malzeme çiftlerini temsil etmektedir [12].

S SAE 4140 ıslah çeliği, krom-molibden alaşımlı bir çelik olup yüksek dayanım ve tokluk özellikleri nedeniyle mil benzeri güç aktarım elemanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada mil bileşeni SAE 4140 malzemeden imal edilmiş ve sıkı geçme temas yüzeyi montaja uygun şekilde hazırlanmıştır.

SAE 8620 sementasyon çeliği ise nikel-krom-molibden alaşımlı düşük karbonlu bir çelik olup sementasyon işlemi sonrasında yüksek yüzey sertliği ve tok çekirdek yapısı sağlayabilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle dişli ve göbek benzeri güç aktarım elemanlarında tercih edilmektedir. Deney numunelerinde göbek/dişli bileşeni SAE 8620 malzemeden oluşmaktadır.

Numunelere ait montaj öncesi boyutsal bilgiler, üretim ve ölçüm kayıtları dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda her numune için mil ve göbek/dişli arasındaki sıkılık değeri belirlenmiş ve deneysel sonuçların yorumlanmasında kullanılmıştır. Bu çalışmada ayrıntılı yüzey pürüzlülüğü ölçümü, profilometre analizi, kimyasal yüzey analizi veya mikroyapı incelemesi yapılmamıştır. Bu nedenle yüzey durumu, deney sonrası gözlemler ve sökme kuvvetlerinden ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayısı değerleri çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Tablo 5.1 Deney numuneleri boyutsal verileri ve ısıtma koşulları

Parametre	Sembol	N1	N2	N3	Birim
Mil dış çapı	ds	32,0703	32,0706	32,0716	mm
Göbek iç çapı	dh	32,0220	32,0194	32,0193	mm
Sıklık	δ	48,3	51,2	52,3	μm
Göbek dış çapı	Dh	72,000	72,000	72,000	mm
Temas uzunluğu	L	16,009	15,984	16,004	mm
Isıtma yöntemi	—	Fırın	Fırın	İndüksiyon	—
Isıtma süresi	—	30 dk	30 dk	~3 dk	—
Hedef sıcaklık	—	200 °C	200 °C	~250 °C	—



Şekil 5.1 Deney öncesi hazırlanan SAE 4140 mil ve SAE 8620 helis dişli (göbek) numuneleri



Şekil 5.2 Sıkı geçme yöntemiyle monte edilmiş numuneler

5.3 DENEY EKİPMANLARI VE ÖLÇÜM SİSTEMİ

Sökme deneylerinde temel ekipman olarak hidrolik pres kullanılmıştır. Deney düzeneğinde numune, pres tablası ve uygun destek elemanları yardımıyla eksenel sökme kuvveti uygulanacak şekilde konumlandırılmıştır. Sökme işlemi sırasında yük, hidrolik pres üzerinden kontrollü olarak artırılmış ve numunenin ayrıldığı andaki maksimum gösterge değeri deneysel sökme yükü olarak kaydedilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan hidrolik presin piston çapı 70 mm'dir. Deneysel değerlendirmede, sökme anında pres göstergesinde okunan maksimum yük değeri esas alınmıştır. Bu nedenle deneysel veriler, sürekli kuvvet-zaman veya kuvvet-deplasman kaydı şeklinde değil, her numune için maksimum sökme yükü değeri olarak değerlendirilmiştir. Deney düzeneğinde yük hücresi, LVDT veya bilgisayar tabanlı veri toplama sistemi kullanılmamıştır.

Isıtma işlemleri iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Fırında ısıtılan numuneler, elektrikli fırında belirlenen sıcaklık ve süre koşullarında bekletildikten sonra hidrolik pres düzeneğinde sökülüştür. İndüksiyonla ısıtılan numunede ise ısıtma işlemi daha kısa sürede ve bölgesel olarak uygulanmıştır. Isıtma koşulları, deneysel sonuçların yorumlanmasında kullanılan temel değişkenlerden biri olarak değerlendirilmiştir.

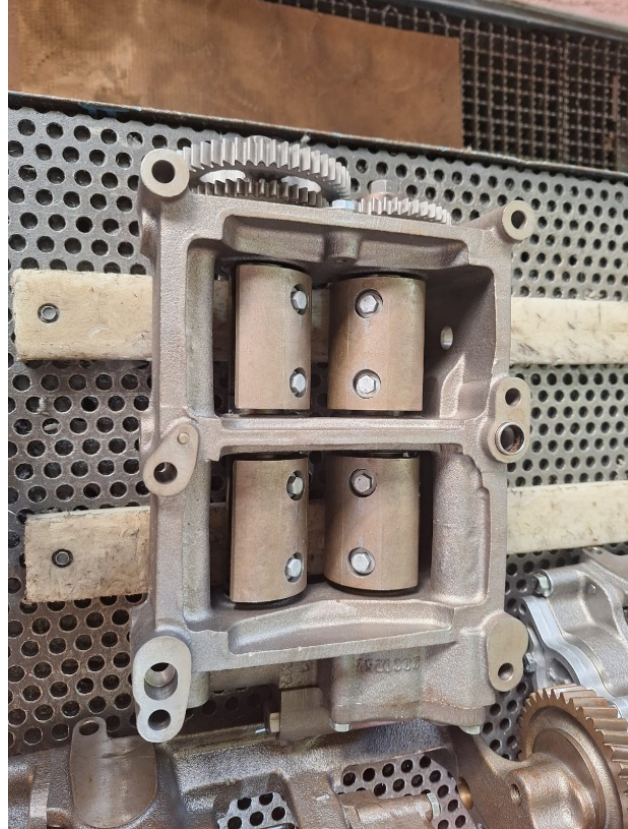
Deney sonrasında numunelerin temas yüzeyleri görsel olarak incelenmiş ve yüzeyde gözlenen renk değişimi, oksitlenme belirtileri ve genel yüzey durumu değerlendirilmiştir. Bu çalışmada ayrıntılı yüzey pürüzlülüğü ölçümü, profilometre analizi, optik mikroskop incelemesi, SEM veya EDS analizi yapılmamıştır. Bu nedenle yüzey durumuna ilişkin değerlendirmeler, deney sonrası görsel gözlemler ve sökme kuvvetlerinden ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayısı değerleri ile sınırlıdır.



