

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DİNAMİK YÜK ALTINDA ÇALIŞAN TEFLON-BRONZ TABAKALI
KAYMALI YATAKLARDA GERİLME ANALİZİ VE YÜZEY
YORULMASININ İNCELENMESİ**

127569

Mak. Yük. Müh. Mustafa Sabri DUMAN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09.05.2002

Tezin Savunma Tarihi : 12.09.2002

**TE. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aydın BIYIKLIOĞLU

Jüri Üyesi : Prof.Dr. Temel SAVAŞKAN

Jüri Üyesi : Prof.Dr. Metin AKKÖK

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Asım KADIOĞLU

Trabzon 2002

ÖNSÖZ

Kaymalı yataklar, yüksek güç, düşük gürültü, yüksek performans, temiz çevre gibi ihtiyaçları karşılamak için araştırmacılar tarafından geliştirilmektedirler. Bu amaçla geliştirilen plastik tabakalı kaymalı yatak malzemeleri, büyük gelişme göstererek kullanılmaya başlanmıştır. Bunun başlıca nedenleri bu malzemelerin ucuz, hafif, kolay işlenebilir, yüksek kimyasal ve korozyon direçlerine ve yüksek ısı ve elektrik özelliklerine sahip olmalarıdır. Ayrıca mekanik ve fiziksel özellikleri de çeşitli kuvvetlendiricilerle iyileştirilmektedirler. Bu yataklar, kimyasal yapılarından dolayı kendi kendilerini yağlayarak kuru veya az yağlamalı durumlarda da çalışabilirler.

Yapılan bu çalışmayla, yatakların fonksiyonlarını yerine getirmede daha iyi performans göstermelerini sağlamak amacıyla, plastik kaplamalı metal destekli yatakların dinamik yük altındaki yataklama özellikleri araştırıldı.

Çalışmalarımın bütün aşamalarındaki ilgi ve katkılarından dolayı, tez danışmanım hocam Sayın Prof. Dr. Aydın BIYIKLIOĞLU'na ve yardımlarından dolayı da Doç. Dr. Levent GÜMÜŞEL hocama teşekkürlerimi sunarım. Bu tez çalışmamda yardımlarını gördüğüm değerli çalışma arkadaşlarıma, yardımlarından dolayı Makina Mühendisliği bölüm teknisyenlerine ve bu çalışmayı 94.112.003.3 nolu proje ile destekleyen KTÜ Araştırma Fonu Saymanlığı'na da teşekkür ederim.

MAYIS 2002

Mustafa Sabri DUMAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXIV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kaymalı Yataklar ve Yatak Hasarları.....	1
1.3. Yüzey Yorulması ve Nedenleri.....	3
1.3.1. Yorulmaya Etki Eden Mekanik Gerilmeler	4
1.3.2. Yorulmaya Etki Eden Isıl Gerilmeler	5
1.4. Plastik Kaymalı Yataklar	6
1.5. Plastik Yataklar Üzerine Yapılmış Çalışmalar	7
1.6. Çalışmanın Amacı.....	7
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	9
2.1. Deney Düzeneği	9
2.1.1. Deney Düzeneğinin Yapısı	9
2.1.2. Deney Yatağının Yüklenmesi	13
2.1.2.1. Yükleme Ünitesi.....	13
2.1.2.2. Dinamik Yükün Elde Edilmesi ve Ölçülmesi.....	15
2.1.2.3. Yağlama Ünitesi.....	17
2.1.3. Yağ Filmi Basıncını Ölçme Sistemi.....	17
2.1.4. Deney Yatağı.....	22
2.2. Sayısal Çözüm İçin Yapılan Çalışmalar.....	25
2.2.1. İki Boyutlu Yatak Modelleri	25
2.2.2. Üç Boyutlu Yatak Modelleri	30

3.	BULGULAR.....	35
3.1.	I Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular	35
3.2.	II Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular	41
3.2.1.	Genişliği 10 mm Olan Yatakla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	43
3.2.1.1.	Genişliği 10 mm Olan Yatak İçin İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları	47
3.2.1.2.	Genişliği 10 mm Olan Yatak İçin Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	55
3.2.1.2.1.	Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları.....	56
3.2.1.2.2.	Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları.....	60
3.2.1.2.3.	Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları	63
3.2.1.2.4.	Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları	68
3.2.1.2.5.	Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları.....	72
3.2.1.2.6.	Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları.....	75
3.2.1.2.7.	Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları	79
3.2.1.2.8.	Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları	83
3.2.1.2.9.	Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları.....	85
3.2.1.3.	İki ve Üç Boyutlu Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	87
3.2.2.	Genişliği 12 mm Olan Yatakla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular.....	89
3.2.2.1.	Genişliği 12 mm Olan Yatak İçin İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları	93
3.2.2.2.	Genişliği 12 mm Olan Yatak İçin Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	96
3.2.2.2.1.	Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları.....	96
3.2.2.2.2.	Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları.....	98
3.2.2.2.3.	Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları	98
3.2.2.2.4.	Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Sonuçları.....	99
3.2.2.2.5.	Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Sonuçları.....	101
3.2.2.2.6.	Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Sonuçları.....	102
3.2.2.2.7.	Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Sonuçları.....	103
3.2.2.2.8.	Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Sonuçları.....	105
3.2.2.2.9.	Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Sonuçları	106
3.2.3.	Genişliği 14 mm Olan Yatakla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular...	107
3.2.3.1.	Genişliği 14 mm Olan Yatak İçin İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları	110
3.2.3.2.	Genişliği 14 mm Olan Yatak İçin Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	113
3.2.3.2.1.	Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları.....	113

3.2.3.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları.....	114
3.2.3.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları	115
3.2.3.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları	117
3.2.3.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları.....	118
3.2.3.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları.....	119
3.2.3.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları	120
3.2.3.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları	121
3.2.3.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları	122
3.3. III Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular.....	123
3.3.1. İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	126
3.3.2. Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	130
3.3.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları.....	130
3.3.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları.....	131
3.3.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları	132
3.3.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları	134
3.3.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları	135
3.3.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları	136
3.3.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları	137
3.3.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları	138
3.3.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları.....	139
3.4. IV Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular.....	140
3.4.1. İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	143
3.4.2. Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları.....	148
3.4.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları.....	148
3.4.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları.....	149
3.4.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları	150
3.4.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları	151
3.4.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları	153
3.4.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları	154
3.4.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları	155
3.4.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları	156
3.4.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları.....	156

3.5.	V Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular	157
3.5.1.	İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları	160
3.5.2.	Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları	165
3.5.2.1.	Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları	165
3.5.2.2.	Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları	166
3.5.2.3.	Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları	167
3.5.2.4.	Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları	168
3.5.2.5.	Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları	170
3.5.2.6.	Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları	171
3.5.2.7.	Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları	172
3.5.2.8.	Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları	173
3.5.2.9.	Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları	174
4.	İRDELEME	175
5.	SONUÇLAR	184
6.	ÖNERİLER	188
7.	KAYNAKLAR	189
8.	EKLER	196
	ÖZGEÇMİŞ	258

ÖZET

Bu çalışmada, teflon-bronz tabakası içeren plastik kaymalı yatakların yorulma özellikleri, değişik form, büyüklük ve frekansta dinamik yük uygulayabilen bir deney düzeneği yardımıyla deneysel olarak incelendi ve yatakta oluşan basınç dağılımları belirlendi. Ayrıca yatakta meydana gelen gerilmeler ve yerdeğiştirmeler ANSYS paket programı yardımıyla sayısal olarak hesaplandı.

Çalışmada deneyler, ilk olarak aynı bir yük altında değişik yatak genişliklerinde, ikinci olarak da, sabit yatak genişliğinde değişik dinamik yüklerde yapıldı. Yatakta ortaya çıkan yorulma bölgeleri, kılcal çatlakların dağılımı ve gerilme analizi ile etkili büyüklüklerin değişimi incelendi. Her bir dinamik yük altında, yatakta ortaya çıkan mil yörüngesi ile oluşan yorulma bölgeleri ayrı ayrı belirlendi. Dinamik yük altında, krank açısının her 10°'lik konumunda çevresel basınç dağılımları hesaplanarak, zarf yüzeyinde ortaya çıkan yorulma bölgesi ile bu basınç dağılımları arasındaki ilişkiler incelendi. Ayrıca yatakta ortaya çıkan yorulma bölgeleri ile mil merkezinin yörüngesi ve dinamik yükün maksimum değerleri arasındaki ilişkiler incelendi.

Yatak zarfı sonlu elemanlarla modellenerek, göz önüne alınan basınç dağılımları altında, tüm zarf yüzeyi boyunca gerilme dağılımları belirlendi. Burada özellikle yorulma açısından önemli olan teflon-bronz tabakasının yüzeyi ile bu tabakanın çelik destek tabakası ile birleştiğı yüzeydeki gerilme dağılımlarının değişimi incelendi. Burada ortaya çıkan gerilmelerden, von Mises gerilme hipotezine göre eşdeğer gerilme dağılımları hesaplanarak yatak zarfında yorulma çatlaklarının başlaması için kritik noktalar vurgulandı.

Bu çalışmalar sonucunda, en büyük yükün olduğı bölgelerde, en büyük yağ film basınçları meydana geldiğı ve yorulma çatlaklarının da bu bölgelerde oluştuğı gözlemlendi. Gerilme dağılımı açısından en kritik bölgenin teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyi olduğı tespit edildi. Bunun yanında, söz konusu yatakların yorulması açısından aksenal gerilmelerin teğetsel gerilmeler kadar etkin olduğı gözlemlendi. Ayrıca bu yatakların beyaz metal alaşımlı kaymalı yataklardan bir çok hakke daha iyi bir yorulma davranışı sergilediğı belirlendi.