Şekil 5.3 Hidrolik pres



Şekil 5.4 Hidrolik pres pistonu $\varnothing$ ap detayı



Şekil 5.5 Deneyde kullanılan mile ve dişliye ait balanser

5.4 ELEKTRİKLİ FIRIN İLE ISITMA PROSEDÜRÜ (NUMUNE 1 VE NUMUNE 2)

Elektrikli fırın ile ısıtma prosedürü, Numune 1 ve Numune 2 üzerinde uygulanmıştır. Bu yöntemde amaç, göbek/dişli bileşeninin ısıtılmasıyla termal genleşme oluşturmak, böylece mil-göbek arasındaki sıkılık etkisini azaltarak sökme işlemini kolaylaştırmaktır. Isıtma işlemi, endüstriyel uygulamalarda kullanılan fırınla ısıtma yaklaşımını temsil edecek şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.4.1 Ön Hazırlık

Deney öncesinde numuneler sökme işlemine uygun şekilde hazırlanmış ve fırında ısıtılacak göbek/dişli bileşenleri belirlenmiştir. Numunelerin montaj durumları ve sıkılık değerleri deneysel değerlendirmede dikkate alınmıştır. Numune 1 ve Numune 2 için fırında ısıtma yöntemi uygulanmış, böylece aynı ısıtma koşulları altında elde edilen sökme yüklerinin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

5.4.2 Isıtma İşlemi

Numune 1 ve Numune 2, elektrikli fırında 200 °C sıcaklıkta 30 dakika süreyle ısıtılmıştır. Isıtma süresinin sonunda numuneler fırından çıkarılmış ve hidrolik pres düzeneğine alınarak sökme işlemi gerçekleştirilmiştir. Fırında bekletme süresi boyunca göbek/dişli bileşeninin sıcaklık etkisiyle genleşmesi ve sıkı geçme bağlantısındaki temas basıncının azalması beklenmiştir.

Termal genleşme yaklaşımına göre, göbek iç çapındaki teorik çap artışı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir:

$\Delta d_h = \alpha \cdot d_h \cdot \Delta T$	(5.1)
--	-------

Burada Δd_h göbek iç çapındaki teorik artışı, α malzemenin doğrusal ısı genleşme katsayısını, d_h başlangıç iç çapını ve ΔT sıcaklık farkını ifade etmektedir. Çelik için

yaklaşık $\alpha = 11,7 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ kabul edildiğinde, 200 °C civarındaki ısıtma koşullarında göbek iç çapında sıkılık değerini azaltacak düzeyde teorik bir genleşme meydana gelmesi beklenmektedir. Ancak gerçek sökme kuvveti yalnızca geometrik genleşmeye değil; yüzey durumu, sürtünme davranışı ve ısıtma yöntemine bağlı olarak değişebilmektedir.

5.4.3 Isıtma Sonrası Yüzey Gözlemleri

Fırında ısıtılan Numune 1 ve Numune 2’de, ısıtma sonrasında yüzeyde renk değişimi ve oksitlenme belirtileri gözlenmiştir. Bu renk değişimleri, çelik yüzeyin belirli süre boyunca sıcaklık etkisine ve atmosfer ortamına maruz kalmasıyla ilişkilendirilmiştir. Çalışma kapsamında oksit tabakasının kimyasal bileşimini belirlemeye yönelik SEM/EDS analizi yapılmadığından, bu değerlendirme görsel gözlem düzeyinde ele alınmıştır.

Fırında ısıtılan numunelerde gözlenen yüzey değişimlerinin temas yüzeyindeki sürtünme davranışını etkileyebileceği ve sökme yükünün artmasına katkı sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Bu nedenle fırınla ısıtma yöntemi, yalnızca termal genleşme açısından değil, aynı zamanda yüzeyde meydana gelen gözlenebilir değişimler açısından da deneysel sonuçların yorumlanmasında dikkate alınmıştır.



Şekil 5.6 Elektrikli fırın ile ısıtma

5.5 İNDÜKSİYON ISITMA PROSEDÜRÜ (NUMUNE 3)

İndüksiyonla ısıtma prosedürü, Numune 3 üzerinde uygulanmıştır. Bu yöntemde amaç, göbek/dişli bileşenini kısa sürede ve bölgesel olarak ısıtarak sıkı geçme bağlantısındaki temas basıncını azaltmak ve sökme işlemini kolaylaştırmaktır. İndüksiyon ısıtma, fırında ısıtmaya kıyasla daha kısa sürede uygulanabilmesi ve ısının daha bölgesel olarak verilebilmesi nedeniyle sökme işlemleri açısından pratik bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

İndüksiyon elektromanyetik penetrasyon derinliği (deri derinliği) δ_{skin} frekans f ve malzeme özelliklerine bağlı olarak Denklem 5.2 ile hesaplanmaktadır [16]:

$\delta_{\text{skin}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{el}}}{\pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0}} \quad , \quad \mu_0$ $= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$	(5.2)
--	-------

Burada ρ_{el} elektrik direnci, μ_r görelî manyetik geçirgenlik ve μ_0 boşluk manyetik geçirgenliğidir. Çelik için $f = 10 \text{ kHz}$ 'de $\delta_{\text{skin}} \approx 2\text{--}4 \text{ mm}$ olup yüzeyin hızlı ısınmasını sağlamaktadır.

5.5.1 Ön Hazırlık

Deney öncesinde Numune 3 sökme işlemine uygun şekilde hazırlanmış ve indüksiyonla ısıtılacak bölge belirlenmiştir. İndüksiyon bobini, göbek/dişli bileşeninin dış yüzeyine yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bobin ve parça arasındaki konumlandırma, ısıtmanın göbek bölgesinde yoğunlaşmasını sağlayacak biçimde yapılmıştır.

5.5.2 İndüksiyon Isıtma İşlemi

İndüksiyon ısıtma işlemi, fırın yöntemine kıyasla daha kısa sürede gerçekleştirilmiştir. Isıtma sırasında göbek/dişli bölgesinde hızlı bir sıcaklık artışı meydana gelmiş ve sökme işlemi için gerekli genleşmenin oluşması hedeflenmiştir. Isıtma işleminin ardından numune hidrolik pres düzeneğine alınmış ve sökme işlemi uygulanmıştır.

İndüksiyon yönteminde ısıtmanın daha kısa sürede ve daha bölgesel olarak uygulanması, numunenin atmosfer ortamında yüksek sıcaklığa maruz kalma süresini azaltmaktadır. Bu durum, fırında ısıtılan numunelere kıyasla yüzeyde meydana gelebilecek renk değişimi ve oksitlenme belirtilerinin daha sınırlı kalmasına katkı sağlayabilmektedir.

5.5.3 Isıtma Sonrası Yüzey Gözlemleri

İndüksiyonla ısıtılan Numune 3'te, deney sonrası yapılan görsel incelemede fırında ısıtılan numunelere kıyasla daha sınırlı renk değişimi gözlenmiştir. Bu gözlem, indüksiyonla ısıtmanın kısa süreli ve bölgesel uygulanmasının yüzey durumunu farklı etkileyebileceğini göstermektedir. Ancak bu çalışmada oksit tabakasının kalınlığını veya kimyasal bileşimini belirlemeye yönelik SEM/EDS analizi yapılmadığından, yüzey durumu yalnızca görsel gözlemler çerçevesinde değerlendirilmiştir.

Numune 3'te elde edilen daha düşük maksimum sökme yükü ve ters hesaplanan daha düşük etkin sürtünme katsayısı, indüksiyonla ısıtma yönteminin sökme kuvvetini azaltıcı yönde etkili olabileceğini düşündürmektedir. Bu değerlendirme, doğrudan tribolojik ölçüm değil; deneysel sökme yükü, analitik temas basıncı hesabı ve deney sonrası görsel gözlemlerin birlikte yorumlanmasına dayanmaktadır.



Şekil 5.7 İndüksiyon bobini ile N3 numunesinin ısıtılması

5.6 SÖKME DENEYİ PROSEDÜRÜ VE KUVVET ÖLÇÜMLERİ

Sökme deneyi, ısıtma işleminin tamamlanmasının ardından numune sıcaklığını büyük ölçüde kaybetmeden gerçekleştirilmiştir. Isıtma sonrasında numuneler hidrolik pres düzeneğine alınmış ve eksenel yönde yük uygulanarak milin göbek/dışli içerisinden ayrılması sağlanmıştır. Bu süreçte amaç, farklı ısıtma yöntemleri sonrasında bağlantının sökülebilirliğini ve maksimum sökme yükünü karşılaştırmalı olarak değerlendirmektir.

5.6.1 Deney Düzeneği ve Numune Yerleştirme

Deney düzeneğinde göbek/dışli bileşenini destekleyen, milin ise eksenel yönde hareket etmesine izin veren uygun destek elemanları kullanılmıştır. Numune, hidrolik pres tablasına eksenel yük uygulanabilecek şekilde yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında mil eksenini ile pres yükleme doğrultusunun mümkün olduğunca aynı doğrultuda olmasına dikkat edilmiştir.

Sökme işlemi sırasında hidrolik pres üzerinden uygulanan yük kademeli olarak artırılmıştır. Numunenin ayrılmaya başladığı veya sökme işleminin gerçekleştiği anda pres göstergesinde okunan maksimum değer, deneysel sökme yükü olarak kaydedilmiştir. Bu çalışmada yük hücresi, LVDT veya bilgisayar tabanlı veri toplama sistemi kullanılmadığından, deneysel değerlendirme sürekli kuvvet-zaman veya kuvvet-deplasman eğrileri üzerinden değil, her numune için okunan maksimum sökme yükü üzerinden yapılmıştır.

5.6.2 Kuvvet Değerlendirme Yaklaşımı

Deneylerde elde edilen sökme yükleri, hidrolik pres göstergesinden okunan maksimum değerler olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle verilen ton değerleri, deney anında pres göstergesinden okunan maksimum yük değerlerini ifade etmektedir. Deneysel veriler, Lamé analitik hesabıyla elde edilen temas basıncı ve teorik sökme kuvveti değerleriyle birlikte yorumlanmıştır.

Sökme kuvveti ile temas basıncı arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntı ile değerlendirilmiştir:

$$F_{\text{sökme}} = \mu \cdot p \cdot \pi \cdot d_f \cdot L$$

Burada $F_{\text{sökme}}$ sökme kuvvetini, μ arayüzey sürtünme katsayısını, p temas basıncını, d_f temas çapını ve L temas uzunluğunu ifade etmektedir. Deneysel sökme yükü bilindiğinde, bu bağıntı ters yönde kullanılarak yaklaşık etkin sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Bu değerler doğrudan tribolojik ölçüm değil, deneysel sökme yükü ve analitik temas basıncı hesabına dayanan yaklaşık mühendislik değerlendirmeleridir.

5.6.3 Numune 1 — Sökme Deneyi Sonuçları (Fırın, 200 °C, 30 dk)

Numune 1, elektrikli fırında 200 °C sıcaklıkta 30 dakika ısıtıldıktan sonra hidrolik pres düzeneğinde sökme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sırasında pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükü 5,0 ton olarak kaydedilmiştir. Bu değer, Lamé analitik hesabında $\mu = 0,120$ kabulüyle hesaplanan teorik sökme kuvvetinden daha yüksektir.