Anahtar Kelimeler : Dinamik Yüklü Kaymalı Yataklar, Plastik Yataklar, Hidrodinamik

Yağ Filmi Basınç Dağılımı, Gerilme Dağılımı, Mil Yörüngesi,
Yorulma

SUMMARY

Stress Analysis and Investigation of Surface Fatigue of PTFE - Bronze Layered Journal Bearings under Dynamic Loading Conditions

In this study fatigue properties of plastic journal bearings including PTFE-bronze layer was experimentally investigated by using an experimental apparatus in which dynamic load is applicable in different forms, magnitudes and frequencies. The pressure distributions occurred at the surface of the journal bearing was determined. Further, stresses and deformations occurred at the journal bearing was calculated numerically by using ANSYS Finite Element Code.

Experiments were carried out for the same loading at different bearing widths firstly and secondly for different dynamic loadings at constant bearing widths. Fatigue regions, capillary crack dispersion and stress distributions occurred at the journal bearing were investigated. The shaft orbit and fatigue regions occurred for each dynamic loading condition were determined. The relationship between fatigue region occurred at the surface of the bearing and pressure distributions were investigated by determining the circumferential pressure distribution under dynamic loading for the position of every 10° crank angle. Further, the relationship between fatigue regions and shaft center orbit and maximum value of dynamic load were investigated.

Stress distributions at the surface of the journal bearing were determined by using Finite Element Method. The variation of the stress distributions at the interface of PTFE-bronze layer and the steel backing which is important in fatigue point of view were investigated. The equivalent stress distributions based on von Mises yield criterion were calculated and the critical points to initiate fatigue cracks in bearings were determined.

At the end of this study, the maximum oil pressure and fatigue cracks were observed in the most heavily loaded regions of the bearing surface.. It was also found that the most critical region for stress distribution was found to be at the interface between PTFE-bronze and steel backing layers. Moreover, it was obtained that the axial stresses were effective as much as tangential stresses in fatigue failure of the journal bearings. It was calculated that PTFE-bronze layered journal bearings showed superior fatigue behavior than the bearings including white-metal alloy under the conditions tested in this study.

Key Words: Dynamic Loaded Journal Bearing, Plastic Bearings, Pressure Distribution for Hydrodynamic Oil Film, Stress Distribution, Shaft Orbit, Fatigue.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Deney düzeneğinin deney mili eksenine boyunca kesiti.....	10
Şekil 2. Deney düzeneğinin deney mili eksenine dik kesiti	11
Şekil 3. Deney düzeneğinin önden görünüşü	12
Şekil 4. Deney düzeneğinin sol yandan görünüşü	12
Şekil 5. Deney düzeneğinin sağ yandan ve hidrolik güç ünitesinin görünüşü	13
Şekil 6. Hidrolik donanım.....	14
Şekil 7. Servo – Vana	15
Şekil 8. Basınç veya yük algılayıcılarının kalibrasyon eğrisi	16
Şekil 9. Deney düzeneği yağlama ünitesi.....	18
Şekil 10. Basınç algılayıcısının deney mili içindeki konumu ve yağ filminde oluşan basıncın ölçülme sistemi	19
Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	19
Şekil 12. Konum değiştirme sistemi ve baskı düzeneğinin görünüşü	20
Şekil 13. Konum değiştirme sistemi	21
Şekil 14. Basınç algılama sistemi.....	23
Şekil 15. Basınç algılayıcısının kalibrasyon eğrisi.....	24
Şekil 16. Deney yatağının iç yapısı.....	24
Şekil 17. Deney yatağının şekli ve boyutları	25
Şekil 18. Hidrodinamik yağ film basınç dağılımı ve iki boyutlu kaymalı yatak sonlu eleman modeli.....	26
Şekil 19. İki boyutlu sayısal çözümlerde kullanılan modellemeler	28
Şekil 20. Yatak zarfının sonlu elemanlarla modellenmesinde eleman sayısının teğetsel ve radyal gerilme dağılımlarına etkisi	29
Şekil 21. Yatakta oluşan üç boyutlu hidrodinamik basınç dağılımı ve kaymalı yatak sonlu eleman modeli.....	31
Şekil 22. Üç boyutlu sayısal çözümlerde kullanılan modellemeler	32
Şekil 23. Yatak zarfının üç boyutlu modellenmesinde eleman sayılarının gerilme dağılımlarına etkisi	34
Şekil 24. I nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı.....	36
Şekil 25. I nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi	36

Şekil 26. I nolu dinamik yük altında ve 19,5 mm genişliğindeki yatakta oluşan mil merkezi yörüngeleri	37
Şekil 27. I nolu dinamik yükün ve eksantrisite oranının krank açısıyla değişimi.....	38
Şekil 28. I nolu dinamik yük altında ve 19,5 mm genişliğindeki yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları.....	39
Şekil 29. I nolu dinamik yük altında krank açısının 170° ile 220° arasındaki değerlerinde hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları	40
Şekil 30. I nolu yük altında hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler	40
Şekil 31. I nolu yük altında hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler	41
Şekil 32. II nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı	42
Şekil 33. II nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi.....	43
Şekil 34. II nolu dinamik yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta oluşan mil merkezi yörüngeleri	44
Şekil 35. II nolu yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta oluşan yorulma bölgeleri .	45
Şekil 36. II nolu dinamik yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları.....	46
Şekil 37. II nolu yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta 273° krank açısında hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları	47
Şekil 38. II nolu yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları.....	48
Şekil 39. Şekil 38'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan teğetsel gerilmeler.....	48
Şekil 40. Şekil 38'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan radyal gerilmeler	49
Şekil 41. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan teğetsel gerilmeler	50
Şekil 42. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal gerilmeler.....	51
Şekil 43. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan kayma gerilmeleri	52
Şekil 44. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatakta hesaplanan von Mises eş gerilme eğrileri	53
Şekil 45. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal deformasyonlar.....	54

Şekil 46. II nolu yükte 10 mm genişliğindeki yatakta 273° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max} = 1230$ MPa)	55
Şekil 47. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler	56
Şekil 48. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilmeler .	57
Şekil 49. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilmeler .	58
Şekil 50. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler	58
Şekil 51. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilmeler .	59
Şekil 52. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilmeler	60
Şekil 53. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler	61
Şekil 54. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler ...	61
Şekil 55. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler ...	62
Şekil 56. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler	62
Şekil 57. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler ...	63
Şekil 58. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal gerilmeler	64
Şekil 59. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler	65
Şekil 60. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler .	65
Şekil 61. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler .	66
Şekil 62. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler	67
Şekil 63. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler .	67
Şekil 64. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilmeler.....	68
Şekil 65. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	69
Şekil 66. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	70
Şekil 67. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	70
Şekil 68. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	

Şekil 69. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	71
Şekil 70. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları....	72
Şekil 71. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	73
Şekil 72. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	73
Şekil 73. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	74
Şekil 74. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	74
Şekil 75. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	75
Şekil 76. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları....	76
Şekil 77. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	76
Şekil 78. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	77
Şekil 79. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	77
Şekil 80. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	78
Şekil 81. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	78
Şekil 82. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları....	79
Şekil 83. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişlikdeki yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları	80
Şekil 84. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişlikdeki yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	81
Şekil 85. Yatak zarfı yüzeyini 0,107 mm altındaki tabakada hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları	81
Şekil 86. Yatak zarfı yüzeyini 0,213 mm altındaki tabakada hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları	82
Şekil 87. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	82

Şekil 88. Yatak zarfı yüzeyini 0,538 mm altındaki tabakada hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları	83
Şekil 89. II nolu yük altında 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar	84
Şekil 90. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişlikteki yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları.....	85
Şekil 91. II nolu yük altında 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar	86
Şekil 92. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişlikteki yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları.....	87
Şekil 93. 10 mm genişliğindeki yatağın iki ve üç boyutlu çözümleri sonucunda yatak orta eksenini yüzeyinde oluşan teğetsel gerilme dağılımları.....	88
Şekil 94. 10 mm genişliğindeki yatağın iki ve üç boyutlu çözümleri sonucunda yatak orta eksenini yüzeyinde oluşan radyal gerilme dağılımları	88
Şekil 95. 10 mm genişliğindeki yatağın iki ve üç boyutlu çözümleri sonucunda yatak orta eksenini yüzeyinde oluşan radyal deformasyon dağılımları.....	89
Şekil 96. II nolu dinamik yük altında ve 12 mm genişliğindeki yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi.....	90
Şekil 97. II nolu yük altında ve 12 mm genişliğindeki yatakta oluşan yorulma bölgesi....	91
Şekil 98. II nolu dinamik yük altında ve 12 mm genişliğindeki yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları.....	92
Şekil 99. II nolu yük altında ve 12 mm genişliğindeki yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları.....	93
Şekil 100. Şekil 99'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan teğetsel gerilmeler	94
Şekil 101. Şekil 99'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan radyal gerilmeler	94
Şekil 102. II nolu yük altında 12 mm genişliğindeki yatakta 282° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{max} = 866$ MPa)	96
Şekil 103. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilmeler.....	97
Şekil 104. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal gerilmeler.....	99
Şekil 105. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilmeler	100
Şekil 106. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları.	101

Şekil 107. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları..	102
Şekil 108. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları..	103
Şekil 109. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişlikteki yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları	104
Şekil 110. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları	105
Şekil 111. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları.....	106
Şekil 112. II nolu dinamik yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi.....	107
Şekil 113. II nolu yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatakta oluşan yorulma bölgesi..	108
Şekil 114. II nolu dinamik yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları.....	109
Şekil 115. II nolu yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları.....	110
Şekil 116. Şekil 115'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan teğetsel gerilmeler.....	111
Şekil 117. Şekil 115'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan radyal gerilmeler	111
Şekil 118. II nolu yük altında 14 mm genişliğindeki yatakta 283° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{max}= 638$ MPa).....	113
Şekil 119. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilmeler	114
Şekil 120. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları	115
Şekil 121. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları.....	116
Şekil 122. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları..	117
Şekil 123. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları..	118
Şekil 124. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları..	119
Şekil 125. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişlikteki yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları	120

Şekil 126. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları.....	121
Şekil 127. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları.....	122
Şekil 128. III nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı	123
Şekil 129. III nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi	124
Şekil 130. III nolu dinamik yük altında yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi.....	125
Şekil 131. III nolu yük altında yatakta oluşan yorulma bölgeleri.....	126
Şekil 132. III nolu dinamik yük altında yatakta 10° 'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları	127
Şekil 133. III nolu yük altında yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları ...	128
Şekil 134. Şekil 133'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan teğetsel gerilmeler.....	128
Şekil 135. Şekil 133'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan radyal gerilmeler	129
Şekil 136. III nolu yük altında 252° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max}=1154$ MPa).....	131
Şekil 137. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilme dağılımları	132
Şekil 138. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları.....	133
Şekil 139. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları.....	134
Şekil 140. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları.....	135
Şekil 141. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları.....	136
Şekil 142. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları.....	137
Şekil 143. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları.....	138
Şekil 144. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları	139
Şekil 145. III nolu yük altında 252° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları	140

Şekil 146. IV nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı.....	141
Şekil 147. IV nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi.....	141
Şekil 148. IV nolu dinamik yük altında yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi.....	142
Şekil 149. IV nolu yük altında yatakta oluşan yorulma bölgesi.....	143
Şekil 150. IV nolu dinamik yük altında yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları.....	144
Şekil 151. IV nolu yük altında yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları ..	145
Şekil 152. Şekil 151'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan teğetsel gerilmeler	146
Şekil 153. Şekil 151'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan radyal gerilmeler.....	146
Şekil 154. IV nolu yük altında 219° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{max}=982$ MPa).....	148
Şekil 155. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilme dağılımları.....	149
Şekil 156. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları	150
Şekil 157. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları.....	151
Şekil 158. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları.....	152
Şekil 159. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları.....	153
Şekil 160. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları.....	154
Şekil 161. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları.....	155
Şekil 162. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları	156
Şekil 163. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları	157
Şekil 164. V nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı	158
Şekil 165. V nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi.....	158
Şekil 166. V nolu dinamik yük altında yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi.....	159
Şekil 167. V nolu yük altında yatakta oluşan yorulma bölgesi	160

Şekil 168. V nolu dinamik yük altında yatakta 10° 'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları	161
Şekil 169. V nolu yük altında yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları.....	162
Şekil 170. Şekil 169'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan teğetsel gerilmeler	163
Şekil 171. Şekil 169'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan radyal gerilmeler.....	163
Şekil 172. V nolu yük altında 147° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max}=567$ MPa)	165
Şekil 173. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilme dağılımları	166
Şekil 174. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları.....	167
Şekil 175. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları.....	168
Şekil 176. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları.....	169
Şekil 177. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları.....	170
Şekil 178. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları.....	171
Şekil 179. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları.....	172
Şekil 180. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları	173
Şekil 181. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları.....	174
Şekil 182. Çeşitli dinamik yükler altında, beyaz metal alaşımlı ve teflon-bronz tabakalı kaymalı yatakların ortalama basınç ve yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması.....	183
Şekil 183. Üretici firma [36] tarafından verilen yorulma ömrü değerleri ile deneylerde belirlene ömür değerlerinin karşılaştırılması.....	183
Ek Şekil 1. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri.....	197
Ek Şekil 2. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş radyal gerilme eğrileri.....	198
Ek Şekil 3. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri.....	198

Ek Şekil 4. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatakta hesaplanan von Mises eş gerilme eğrileri.....	198
Ek Şekil 5. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal deformasyonlar.....	199
Ek Şekil 6. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler.....	200
Ek Şekil 7. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler.....	200
Ek Şekil 8. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler.....	201
Ek Şekil 9. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler	201
Ek Şekil 10. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler.....	202
Ek Şekil 11. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler	202
Ek Şekil 12. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri	203
Ek Şekil 13. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	203
Ek Şekil 14. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri	204
Ek Şekil 15. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	204
Ek Şekil 16. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri	205
Ek Şekil 17. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	205
Ek Şekil 18. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişlikteki yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	206
Ek Şekil 19. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	206
Ek Şekil 20. II nolu yük altında 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar	207
Ek Şekil 21. II nolu yük altında 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar	208

Ek Şekil 22. II nolu yükte 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri.....	209
Ek Şekil 23. II nolu yükte 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş radyal gerilme eğrileri.....	210
Ek Şekil 24. II nolu yükte 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri.....	210
Ek Şekil 25. II nolu yükte 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatakta hesaplanan von Mises eş gerilme eğrileri	210
Ek Şekil 26. II nolu yükte 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal deformasyonlar.....	211
Ek Şekil 27. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler	212
Ek Şekil 28. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler	212
Ek Şekil 29. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler.....	213
Ek Şekil 30. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler	213
Ek Şekil 31. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler.....	214
Ek Şekil 32. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler	214
Ek Şekil 33. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri	215
Ek Şekil 34. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	215
Ek Şekil 35. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri	216
Ek Şekil 36. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	216
Ek Şekil 37. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri	217
Ek Şekil 38. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	217
Ek Şekil 39. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişlikdeki yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	218
Ek Şekil 40. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	218

Ek Şekil 41. II nolu yük altında 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar	219
Ek Şekil 42. II nolu yük altında 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar	220
Ek Şekil 43. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri.....	221
Ek Şekil 44. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş radyal gerilme eğrileri.....	222
Ek Şekil 45. III nolu yük altında 252° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri.....	222
Ek Şekil 46. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme eğrileri.....	222
Ek Şekil 47. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan radyal deformasyonlar	223
Ek Şekil 48. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler	224
Ek Şekil 49. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler	224
Ek Şekil 50. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler	225
Ek Şekil 51. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler	225
Ek Şekil 52. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler	226
Ek Şekil 53. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler	226
Ek Şekil 54. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	227
Ek Şekil 55. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	227
Ek Şekil 56. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	228
Ek Şekil 57. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	228
Ek Şekil 58. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	229

Ek Şekil 59. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	229
Ek Şekil 60. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	230
Ek Şekil 61. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	230
Ek Şekil 62. III nolu yük altında 252°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar	231
Ek Şekil 63. III nolu yük altında 252°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar.....	232
Ek Şekil 64. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri.....	233
Ek Şekil 65. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş radyal gerilme eğrileri.....	234
Ek Şekil 66. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri.....	234
Ek Şekil 67. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme eğrileri.....	234
Ek Şekil 68. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan radyal deformasyonlar	235
Ek Şekil 69. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler	236
Ek Şekil 70. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler	236
Ek Şekil 71. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler	237
Ek Şekil 72. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler	237
Ek Şekil 73. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler	238
Ek Şekil 74. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler	238
Ek Şekil 75. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	239
Ek Şekil 76. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	239
Ek Şekil 77. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri	240

Ek Şekil 78. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	240
Ek Şekil 79. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	241
Ek Şekil 80. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	241
Ek Şekil 81. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	242
Ek Şekil 82. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	242
Ek Şekil 83. IV nolu yük altında 219°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar	243
Ek Şekil 84. IV nolu yük altında 219°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar.....	244
Ek Şekil 85. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri	245
Ek Şekil 86. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş radyal gerilme eğrileri	246
Ek Şekil 87. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri.....	246
Ek Şekil 88. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme eğrileri.....	246
Ek Şekil 89. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan radyal deformasyonlar.....	247
Ek Şekil 90. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler	248
Ek Şekil 91. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler	248
Ek Şekil 92. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler	249
Ek Şekil 93. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler	249
Ek Şekil 94. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler	250
Ek Şekil 95. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler	250
Ek Şekil 96. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	251

Ek Şekil 97. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri.....	251
Ek Şekil 98. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	252
Ek Şekil 99. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri.....	252
Ek Şekil 100. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	253
Ek Şekil 101. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri.....	253
Ek Şekil 102. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	254
Ek Şekil 103. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları.....	254
Ek Şekil 104. V nolu yük altında 147°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar	255
Ek Şekil 105. V nolu yük altında 147°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar.....	256
Ek Şekil 106. Beyaz metal alaşımlı yataklara uygulanan yük örnekleri	257

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Yatak kesitinin toplam alanı
A_B	: Toplam alan içinde bronzun kapladığı alan
A_P	: Toplam alan içinde PTFE'nin kapladığı alan
E_B	: Bronzun elastisite modülü
E_C	: Çeliğin elastisite modülü
E_K	: Kompozit malzemenin elastisite modülü
E_P	: PTFE'nin elastisite modülü
F	: Yatağa herhangi bir anda uygulanan kuvvet
h	: Yatak zarfı yüzeyinden itibaren olan derinlik
PTFE	: Teflon (Politetrafluroetilen)
P_{max}	: Basınç dağılımında oluşan maksimum tepe basıncı
R_a	: Ortalama pürüz değeri
R_z	: Pürüz yüksekliği
s	: Yatak zarfı kalınlığı
V_B	: Yatakta bronzun hacimsel oranı
V_P	: Yatakta PTFE'nin hacimsel oranı
x,y,z	: Koordinat eksenleri
γ	: Milin konum açısı
ε	: Eksantrisite oranı
φ	: Yatağın çevre açısı
ω	: Milin açısal hızı
ν_B	: Bronzun Poisson oranı
ν_C	: Çeliğin Poisson oranı
ν_K	: Kompozit malzemenin Poisson oranı
ν_P	: PTFE'nin Poisson oranı
σ_{ib}	: Teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde meydana gelen gerilme
$\sigma_{eş}$	: Von Mises eşdeğer gerilme
σ_{max}	: Pozitif değerli olarak hesaplanan en büyük gerilme