Bu farkın, yalnızca geometrik sıkılık değeriyle değil, fırında ısıtma sonrasında yüzeyde gözlenen renk değişimi ve oksitlenme belirtileriyle ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Deneysel sökme yükü kullanılarak ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayısı Numune 1 için $\mu_{\text{ters}} \approx 0,246$ olarak bulunmuştur.

Tablo 5.2 Numune 1 sökme deneyi sonuçları

Büyüklik	Değer	Birim
Isıtma yöntemi	Fırın, 200 °C, 30 dk	—
Ölçülen yüzey sıcaklığı	212	°C
Sıkılık δ	48.3	μm
Analitik temas basıncı p	123.88	MPa
Teorik F ($\mu=0,120$)	2.44	ton
Deneysel F_{maks}	5.0	ton
Deney / Teori oranı	2.05×	—
Geriye dönük μ_{ters}	0.246	—
Yüzey görünümü	Oksit tabakası (sarı-mavi)	—



Şekil 5.8 Numune 1 — Hidrolik pres ekranında kaydedilen pik sökme kuvveti: 5.0 ton

5.6.4 Numune 2 — Sökme Deneyi Sonuçları (Fırın, 200 °C, 30 dk)

Numune 2, Numune 1 ile aynı fırın prosedürüne tabi tutulmuş ve 200 °C sıcaklıkta 30 dakika ısıtıldıktan sonra hidrolik pres düzeneğinde sökme deneyine alınmıştır. Numune 2'nin sıkılık değeri 51,2 μm olup, fırında ısıtılan numuneler arasında daha yüksek sıkılık değerine sahiptir. Deney sırasında pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükü 5,6 ton olarak kaydedilmiştir.

Bu değer, Numune 1'e göre daha yüksek bir sökme yükü elde edildiğini göstermektedir. Numune 2'deki daha yüksek sökme yükünün; sıkılık değerinin artması, fırında ısıtma sonrasında yüzeyde gözlenen renk değişimi ve oksitlenme belirtileri ile ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Deneysel sökme yükü kullanılarak ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayısı Numune 2 için $\mu_{\text{ters}} \approx 0,260$ olarak bulunmuştur.

Tablo 5.3 Numune 2 sökme deneyi sonuçları

Büyüklik	Değer	Birim
Isıtma yöntemi	Fırın, 200 °C, 30 dk	—
Ölçülen yüzey sıcaklığı	208	°C
Sıkılık δ	51.2	μm
Analitik temas basıncı p	131.33	MPa
Teorik F ($\mu=0,120$)	2.59	ton
Deneysel F _{maks}	5.6	ton
Deney / Teori oranı	2.16×	—
Geriye dönük μ_{ters}	0.260	—
Yüzey görünümü	Belirgin oksit, renk değişimi	—



Şekil 5.9 Numune 2 — Hidrolik pres ekranında kaydedilen pik sökme kuvveti: 5.6 ton

Numune 2’de ters hesaplanan μ_{ters} değerin Numune 1’e göre daha yüksek çıkması, deneysel sökme yükündeki artışla uyumludur. Bu sonuç, fırında ısıtma koşullarında yüzey durumu ve sürtünme davranışının sökme yükü üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Ancak bu değerler doğrudan sürtünme ölçümü olmayıp, deneysel sökme yükü ve analitik temas basıncı hesabı kullanılarak elde edilen yaklaşık mühendislik değerlendirmeleridir.

5.6.5 Numune 3 — Sökme Deneyi Sonuçları (İndüksiyon, ~250 °C, 3 dk)

Numune 3, indüksiyonla ısıtma yöntemi uygulandıktan sonra hidrolik pres düzeneğinde sökme deneyine tabi tutulmuştur. Bu numune 52,3 μm sıklık değeri ile çalışmadaki en yüksek sıklık değerine sahip olmasına rağmen, deney sırasında pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükü 3,2 ton olarak kaydedilmiştir.

Bu sonuç, sökme kuvvetinin yalnızca sıklık değeriyle açıklanamayacağını göstermektedir. Numune 3’te daha kısa süreli ve bölgesel indüksiyon ısıtması uygulanmış olması, yüzeyde fırında ısıtılan numunelere kıyasla daha sınırlı renk değişimi gözlenmesi ve ters hesaplanan sürtünme katsayısının daha düşük çıkması birlikte değerlendirildiğinde, indüksiyonla ısıtmanın sökme yükünü azaltıcı yönde etkili olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 5.4 Numune 3 sökme deneyi sonuçları

Büyüklik	Değer	Birim
Isıtma yöntemi	İndüksiyon, ~250 °C, 2–4 dk	—
Ölçülen yüzey sıcaklığı	248	°C
Sıklık δ (en yüksek)	52.3	μm
Analitik temas basıncı p	134.15	MPa
Teorik F ($\mu=0,120$)	2.64	ton
Deneysel F _{maks} (en düşük)	3.2	ton
Deney / Teori oranı	1.21×	—
Geriye dönük μ_{ters}	0.145	—
Yüzey görünümü	Temiz, metalik parlaklık	—



Şekil 5.10 Numune 3 — Hidrolik pres ekranında kaydedilen pik sökme kuvveti: 3.2 ton

Numune 3'te deney / teori oranının fırında ısıtılan numunelere göre daha düşük olması, indüksiyonla ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisini göstermesi açısından önemlidir. Ters hesaplanan $\mu_{\text{ters}} \approx 0,145$ değeri, fırında ısıtılan numuneler için hesaplanan değerlere göre daha düşüktür. Bu durum, indüksiyonla ısıtılan numunede temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışının farklılaşmış olabileceğini düşündürmektedir.