- $\sigma_{\min}$: Negatif değerli olarak hesaplanan en büyük gerilme
- σ_x : Teğetsel gerilme
- σ_y : Radyal gerilme
- σ_{iy} : Teflon-bronz tabakası yüzeyinde meydana gelen gerilme
- σ_z : Eksenel gerilme
- τ_{ij} : Kayma gerilmesi
- $\tau_{ij\max}$: Pozitif değerlikli olarak hesaplanan en büyük kayma gerilmesi
- $\tau_{ij\max}$: Negatif değerlikli olarak hesaplanan en büyük kayma gerilmesi
- τ_{ijb} : Teflon-bronz tabakası ile elik destek tabakası birleşim yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmesi
- τ_{ijy} : Teflon-bronz tabakası yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmesi



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Modern motorların, gelişen teknoloji ile daha büyük güç ve daha yüksek hızlarda çalışabilmesi istenmektedir. Bunu gerçekleştirebilmesi büyük oranda yatakların yüklenebilme kabiliyetine bağlıdır. Yatakların daha dizayn aşamasında belli yük, hız ve yağlama koşulları altında emniyetli olarak görevlerini yapabilmeleri uygun tasarım için gereklidir [1]. Bunu sağlamak için yatak geometrisi ve boyutları, yük değişimi, yağlayıcı özellikleri, mil merkezinin yörüngesi, yağ film basıncı dağılımı, minimum film kalınlığı, yatak malzemeleri ve özellikleri gibi yatağın uzun bir süre güvenli olarak çalışmasında etkili olan faktörler hakkında doğru ve eksiksiz bilgiye sahip olunması gerekir. Yataklar ağır çalışma şartları altında birçok olumsuz olayla karşılaşabilmektedir. Bu şartlar altında çalışan yataklarda karşılaşılan en önemli problemlerden birisi, yataklarda yüzey yorulması olayıdır. Yatakların yük taşıma kabiliyetini belirleyen faktörlerden biri olan yorulma olayına farklı konstrüksiyon ve yatak malzemesi seçimi ile uygun çözümler bulunmaya çalışılmaktadır.

1.2. Kaymalı Yataklar ve Yatak Hasarları

Yataklar, makinalarda ortaya çıkan kuvvetlerin karşılanmasında kullanılan destekleme elemanlarıdır. Genel olarak kuvvetlerin taşınmasında, bir yüzeyden diğer bir yüzeye yük iletimi yağ filmi aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu şekilde sürtünme açısından en az kayıp ile darbe ve titreşimleri de sönmüleyebilen bir akışkan tabakası üzerinden taşıma gerçekleştirilmektedir. Kaymalı yataklarda, kendiliğinden yük taşıyıcı bir hidrodinamik yağ filminin oluşması kayma yüzeylerinin geometrisine, bu yüzeylerin birbirine göre hareket ve konumuna bağlıdır.

Genel olarak bir radyal kaymalı yatak sistemi, dönen bir mil, taşıyıcı bir zarf ve bu zarfın üzerinde ince bir tabaka halinde kaplanan yatak alaşımı ile yatak yuvası ve yağlayıcıdan oluşur. Yatak zarfı ve yuvası taşıyıcılık görevi yaparken, zarf yüzeyindeki yatak alaşımı da deformasyona uyum, yabancı sert parçacıkları bünyesine alma, metal-metal

temasında düşük sürtünme direnci gösterme gibi görevleri yerine getirmekte, ayrıca mil, yatak ve yağlayıcı arasında yataklama fonksiyonunu sağlamaktadır [2].

Bilinen herhangi bir yatak malzemesinin işletme, dizayn ve yağlama şartlarından kaynaklanan ihtiyaçları aynı anda karşılayabilmesi mümkün değildir. Bu nedenle belirli çalışma şartlarında, yatak alaşımları arasında amaca en uygun yatak malzemesinin seçimi yapılmalıdır [3].

Kaymalı yataklarda oluşan hasarların analizini yapmak için hasar oluşumuna neden olan etkili parametrelerin birlikte göz önüne alınması gerekir. Bu her zaman mümkün olmamakla birlikte, yatak çalışma şartları altında, herhangi bir hasar türü ile görevini yapamaz hale gelir. Uygulamalarda en çok karşılaşılan hasar türleri, mil ve yatak yüzeylerinin incelenmesiyle belirlenebilmektedir. Kaymalı yataklarda, yatağın ve milin aşınması en çok görülen aşınma şeklidir. Bu tür bir hasar şekli genelde milin harekete geçme ve durması sırasında metal yüzeylerin birbirine sürtünmesi sonucu meydana gelmektedir.

Yataklarda akışkan erozyonu olarak tanımlanan hasar türü, yağlayıcıyla birlikte taşınan yabancı sert parçacıkların kayma yüzeylerine etki ederek kazınma şeklinde yüzey geometresinin bozulmasına neden olmaktadır [2]. Ayrıca minimum yağ filmi kalınlığından daha büyük parçacıklar yağ filmini bozarak, kısmen metal metal teması ile sıcaklık artışlarına neden olmaktadır.

Kaymalı yataklarda korozyon oluşumu yatak alaşımı, mil malzemesi, yağlayıcı ve çevre şartlarının elektrokimyasal etkileşimi sonucu yatak yüzeyinden malzeme kaybı veya yüzeyde istenmeyen malzeme birikimi şeklinde ortaya çıkabilir. Özellikle yatak alaşımını oluşturan elementlerden birinin kimyasal reaksiyona yatkın olması buna neden olabilir [3].

Yağ filmi kavitasyonu, yatak hasar türlerinden olan yorulma çatlaklarının oluşum nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir [5,6]. Özellikle yatak içerisinde, milin yatak yüzeyinden ani olarak hızla uzaklaşması esnasında yağ filmi içinde vakum etkisi nedeniyle habbecik şeklinde boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların yağla doldurulamaması sonucu, periyodik değişen yük etkisinde boşlukları doldurmaya çalışan yağın damlacık şeklinde bulunması, ikinci periyotta yükün bu damlacıklar tarafından taşınmasına neden olmaktadır. Damlacık etkisindeki alanda bası gerilmeleri söz konusu olurken, çeperlerinde ise çeki gerilmesi ortaya çıkmaktadır [5]. Bu şekilde, bu olayın ortaya çıktığı yatak bölgesinde sürekli değişen gerilmelerin, yüzeyin bu noktalarda yorulmasına neden olabileceği ifade edilmektedir [5-8].

Yataklarda oluşan diğer bir hasar türü yüzey yorulması olayıdır. Yüzey yorulması yatak yüzeyinde ortaya çıkan bir kılcal çatlakın ilerleyerek bir malzeme parçacığını çevrelemesi ve bunun sonucu olarak, bu parçacığın yatak yüzeyinden koparak uzaklaşmasıyla sonuçlanan bir hasar türüdür. Bu konu ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler çalışma konusuyla ilgisi bakımından, ileriki bölümde verilecektir.

1.3. Yüzey Yorulması ve Nedenleri

Kaymalı yataklarda yüzey yorulmasının oluşum ve gelişim mekanizmaları hakkında bir çok görüş ileri sürülmektedir. Bunlardan en yaygın olarak bilinen yüzey yorulması mekanizması şöyledir: Yatak yüzeyinde çeşitli nedenlerden ötürü ortaya çıkan değişken gerilme yığılmaları ilk kılcal çatlamlara neden olmakta ve. yatak yüzeyinde başlayan bu çatlaklar, önce yatak alaşımı kalınlığı boyunca çelik destek tabakasına kadar ilerlemekte, bundan sonra ise yön değiştirerek yatak alaşımı çelik destek tabakası ortak yüzeyi boyunca ikinci bir çatlakla karşılaşmaya kadar ilerlemektedir. Böylece çatlaklar arasında, yüzeyden kopan alaşım parçacığı yağlayıcı içinde sürüklenir veya yüzeyler arasında ezilir [5,9]. Yüzeyden kopan malzeme parçacığının bıraktığı boşluk, yağ filmi oluşumunu engelleyerek ve basınç dağılımını bozarak yatağın yük taşıma kapasitesini düşürür ve yağ filmi kalınlığı azalır. Bunun sonucu sıcaklık artışı ile yağlayıcı viskozitesi düşer. Bu olay film kalınlığını iyice düşürür ve yeni sıcaklık artışlarına neden olur. Birbirine bağlı zincirleme gelişen olaylar, sıcaklığın malzemenin dayanabilecek olduğu sınır değerin üzerine çıkmasıyla veya metal metal teması sonucu yatağın tamamen görev yapamaz hale gelmesine neden olur [5,9-11].

Lang ve arkadaşları [12] yaptıkları deneysel çalışmalarda, birbirinin aynı olan yatakları değişik dinamik yükler altında denemişler ve yatak yüzeyinde oluşan yorulma bölgeleriyle malzemenin ısı iletim ve ısıl genleşme özellikleri ile korozyon direncinin önemine dikkat çekerek, yatak yüzeyinde oluşan yorulma çatlaklarının yükün en büyük olduğu bölgelerde olduğunu belirtmişlerdir.