Bu değerlendirme, doğrudan yüzey pürüzlülüğü veya kimyasal yüzey analizi sonucuna değil; deneysel sökme yükü, analitik temas basıncı hesabı, ters hesaplanan yaklaşık sürtünme katsayısı ve deney sonrası görsel gözlemlerin birlikte yorumlanmasına dayanmaktadır.

5.7 DENEY SONRASI YÜZEY GÖZLEMLERİ VE YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sökme deneyleri tamamlandıktan sonra numunelerin temas yüzeyleri görsel olarak incelenmiştir. Bu incelemede, ısıtma yöntemine bağlı olarak yüzeyde oluşan renk değişimi, oksitlenme belirtileri ve genel yüzey görünümü değerlendirilmiştir. Bu çalışmada profilometre, SEM, EDS veya ayrıntılı mikroskobik yüzey analizi yapılmadığından, yüzey durumu yalnızca makroskobik görsel gözlemler ve deneysel sökme kuvvetlerinden ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayıları çerçevesinde yorumlanmıştır.

5.7.1 Fırın Isıtmalı Numunelerin Yüzey Bulguları (N1 ve N2)

Fırında ısıtılan Numune 1 ve Numune 2'de, sökme deneyleri sonrasında temas yüzeylerinde renk değişimi ve oksitlenme belirtileri gözlenmiştir. Yüzeyde görülen sarı, kahverengi ve mavi tonlarındaki renk değişimleri, çelik yüzeyin belirli süre boyunca sıcaklık etkisine ve atmosfer ortamına maruz kalmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Bu gözlemler, fırında ısıtılan numunelerde temas yüzeyinin indüksiyonla ısıtılan numuneye göre farklı bir yüzey durumuna sahip olabileceğini göstermektedir. Deneysel sökme kuvvetlerinden ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayılarının Numune 1 için $\mu_{\text{ters}} \approx 0,246$ ve Numune 2 için $\mu_{\text{ters}} \approx 0,260$ olarak bulunması, fırında ısıtma sonrasında sürtünme davranışında artış meydana gelmiş olabileceğini düşündürmektedir. Ancak bu değerlendirme doğrudan yüzey pürüzlülüğü veya kimyasal analiz ölçümüne değil, görsel gözlem ve ters hesaplama sonuçlarına dayanmaktadır.

5.7.2 İndüksiyon Isıtmalı Numunenin Yüzey Bulguları (N3)

İndüksiyonla ısıtılan Numune 3'te, deney sonrası yapılan görsel incelemede fırında ısıtılan numunelere kıyasla daha sınırlı renk değişimi gözlenmiştir. Bu durum, indüksiyonla ısıtmanın daha kısa sürede ve daha bölgesel olarak uygulanması nedeniyle yüzeyin atmosfer ortamında yüksek sıcaklığa maruz kalma süresinin daha az olmasıyla ilişkilendirilebilir.

Numune 3 için ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayısı $\mu_{\text{ters}} \approx 0,145$ olarak bulunmuştur. Bu değerin fırında ısıtılan numunelere göre daha düşük olması, indüksiyonla ısıtılan numunede temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışının farklılaşmış olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte bu sonuç, doğrudan tribolojik ölçüm veya yüzey kimyası analizi olarak değerlendirilmemeli; deneysel sökme yükü, analitik temas basıncı hesabı ve görsel gözlemlerin birlikte yorumlanması olarak ele alınmalıdır.

Tablo 5.5'te üç numunenin deneysel sonuçları ve deney sonrası yüzey gözlemleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.5 Üç numunenin deneysel sonuçları ve yüzey gözlemlerinin karşılaştırılması

Parametre	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Isıtma yöntemi	Fırın	Fırın	İndüksiyon
Isıtma koşulu	200 °C, 30 dk	200 °C, 30 dk	Kısa süreli bölgesel ısıtma
Sıklık δ	48,3 μm	51,2 μm	52,3 μm
Analitik temas basıncı p	123,88 MPa	131,33 MPa	134,15 MPa
Deneysel maksimum sökme yükü	5,0 ton	5,6 ton	3,2 ton
Teorik sökme yükü, $F_{\text{teori}} (\mu = 0,120)$	2,44 ton	2,58 ton	2,64 ton
Deney/Teori oranı	2,05×	2,17×	1,21×
μ_{ters}	0,246	0,260	0,145
Deney sonrası yüzey gözlemi	Renk değişimi ve oksitlenme belirtileri	Renk değişimi ve oksitlenme belirtileri	Daha sınırlı renk değişimi
Değerlendirme	Sökme yükü teorik değerden yüksek	En yüksek sökme yükü	En düşük sökme yükü

Tablo 5.5 incelendiğinde, en yüksek sıklık değerine sahip Numune 3'ün en düşük deneysel sökme yükünü verdiği görülmektedir. Bu sonuç, sökme kuvvetinin yalnızca geometrik sıklık değeriyle açıklanamayacağını; ısıtma yöntemi, yüzeyde gözlenen değişimler ve temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışının da sonuçlar üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Fırında ısıtılan numunelerde daha yüksek μ_{ters} değerleri elde edilirken, indüksiyonla ısıtılan numunede daha düşük μ_{ters} değeri hesaplanmıştır. Bu durum, indüksiyonla ısıtmanın sökme kuvvetini azaltıcı yönde etkili olabileceğini düşündürmektedir.

6 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, SAE 4140 ıslah çeliği mil ve SAE 8620 sementasyon çeliği göbek/dışli bağlantısından oluşan sıkı geçme bağlantısında ısıtma yönteminin sökme kuvveti üzerindeki etkisi analitik hesaplar, destekleyici sayısal modelleme ve hidrolik pres sökme deneyleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. Çalışmada ulaşılan sonuçlar analitik, sayısal ve deneysel boyutlarda aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

6.1 ANALİTİK YÖNTEM SONUÇLARI

1. Bu çalışmada incelenen göbek-mil geometrisi, göbek cidar etkisinin dikkate alınmasını gerektiren bir yapıdadır. Bu nedenle temas basıncı ve gerilme dağılımının hesaplanmasında ince cidarlı yaklaşım yerine Lamé kalın cidarlı silindir teorisinin kullanılması daha uygun görülmüştür. Kalın cidarlı yaklaşım, mil ve göbek rijitliğini birlikte dikkate alması bakımından sıkı geçme bağlantılarının değerlendirilmesinde daha gerçekçi bir analitik çerçeve sunmaktadır [5].