Hirano ve Goto [13], yataklarda yorulmanın karmaşık bir problem olduğunu, alaşım kalınlığı ve radyal boşluğun yanı sıra yorulma olayında değişken yük ve hızdan ötürü ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerinin etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Blundell [14], dinamik yüklü kaymalı yataklarda yorulma kırılmalarının maksimum basınç, sıcaklık dağılımı ve minimum film kalınlığı gibi başlıca yatak parametreleri ile ilgisini

araştırarak, yorulma bölgesinin maksimum basınç ve minimum film kalınlığının ortaya çıktığı bölgeler arasında olduğunu tespit etmiştir.

Forrester ve Chalmers [15], yataklarda yorulmanın oluşum nedenlerini iki ana grup altında göz önüne almışlardır. Birinci grupta yağ film basıncı, sürtünme ve sistemin esnekliğinden kaynaklanan mekanik gerilmeler ile ikinci grupta sıcaklık ve farklı genleşme özelliklerinin neden olduğu ısı gerilmeler şeklinde ele alınabileceğini göstermişlerdir. Sürtünme kuvvetlerinin ise karışık sürtünme bölgesinde önem kazanan gerilme kaynakları olabileceğini ileri sürmüşlerdir [16].

Heisel [17], dinamik yük altında çalışan kaymalı yatağın yağlayıcı yağı içerisine belli oranlarda hava karıştırarak yaptığı film basıncı ölçümlerinde, küçük eksantrisite değerlerinde bile, yüksek basınçlara rastlanabildiğini bunun da yatağın yorulma ömrünü düşürebileceğini belirtmektedir.

Kaymalı yataklarda yüzey yorulmasına neden olan gerilme kaynakları genelde mekanik ve ısı kökenli gerilmeler olarak iki ana grup altında ele alınmaktadır. Bu nedenle bundan sonraki kısımlarda bu konuda yapılmış çalışmalarda ortaya konulan sonuçlar verildi.

1.3.1. Yorulmaya Etki Eden Mekanik Gerilmeler

Kaymalı yataklarda yüzey yorulmasına neden olan en önemli etkenlerden birisi, yağ filminde oluşan basınçtır. Yağ filminde ortaya çıkan basınç dağılımı etkisinde kalan yatak yüzeyinde radyal doğrultuda bası gerilmeleri söz konusu olmaktadır. Teğetsel gerilmeler ise bu basınç alanının içinde bası gerilmesi şeklinde olup basınç alanı bitim noktasında çeki karakterli gerilmeler şeklinde ortaya çıkmaktadır [16-20]. Dinamik yüklü kaymalı yataklarda yükün zamanla değişimi nedeniyle gerilmeler değişken karakter gösterir. Burada ortaya çıkan çeki karakterli teğetsel gerilmelerin yüzey yorulmasına neden olabileceği savunulmaktadır [5,9,17,21]. Sürtünme kuvvetleri nedeniyle oluşan gerilmeler daha çok karışık yağlama bölgesinde çalışan yataklarda önem kazanan gerilmelerdir.

Kaymalı yataklarda önemli gerilme kaynaklarından birisi de yatak zarfı ve yuvasının rijitliğinin zayıf olması gösterilmektedir [22-24]. Tabakalı yataklarda çelik destek tabakası üzerindeki alayım tabakası kalınlığı azaldıkça yorulma direnci artmaktadır [20,23,27].

Pike [28], yatak esnekliği ile alayım zarf sisteminin farklı genleşme özelliklerini göz önüne alarak, çeki karakterli gerilmelerin yorulmaya neden olabileceğini ileri sürmüştür.

İbrahim ve McCallion [29], yatakta oluşan yağ film basıncı, yatak zarfının yuva tarafından sıkıştırılması, hatalı yuva ve farklı genleşme özelliklerine bağlı olarak Navier uygunluk denklemlerini yerdeğiştirmeler cinsinden ele alıp, ortaya çıkan gerilme alanını sonlu farklar yöntemiyle çözerek belirlemişlerdir. Göz önüne aldıkları modelde, yüzey yorulması için en büyük gerilmelerin, yuva rijitliğinin yetersizliğinden ve farklı genleşmelerden ötürü ortaya çıkan ısı gerilmelerden oluştuğunu iddia etmişlerdir [16].

Martin ve arkadaşları [30], yorulma olayını yatak parametreleri ile yataklarda kullanılan malzemelerin özelliklerini göz önüne alarak incelemişlerdir. Deneysel olarak yaptıkları çalışmalarda, maksimum yatak yükü ve maksimum yağ film basıncının yorulma için gerçekçi parametreler olmadıklarını ifade etmişlerdir. Ancak burada yorulma için, yüzeydeki basınç değişimine göre aniden ortaya çıkabilecek negatif basınçların daha önemli olduğunu iddia etmişlerdir. Bu araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda yatak alaşımında oluşan çeki karakterli en büyük gerilmelerin alaşım yatak zarfı ortak yüzeyinde ortaya çıkabileceğini ve ilk yorulma çatlaklarının bu noktalarda başlayabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Hills ve Sackfield [31], göz önüne aldıkları bir kaymalı yatak modelinde değişik eksantrisite oranlarındaki basınç dağılımları altında yatak yüzeyinde, çok küçük bir çatlakın değişken yükleme etkisi altındaki büyümesini incelemişlerdir. Çatlaklarda hesapladıkları gerilmeler yanında, basıncın çatlak yüzeylerine etki ederek çatlakın büyüme ve gelişmesine neden olduklarını ifade etmişlerdir.

1.3.2. Yorulmaya Etki Eden Isıl Gerilmeler

Kaymalı yataklarda milin yatak içerisindeki çalışması sırasında yağlayıcı akışkan tabakasında ortaya çıkan sıcaklık, yağlayıcının özelliklerini değiştirebildiğı gibi yatak malzemeleri üzerinde de olumsuz bir etkiye sahiptir. Özellikle dinamik yüklü yataklarda yükün biçimi ve genliğine bağılı olmak üzere farklı sıcaklık bölgeleri ve sıcaklık dağılımları ortaya çıkabilmektedir [5,16,27,32]. Sıcaklığın yatak malzemelerinin özelliklerini olumsuz yönde etkilediğı bilinmektedir. Bu nedenle kaymalı yataklarda sıcaklığın artması ile yorulma eğiliminin de arttığı yönünde genel bir kanı vardır [7,9,32,33].

Thompson ve arkadaşları [34], yatak zarfı elde edilmesi için çelik şeritler üzerine 400°C'de beyaz metal dökerek soğumaya bıraktıkları numunelerde gözle görülür eğilmelerin ortaya çıktığını belirlemişler ve beyaz metalde çeki gerilmeleri oluştuğunu, bunun da farklı

ısı genleşme özelliklerinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Bu gerilmelerle birlikte yağ film basıncı nedeniyle oluşan bası gerilmeleriyle birlikte yorulma çatlamlarının ortaya çıkabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Bıyıkhoğlu [32] deneysel olarak yaptığı çalışmada, dinamik yüklü yataklarda yorulmanın sıcaklık etkisiyle hızlandığını gözlemlemiş, yükün yalnızca iki parçalı yatağın yarı parçasına etkimesi halinde bölgeler arasındaki sıcaklık farkının 30°C'ye kadar ulaşabildiğini ve böyle bir yüklemde yüklenen yarı parçada yorulmanın daha önce ortaya çıktığını belirlemiştir. Yorulmanın, basınç etkisinin yanında, ortaya çıkan sıcaklıktan da kaynaklanabileceğini savunmuştur.

1.4. Plastik Kaymalı Yataklar

Plastik kaymalı yatak malzemeleri, uzun süre yağlanmadan çalışabilmeleri, iyi kayma ve darbe sönümleme özelliği, düşük sürtünme katsayısı, korozyona karşı yüksek direnç göstermeleri ve uzun ömürlü olmaları nedeniyle yatak uygulamalarında tercih edilmektedirler. Bunların yanında ısı iletim katsayısının düşük, ısı genleşme katsayısının yüksek olması ve düşük mukavemet değeri sergilemesi, olumsuz yanlarını oluşturmaktadır [2,35-39].

Genel olarak plastik yataklar iki şekilde imal edilmektedir. Birinci durumda teflon (PTFE), poliamid (nylon) gibi plastik malzemeler ince cidarlı burç şeklinde çelik, dökme demir veya bronz gibi taşıyıcı zarflara yerleştirilerek imal edilirler [3]. Diğer durumda ise plastik yatakların olumsuz yönlerini gidermek amacıyla yani, daha fazla yük taşıyabilmesi, daha iyi ısı iletimi sağlaması, nem emerek şişmemesi ve sürtünme ısısı nedeniyle yatak boşluğunun azalmasını önlemek için, kompozit yatak şeklinde imal edilmeleridir. Genelde taşıyıcı bir çelik destek tabakası üzerine gözenekli bronz sinterleme yöntemiyle kaplanır. Daha sonra bu gözeneklere ise sıcak haddeme yöntemiyle teflon haddelenir [2,36,37,40]. Burada plastik malzemenin özelliklerini iyileştirmek amacıyla kurşun, karbon, grafit, cam, bronz ve MoS₂ gibi dolgu ve takviye maddeleri ilave edilir [2,35,38,41-46]. Böylece üstün özelliklere sahip plastik kaymalı yataklar elde edilebilmektedir.

1.5. Plastik Yataklar Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Genel olarak, gerek ince cidarlı burç şeklindeki plastik malzemeden yapılan yatakların gerekse çelik destek tabakası üzerinde teflon-bronz plastik tabakası bulunan yatakların sürtünme, aşınma ve yağlanmasına yönelik benzer çalışmalar yapılmıştır [42-45]. Plastik yataklarda ortaya çıkan adezyon, abrazyon, yorulma ve korozyon gibi aşınma türleri arasında kullanma şartlarına bağlı olmak üzere en çok rastlanan aşınma tipi adezyon aşınmasıdır [39,47,48]. Bu hasar türleri genelde yüzey basıncı, temas geometrisi, kayma hızı, çalışma sıcaklığı ve yağlayıcının olup olmaması gibi faktörlerin etkileri göz önüne alınarak incelenmiştir. Ayrıca plastik kaymalı yatak malzemelerinin değişik özelliklerini iyileştirmek üzere dolgu ve takviye maddeleri olarak, Pb, PbO, Cu, CuO₂, grafit, cam, bronz MoS₂ ilave edilerek, sıvı yağ, su, sıvı parafin gibi yağlayıcıların kullanılmasıyla, sürtünme ve aşınma davranışları da belirlenmiştir [49-61]. Dinamik yük altında, çelik, polimetilmetakrilat ve PTFE tabakalı yatak malzemelerinin elastisite modüllerinin kaviteasyon ve sönümleme özellikleri üzerine etkilerini, karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir [62].