2. Üç numune için Lamé denklemleriyle hesaplanan temas basınçları yaklaşık 123,9–134,1 MPa aralığında elde edilmiştir. Temas basıncının numuneler arasında artış göstermesi, sıkılık değerlerinin artışıyla uyumludur. Bu sonuç, analitik modelin sıkılık değişimine bağlı temas basıncı eğilimini değerlendirmek için kullanılabilir olduğunu göstermektedir.

3. Göbek iç yüzeyinde hesaplanan eşdeğer gerilme değerleri, kullanılan malzeme dayanım değerleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Hesaplanan emniyet katsayıları, analitik kabuller çerçevesinde bağlantının statik yükleme altında elastik sınırlar içinde değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte bu sonuçlar, kullanılan malzeme dayanım kabulü, geometri ve sınır şartları çerçevesinde geçerlidir.

4. $\mu = 0,120$ sürtünme katsayısı kabulüyle hesaplanan teorik sökme kuvvetleri Numune 1, Numune 2 ve Numune 3 için sırasıyla yaklaşık 2,44 ton, 2,59 ton ve 2,64 ton olarak

bulunmuştur. Bu değerler, fırında ısıtılan numunelerde deneysel sökme yüklerinin altında kalırken, indüksiyonla ısıtılan numunede deneysel sonuca daha yakın bir değer vermiştir. Bu durum, sökme kuvvetinin yalnızca geometrik sıkılık ve temas basıncıyla değil, ısıtma yöntemi ve temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışıyla da ilişkili olduğunu göstermektedir.

6.2 DENEYSEL SONUÇLAR VE TEMEL BULGULAR

5. Deneysel sonuçlarda en dikkat çekici bulgu, en yüksek sıkılık değerine sahip Numune 3'ün en düşük sökme yükünü vermesidir. Numune 3'ün sıkılık değeri $\delta = 52,3 \mu\text{m}$ olmasına rağmen, indüksiyonla ısıtma sonrasında pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükü 3,2 ton olarak belirlenmiştir. Buna karşılık fırında ısıtılan Numune 1 ve Numune 2'de sırasıyla 5,0 ton ve 5,6 ton maksimum sökme yükü elde edilmiştir. Bu sonuç, sökme kuvvetinin yalnızca sıkılık değeriyle açıklanamayacağını; ısıtma yöntemi ve temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışının da sonuçlar üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir.

6. Deneysel sökme yükleri ve analitik temas basıncı değerleri kullanılarak ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayıları, fırında ısıtılan numunelerde $\mu_{\text{ters}} = 0,246\text{--}0,260$ aralığında; indüksiyonla ısıtılan numunede ise $\mu_{\text{ters}} = 0,145$ olarak bulunmuştur. Bu değerler doğrudan tribolojik ölçüm olmayıp, deneysel sökme yükleri ve analitik hesaplara dayalı yaklaşık mühendislik değerlendirmeleridir.

7. Fırında ısıtılan Numune 1 ve Numune 2'de deney sonrasında yüzeyde renk değişimi ve oksitlenme belirtileri gözlenmiştir. Bu durumun, temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışını etkileyerek sökme yükünün artmasına katkı sağlamış olabileceği değerlendirilmektedir.

8. İndüksiyonla ısıtılan Numune 3'te fırında ısıtılan numunelere kıyasla daha sınırlı renk değişimi gözlenmiştir. İndüksiyon yönteminin kısa süreli ve bölgesel ısıtma sağlaması, yüzeyin atmosfer ortamında yüksek sıcaklığa maruz kalma süresini azaltmış olabilir. Bu durum, Numune 3'te daha düşük sökme yükü ve daha düşük ters hesaplanan sürtünme

katsayısı elde edilmesiyle birlikte değerlendirildiğinde, indüksiyonla ısıtmanın sökme kuvvetini azaltıcı yönde etkili olabileceğini düşündürmektedir.

6.3 ANALİTİK — SAYISAL — DENEYSEL SONUÇLARIN BİRLİKTE DEĞERLENDİRİLMESİ

9. Analitik hesaplar, temas basıncı, gerilme durumu ve teorik sökme kuvveti değerlerinin belirlenmesinde temel hesap yöntemi olarak kullanılmıştır. ANSYS Workbench ortamında oluşturulan sayısal model ise deneysel kuvvetleri doğrudan doğrulayan bir çözüm olarak değil, sıkı geçme bağlantısının deformasyon davranışını görselleştiren destekleyici bir modelleme çalışması olarak değerlendirilmiştir.

10. Deneysel sonuçlar, $\mu = 0,120$ kabulüyle hesaplanan teorik sökme kuvvetlerinin fırında ısıtılan numuneler için deneysel değerlerin altında kaldığını göstermiştir. Bu farkın, fırında ısıtma sonrasında yüzeyde gözlenen renk değişimi ve oksitlenme belirtileri ile buna bağlı olası sürtünme artışından kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. İndüksiyonla ısıtılan numunede ise deneysel sökme yükü teorik değere daha yakın çıkmış ve ters hesaplanan sürtünme katsayısı fırın numunelerine göre daha düşük bulunmuştur.

6.4 MÜHENDİSLİK ÖNERİLERİ

11. Isıtma yöntemi seçimi: Sıkı geçme bağlantılarının söküm prosesinde, bileşenin yeniden kullanılabilirliğinin önem taşıdığı durumlarda indüksiyonla ısıtma yöntemi değerlendirilmesi gereken bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada indüksiyonla ısıtılan numunede, fırında ısıtılan numunelere kıyasla daha düşük sökme yükü ve daha düşük ters hesaplanan etkin sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Bu durum, kısa süreli ve bölgesel ısıtmanın sökme kuvvetini azaltıcı yönde etkili olabileceğini göstermektedir.

12. Analitik hesabın uygulanması: Lamé denklemlerine dayalı analitik hesap, sıkı geçme bağlantılarında temas basıncı, gerilme durumu ve teorik sökme kuvvetinin değerlendirilmesi için yararlı bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Ancak bu

çalışmada görüldüğü üzere, sabit sürtünme katsayısı kabulüyle yapılan hesaplar özellikle fırında ısıtılan numunelerde deneysel sökme yüklerini düşük tahmin edebilmektedir. Bu nedenle fırında ısıtma gibi yüzey durumunu değiştirebilecek koşullarda, analitik hesapların deneysel verilerle birlikte yorumlanması önerilmektedir.

13. Sürtünme katsayısı seçimi: Bu çalışmada $\mu = 0,120$ kabulüyle hesaplanan teorik sökme kuvvetleri, fırında ısıtılan numunelerde deneysel değerlere göre düşük kalmıştır. Deneysel sökme yüklerinden ters hesaplanan yaklaşık etkin sürtünme katsayıları, fırın numuneleri için $\mu_{\text{ters}} \approx 0,246-0,260$ aralığında; indüksiyonla ısıtılan numune için ise $\mu_{\text{ters}} \approx 0,145$ olarak bulunmuştur. Bu değerler doğrudan sürtünme ölçümü olmayıp, incelenen numuneler ve deney koşulları için yaklaşık mühendislik değerlendirmesi niteliğindedir.

14. Emniyet ve tasarım sınırları: Analitik hesaplar sonucunda incelenen bağlantıda göbek iç yüzeyindeki eşdeğer gerilme değerlerinin, kullanılan malzeme dayanım kabulünün altında kaldığı görülmüştür. Hesaplanan emniyet katsayıları, bu çalışmada kullanılan geometri ve malzeme kabulleri çerçevesinde bağlantının statik yükleme altında elastik sınırlar içinde değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bununla birlikte bu sonuçlar, yalnızca incelenen numune geometrisi, sıklık aralığı ve analitik hesap kabulleri için geçerlidir.

6.5 ÇALIŞMANIN KISITLARI VE GELECEK ARAŞTIRMA ÖNERİLERİ

15. Kısıtlar: Bu çalışma, belirli bir geometriye sahip SAE 4140 çelik mil ve SAE 8620 çelik göbek/dişli bağlantısı, sınırlı sayıda numune ve iki farklı ısıtma yöntemi ile sınırlandırılmıştır. Deneysel veriler, hidrolik pres göstergesinden okunan maksimum sökme yükleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında sürekli kuvvet-zaman veya kuvvet-deplasman kaydı, ayrıntılı yüzey pürüzlülüğü ölçümü, SEM/EDS analizi, dinamik yorulma testi, sürünme analizi ve farklı malzeme çiftleri incelenmemiştir. Numune sayısının artırılması, elde edilen sonuçların istatistiksel olarak daha güçlü değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

16. Gelecek araştırma önerileri: Gelecek çalışmalarda farklı ısıtma sıcaklıkları ve süreleri için daha geniş numune gruplarıyla deney yapılması önerilmektedir. Ayrıca sökme deneylerinde yük hücresi ve deplasman ölçümü kullanılarak kuvvet-deplasman eğrilerinin elde edilmesi, yüzey pürüzlülüğü ölçümleriyle $R_a/R_z/R_q$ değerlerinin karşılaştırılması ve SEM/EDS analizleriyle oksitlenme belirtilerinin kimyasal olarak incelenmesi yararlı olacaktır. Bunun yanında, termal-mekanik eşleşik sonlu elemanlar modeli oluşturularak ısıtma sırasında temas basıncının zamana bağlı değişimi daha ayrıntılı biçimde değerlendirilebilir. Farklı malzeme çiftleri, yüzey kaplamaları ve ısıtma işlem koşulları da ileride incelenebilecek başlıca araştırma konularıdır.

17. Genel değerlendirme: Bu çalışma, en yüksek sıkılık değerine sahip numunenin her durumda en yüksek sökme kuvvetini gerektirmeyebileceğini göstermiştir. Deneysel sonuçlar, sıkı geçme bağlantılarında sökme kuvvetinin yalnızca geometrik sıkılık değerine bağlı olmadığını; ısıtma yöntemi, yüzeyde gözlenen değişimler ve temas yüzeyindeki etkin sürtünme davranışının da önemli rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle sıkı geçme bağlantılarının sökümünde ısıtma yöntemi seçimi, analitik hesap sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmesi gereken önemli bir mühendislik parametresi olarak ele alınmalıdır.

KAYNAKÇA

- [1] G. Lamé, Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides,, Bachelier, 1852.
- [2] J. E. Shigley, Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill., 2004.
- [3] I. 286-1:2010, Geometrical Product Specifications (GPS) — ISO Code System for Tolerances on Linear Sizes, International Organization for Standardization., 2010.
- [4] R. L. Norton, Machine Design: An Integrated Approach, 5. baskı,, New Jersey.: Pearson, 2014.
- [5] D. 7190-1:2017, Interference fits — Calculation and design rules, Deutsches Institut für Normung., 2017.
- [6] S. P. G. J. N. Timoshenko, Theory of Elasticity, 3. baskı, New York., 1970.
- [7] R. Von Mises, *Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math.-Phys. Klasse, 191, p. 582–592..
- [8] EN 13260:2009, Railway Applications — Wheelsets and Bogies — Wheelsets — Product Requirements., 2009.
- [9] B. S. F. W. J. Blanchard, Systems Engineering and Analysis, 4. baskı, Pearson., 2006.
- [10] Machinery's Handbook,, New York.: Industrial Press, 2020.
- [11] H. L. J. Z. W. Chen, «Tribological behavior of interference fit joints under thermal loading,» Wear, 2018, pp. 406–407, pp. 45–54..
- [12] V. L. D. C. R. B. M. Rudnev, Handbook of Induction Heating, New York: Marcel Dekker, 2003.
- [13] O. S. S. Vingsbo, « On fretting maps, Wear, 126(2),» 1988, p. pp. 131–147..