Plastik yatakların hidrodinamik sıvı sürtünmesi bölgesinde, özellikle dinamik yük altında çalışma özellikleri henüz detaylı olarak belirlenmemiştir. Sadece bir üretici firma içten yanmalı bir motorun krank mili yataklarında, teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yatakları deneylere tabi tuttuğunu belirtmektedir [63].

1.6. Çalışmanın Amacı

Araştırmacılar kaymalı yataklar için düşük sürtünme katsayısına sahip, ekonomik ve üstün tribolojik özellikleri içeren yeni kaymalı yatak malzemelerinin tribolojik özelliklerinin belirlenmesi üzerine yoğun çalışmalar yürütmektedirler. Bu nedenle araştırmacılar, yağsız çalışabilme, düşük sürtünme katsayısı, uzun ömür gibi özellikleri nedeniyle plastik malzeme esaslı kaymalı yataklar üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmışlardır. Söz konusu bu yatakların makina yapımındaki kullanımları da gün geçtikçe artmaktadır. Teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yataklar, dişli çarklar, kaymalı ve yuvarlanmalı yataklar, kızaklar, hidrolik dişli pompa ve radyal pistonlu pompa yatakları gibi uygulama yerlerinde kullanılmaktadır.

Kaymalı yataklarda en önemli hasar mekanizmalarından biri de yorulmadır. Yapılan literatür araştırması sonucunda plastik tabakalı kaymalı yatakların yorulma davranışı hakkında yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle bu çalışmanın amacı, teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yatakların dinamik yük altındaki yorulma davranışını deneysel olarak incelemek ve yorulma davranışı ile yatakta oluşan gerilmeler arasındaki ilişkileri belirlemektir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

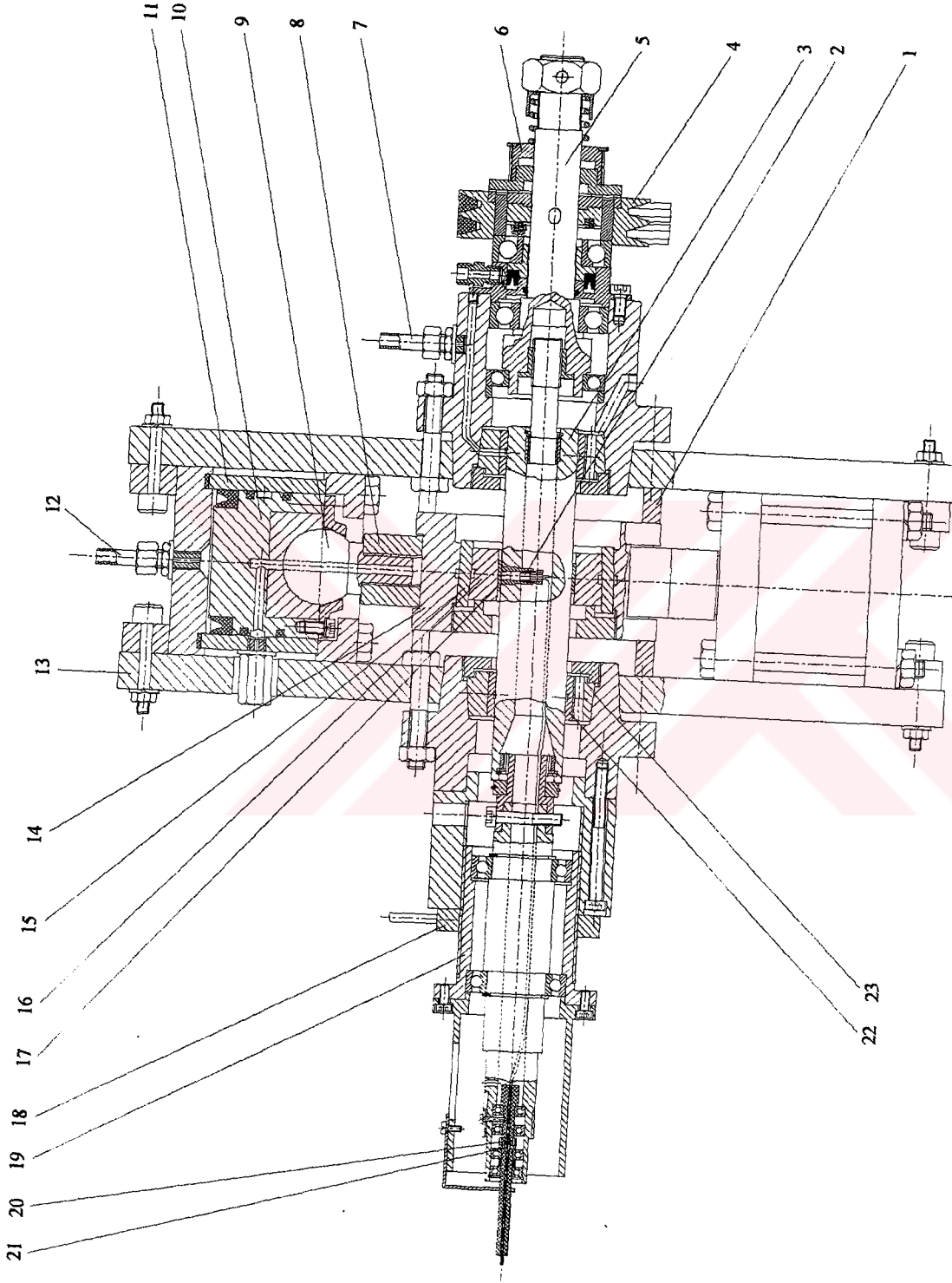
2.1. Deney Düzeneği

Radyal kaymalı yatakların statik veya dinamik yük altında test edilmesinde kullanılabilen deney düzeneği, yüzey yorulması deneyleriyle birlikte kaymalı yatak parametrelerinin, yataklama özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde de kullanılabilmektedir [32]. Herhangi bir radyal kaymalı yatak örneğine istenilen şekil, büyüklük ve frekansta dinamik yük uygulanabilmekte, yükün şekli ve büyüklüğü değiştirilebilmekte, yatak bir eksen doğrultusunda yüksüz durumda iken diğer eksen boyunca yüklenebilmektedir. Bir periyot boyunca yatağa uygulanan yükün değişimi ölçülebilmekte ve kaydedilebilmektedir. Yatağa gönderilen yağ, kontrollü bir ısıtıcıdan geçirilerek yağın yatağa giriş sıcaklığı istenilen değere getirilebilmektedir.

2.1.1. Deney Düzeneğinin Yapısı

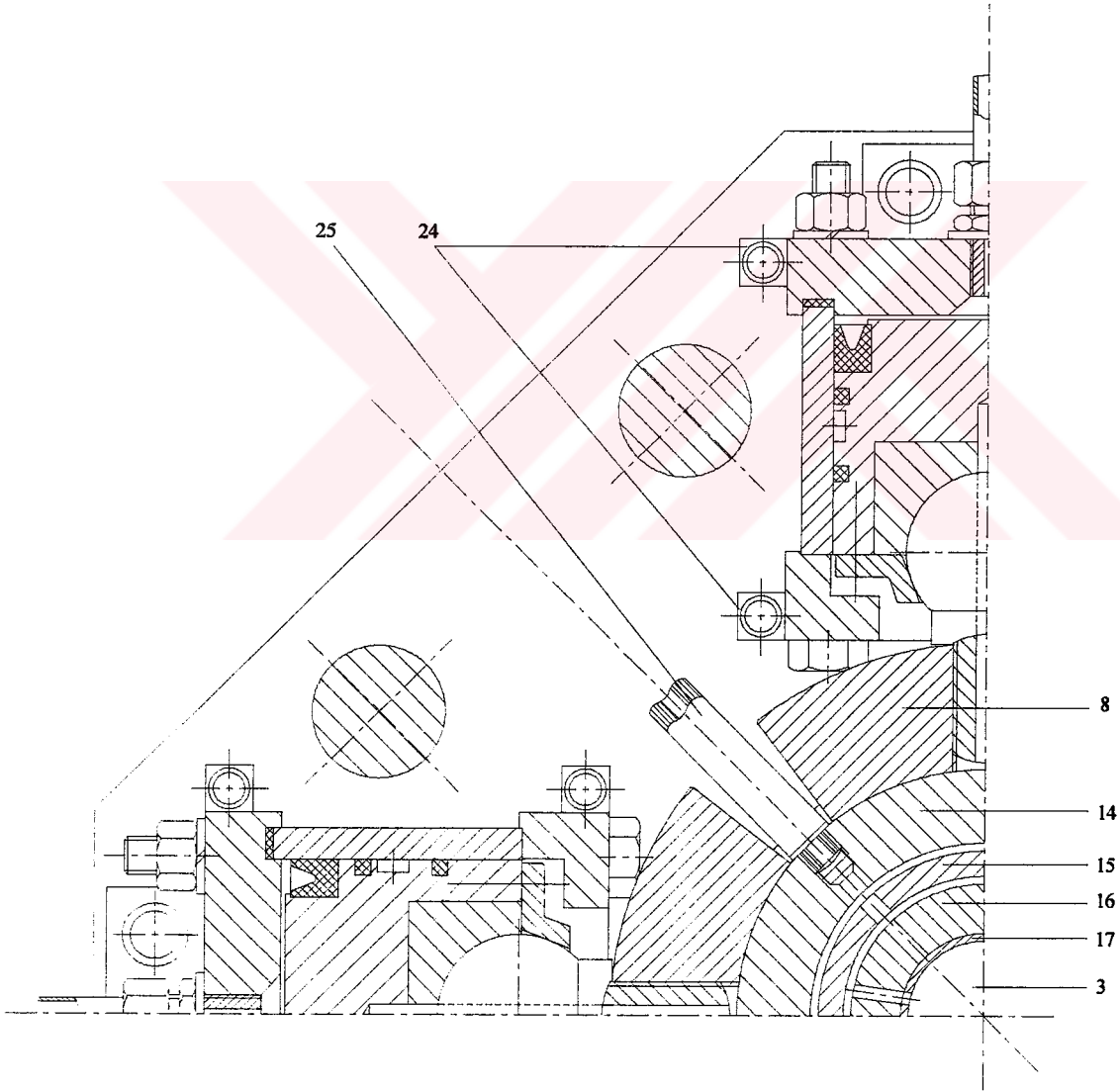
Deney düzeneğinin Şekil 1’de mil eksenini boyunca alınmış bir kesiti, Şekil 2’de ise mil eksenine dik olarak alınmış diğer bir kesiti görülmektedir. Deney düzeneğinin iki ana gövde plakaları (13) arasına düşey doğrultuda ve yatay doğrultuda karşılıklı olarak ikişer adet hidrolik yükleme silindiri (10,11) yerleştirilmiştir. Gövde plakaları sekiz adet bağlantı saplamaları ile sıkı geçme toleransında bağlanarak rijit bir blok oluşturulmuştur.

Test yatağının (17) her iki tarafında yatak yuvaları (23) içine bronz destek yatakları (22) yerleştirilmiştir. Böylece deney milinin (3) gövde içerisinde desteklenmesi sağlanmıştır. Test yatağı yuvasını (14) dört taraftan saran yükleme papuçları (8), pistonlara (10) birer küresel mafsalla bağlanmışlardır. Böylece yatak yuvasının gerekli oynaklığa sahip olması sağlanarak, o andaki şartların gerektirdiği konumu rahatça alabilmesi amaçlanmıştır. Deney düzeneğinin değişik açılardan çekilmiş fotoğrafları Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneginin deney mili eksenli boyunca kesiti

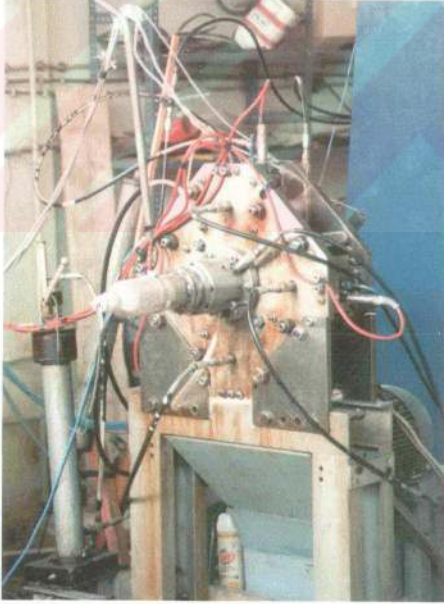
- | | |
|--|---------------------------------|
| 1. Deney yatağı yuvası konum belirleyicisi | 14. Test yatağı yuvası |
| 2. Basınç algılayıcısı | 15. Konik bilezik |
| 3. Deney mili | 16. Yatak kepi |
| 4. Tahrik kasnağı | 17. Test yatağı |
| 5. Takrik mili | 18. Sabitleme somunu |
| 6. Kam tahrik kasnağı | 19. Eksenel hareket burcu |
| 7. Destek yatağı yağ bağlantısı | 20. Fırça |
| 8. Yükleme papucu | 21. Gümüş bilezik |
| 9. Küresel mafsıl | 22. Bronz destek yatağı |
| 10. Piston | 23. Yatak yuvası |
| 11. Silindir Gömleği | 24. Konum belirleyiciler |
| 12. Servo vana bağlantısı | 25. Deney yatağı yağ bağlantısı |
| 13. Ana gövde plakaları | |



Şekil 2. Deney düzeneğinin deney mili eksenine dik kesiti



Şekil 3. Deney düzeneğinin önden görüntüsü



Şekil 4. Deney düzeneğinin sol yandan görüntüsü



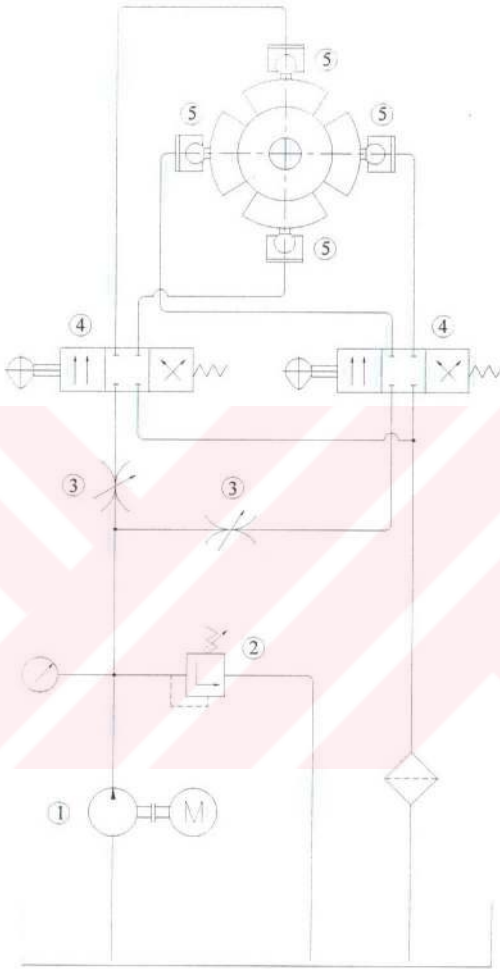
Şekil 5. Deney düzeneğinin sağ yandan ve hidrolik güç ünitesinin görünüşü

2.1.2. Deney Yatağının Yüklenmesi

2.1.2.1. Yükleme Ünitesi

Deney yatağının yüklenmesinde kullanılan hidrolik güç ünitesinin prensip şeması Şekil 6'da görülmektedir. Burada yağ tankı üzerinde elektrik motoru ve dişli pompa (1), basınç sınır vanası (2) ve manometre ile sistemde kullanılacak olan yağın basıncı istenilen değere ayarlanabilmektedir. Burada üzerlerinde kısma vanası (3) bulunan basınçlı akışkan hattı iki kola ayrılmakta ve her kol üzerinde dört yollu üç konumlu sürgülü vananın (4) kumandası altında bulunan aynı eksendeki karşılıklı yükleme silindirlerine (5) basınçlı akışkan gönderilmektedir. Silindirlere gelen basınçlı yağ, pistonları yatak yuvasına doğru itmektedir. Silindirde mevcut basınçla orantılı olarak ortaya çıkan kuvvet, küresel mafsalla pistona bağlı olan yükleme pabucu aracılığı ile yatak yuvasına iletilmektedir.

Kesiti Şekil 7'de görülmekte olan iki adet servo vanadan herbiri A ve B yolları ile aynı eksen üzerinde bulunan karşılıklı iki yükleme silindirini kumanda etmektedir. Sürgünün açılma yönü ve miktarına bağlı olarak A ve B yoluna bir basınç impulsu verilmektedir. Sürgünün konum değiştirmesi, hareketini kayış-kasnak bağlantısıyla tahrik milinden alan bir kam sistemiyle gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ayar civatalarıyla kamlar sürgüye yaklaştırılıp uzaklaştırılabilmektedir. Diğer eksen üzerindeki silindir çifti içinde durum tamamen aynıdır.



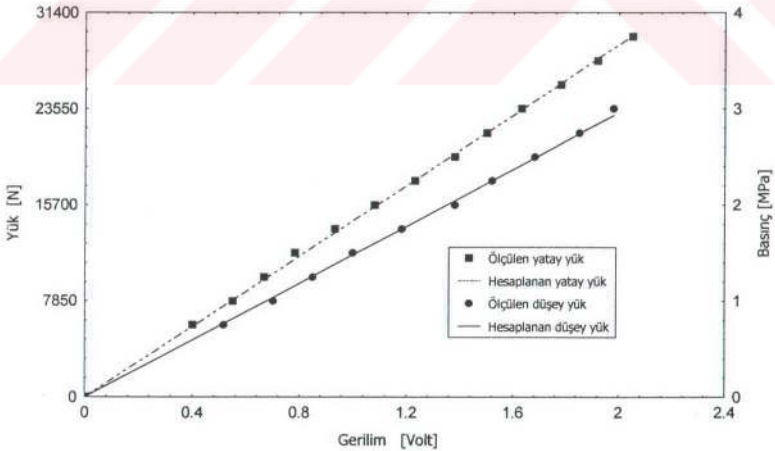
1. Elektrik Motoru-Pompa
2. Basınç Sınır Vanası
3. Kısma Vanası
4. Servo Vana
5. Yükleme Silindirleri

Şekil 6. Hidrolik Donanım

değişimi görülebilmektedir. Osiloskopun her iki kanalı birleştirildiğinde ekran üzerinde dinamik yük diyagramını bütün özellikleriyle görmek mümkün olmaktadır.

Bir eksen doğrultusundaki yük bileşeninin belli bir andaki mutlak değeri, basınç farkıyla piston alanının çarpımına eşittir. Yük diyagramıyla test yatağı aynı eksen takımına sahip olduklarından belirli bir basınç değerine tekabül eden noktadan itibaren belli krank açısı dilimleri için test yatağına gelen yük vektörünün doğrultusunu, yönünü ve büyüklüğünü belirlemek mümkün olabilmektedir.