- [14] N. D. C. P. D. L. J. M. D. Bertrand, « Iron oxidation at low temperature (260–500 °C) in air and the effect of water vapour,» *Oxidation of Metals*, 73(1–2), 2010, p. 139–162.
- [15] O. C. T. R. L. Zienkiewicz, *The Finite Element Method*, 5. baskı, Oxford.: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [16] J. & Z. M. Qiu, Analytical solution for interference fit for multi-layer thick-walled cylinders and the application in crankshaft bearing design, *Applied Sciences*, 6(6), 167., 2016.
- [17] X. L. Z. W. X. H. X. & W. Y. Wang, «Prediction of stress distribution in press-fit process of interference fit with a new theoretical model.,» *Proc. IMechE Part C*, 233(8), 2019, p. 2834–2846.
- [18] G. M. C. J. C. F. J. F. & L. M. ang, «Contact pressure between two rough surfaces of a cylindrical fit,» *Journal of Materials Processing Technology*, 123(3), 2002, p. 490–497..
- [19] H. B. M. & F. J.-F. Boutoutaou, «Modelling of interference fits with taking into account surfaces roughness with homogenization technique.,» *International Journal of Mechanical Sciences*, 69, 2013, p. 21–31..
- [20] R. & K. M. Buczkowski, « A study of the surface roughness in elasto-plastic shrink fitted joint,» *Tribology International*, 98, 2016, p. 125–132..
- [21] A. P. B. A. & D. P. B. Raj, «Combined effect of cylindricity, roundness and roughness on axial load-carrying ability of interference fits.,» *Proc. IMechE Part J*, 234(11), 2020, p. 1697–1711..
- [22] J. D. & T. C. E. Booker, «Measuring the coefficient of friction for use in shrink-fit calculations,» *Experimental Techniques*, 35(2), 2011, p. 7–13..
- [23] R. T. R. R.-M. M. & L. M. González-Gutiérrez, « Influence of the friction coefficient on the stress distributions and contact pressure in press-fits via FEA,» *Lubricants*, 11(11), 2023, p. 472..

- [24] J. & Š. M. Madej, « Analysis of interference-fit joints.,» *Applied Sciences*, 11(23), 2021, p. 11428..
- [25] C. E. & B. J. D. Truman, «Analysis of a shrink-fit failure on a gear hub/shaft assembly.,» *Engineering Failure Analysis*, 14(4), 2007, p. 557–572..
- [26] L. D.-J. R. S. & L. R. Han, «Interference assembly and fretting wear analysis of hollow shaft.,» *The Scientific World Journal*, 2014, p. 919518.
- [27] H. L. A. S. H. H. E.-S. M. A. M. A. N. A. A. M. & E. K. Yeung, «Non-destructive disassembly of interference fit under wear conditions.,» *Machines*, 11(5), 2023, p. 538..
- [28] B. N. J. Persson, « Influence of surface roughness on press fits.,» *Tribology Letters*, 71, 2023, p. 19..
- [29] H. T. A. K. S. W. & Y. H. Zhu, «Tribology in metal forming at elevated temperatures.,» *Friction*, 3(1), 2015, p. 1–27..
- [30] J. D. T. C. E. W. S. & M. Z. Booker, « A comparison of shrink-fit holding torque using probabilistic, micromechanical and experimental approaches.,» *Proc. IMechE Part B*, 218(2), 2004, p. 175–187..
- [31] S. B. D. D. J. & D. A. Kowalski, «Assessment of the wear of a repeatedly disassembled interference-fit joint.,» *Applied Sciences*, 13(6), 2023, p. 3902..
- [32] Advances and Challenges in Interference Fit Technology for Enhancing the Mechanical Performance., Kapsamlı derleme çalışması., 2023.
- [33] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, New York.: John Wiley & Sons, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Barış KIRLI, 4 Temmuz 2003 tarihinde Tekirdağ ili Çerkezköy ilçesinde doğmuştur. İlk ve ortaöğreniminin ardından lise eğitimini 2017-2021 yılları arasında Tekirdağ Mustafa Elmas Arıcı Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır.

2021 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazanarak lisans eğitimine başlamıştır. Halen aynı bölümde 4. sınıf öğrencisi olarak eğitim hayatına devam etmektedir.

Lisans eğitimi süresince mesleki deneyim kazanmak amacıyla çeşitli endüstriyel kuruluşlarda stajlarını gerçekleştirmiştir. 2024 yılı yaz döneminde **Hema Endüstri A.Ş. Dişli ve Aktarma Organları Fabrikası** bünyesinde "Genel Atölye Stajı"nı tamamlayarak üretim süreçleri ve dişli imalatı üzerine saha deneyimi edinmiştir. Ardından, 2025 yılı yaz döneminde **Dinex Egzoz ve Emisyon Teknolojileri San. ve Tic. A.Ş.** firmasında "İşletme ve Organizasyon Stajı"nı tamamlayarak kurumsal yönetim ve üretim planlama süreçlerinde bulunmuştur.

İyi derecede (B2) İngilizce bilen Barış KIRLI, mesleki çalışmaları kapsamında SolidWorks ve AutoCAD gibi bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarını ve Microsoft Office yazılımlarını etkin düzeyde kullanabilmektedir.