Hidrolik güç ünitesi silindirde maksimum 5 MPa'lık bir çalışma basıncı meydana getirmektedir. Algılayıcılar, bu basınç aralığında, kademeli olarak değiştirilen statik basınçlarla kalibre edilmişlerdir. Aynı basınç değerleri için yatak yükleri hesaplandıktan sonra algılayıcı çıkışı karşılık gelen yatak yükünün belirlenmesinde kullanılmak üzere, yük algılayıcı çıkışı değer çiftinin kalibrasyon eğrisi belirlenmiştir. Şekil 8'de, P3M/100 basınç algılayıcılarının basınç (yük)-algılayıcı (osiloskop) çıkışı kalibre eğrisi görülmektedir. Deney düzeneğinde düşey eksen ve yatay eksen üzerine karşılıklı olarak yerleştirilmiş ikişer adet hidrolik silindirdeki basıncı ölçecek olan basınç algılayıcıları, silindirde oluşan basınca bağlı olarak (osiloskopta) belli bir gerilim farkı (volt) üretmektedirler. Bu gerilim farkından hareketle Şekil 8'deki kalibrasyon eğrisinden o andaki hidrolik silindirdeki basınç veya yük değeri bulunabilmektedir.



Şekil 8. Basınç veya yük algılayıcılarının kalibrasyon eğrisi

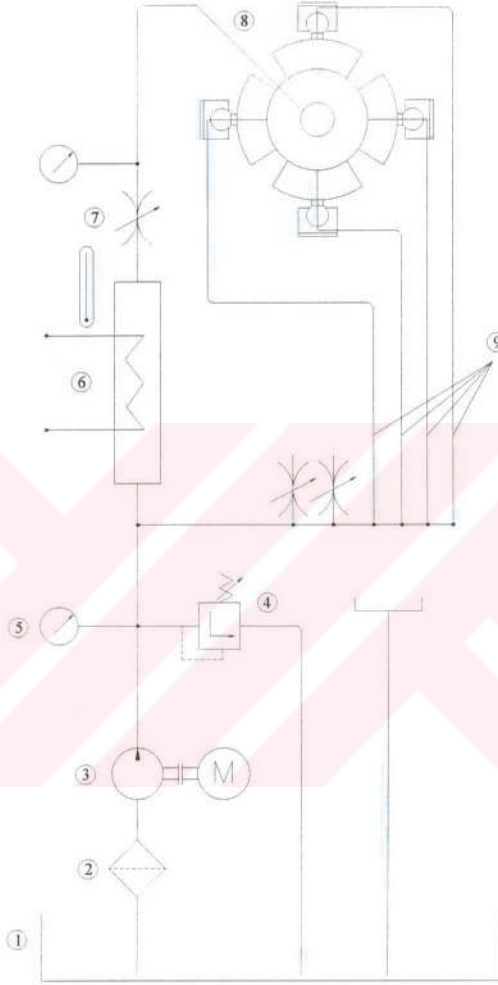
2.1.2.3. Yağlama Ünitesi

Yağlama ünitesinin şematik görünüşü Şekil 9'da verilmiştir. Burada yağlama ünitesi, bir yağ tankı, 1,1 kW gücünde elektrik motoruyla tahrik edilen bir dişli pompa, pompa girişine yerleştirilen filtre, basınç sınır vanası, istenildiğinde devreye sokulabilen bir ısıtıcı, manometreler ve bağlantı hortumlarından oluşmaktadır. Hidrolik güç ünitesi ile yağlama ünitesinde, viskozitesi 50°C de 20,03 cP olan, aynı cins bir hidrolik yağlama yağı kullanıldı. Yağlama ünitesi ile destek yataklarına, test yatağına, yuva-pabuç yüzeyine ve küresel mafsallı yüzeylerine ayrı ayrı yağlama yağı sürekli olarak gönderilmektedir.

2.1.3. Yağ Filmi Basıncını Ölçme Sistemi

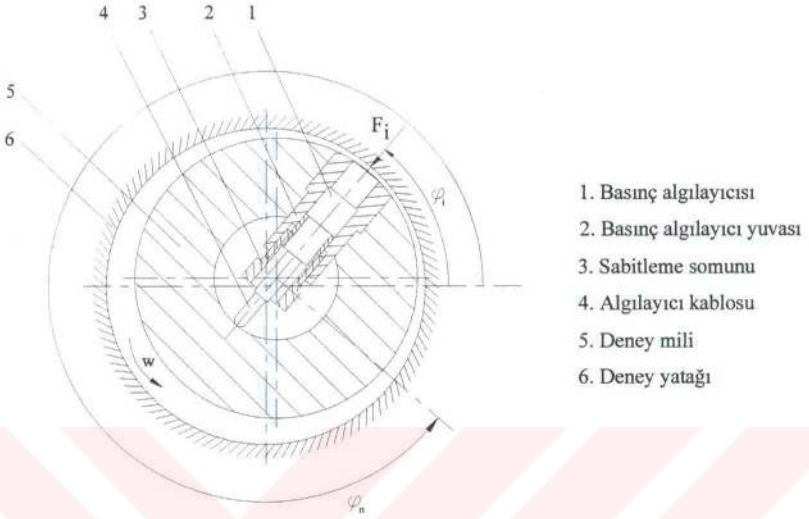
Dinamik yük altında mil ile yatak yüzeyi arasında yağ filminde oluşan basıncı ölçmek için deney miline bir Quartz Pressure Transducer 6005 tipli basınç algılayıcısı yerleştirilmiştir. Algılayıcının mil e yerleşim konstrüksiyonu Şekil 10'da görülmektedir. Yağ filminde algılanan basınç elektriksel sinyale dönüştürülerek bir yükseltici üzerinden data dönüştürücü sistemiyle bilgisayara kaydedilmektedir. Basınç ölçme sisteminin genel yapısı Şekil 11'de görülmektedir.

Yatağa etki eden bir andaki kuvvet etkisinde yatakta oluşan çevresel basıncı ölçülebilmesi için aşağıdaki yol izlenmiştir: Deney mili üzerine bağlı basınç algılayıcısı her bir kuvvet değerinde bulunduğu konumdaki yağ film basıncını ölçmektedir. Bu nedenle bir kuvvet etkisindeki çevresel basınç dağılımını ölçebilmek için kuvvetin etkiye konumu sabit olarak göz önüne alındığında bu konuma karşılık deney milindeki basınç algılayıcısı konumu adım adım değiştirilerek bütün çevre boyunca ortaya çıkan basınç değerlerinin ölçülmesi yapılmıştır, Şekil 10. Bu işlem için geliştirilen konum değiştirme düzeni Şekil 12 ve Şekil 13'te görülmektedir. Burada milin konumuyla dinamik yükün uygulanmasını sağlayan sürgülü vanalara kumanda eden kam mili kasnağının konumu birbirine göre izafi olarak 2°'lik açıda döndürülmesi sağlanmıştır. Burada geliştirilen özel bir konstrüksiyonla test yatağının yüklenmesi sırasında sistem durdurulmadan, sürgülü vanalara kumanda eden kam mili kasnağı konumunun, deney mili kasnağı konumuna göre izafi olarak değişmesi sağlanabilmektedir. Bu işlem hidrolik olarak, kam tahrik kasnağının deney milini çalıştıran tahrik kasnağı ile bağlantısını sağlayan dişli kavramanın çözülmesi ve kasnakların

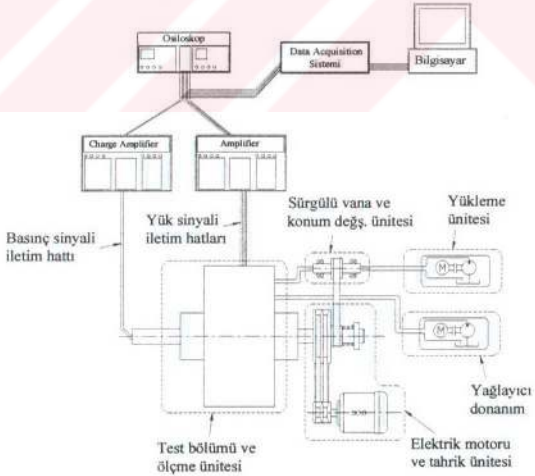


- | | |
|-----------------------------|--|
| 1. Yağ tankı | 6. Isıtıcı |
| 2. Filtre | 7. Kısmi vanası |
| 3. Elektrik motoru ve pompa | 8. Test yatağı yağ girişi |
| 4. Basınç sınır vanası | 9. Yuva-papuç ve küresel mafsallı yağ girişi |
| 5. Manometre | |

Şekil 9. Deney düzeneği yağlama ünitesi

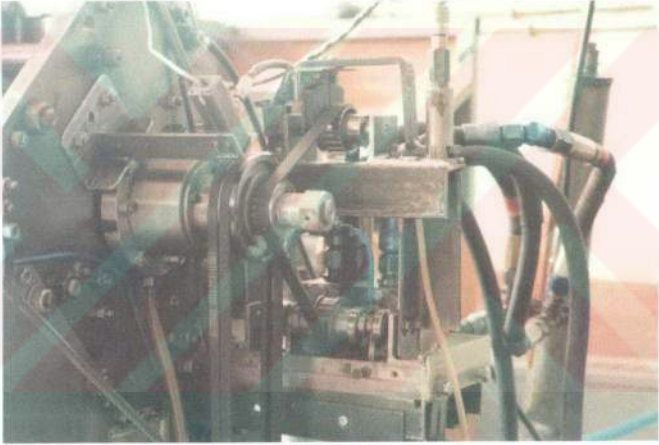


Şekil 10. Basınç algılayıcısının deney mili içindeki konumu ve yağ filminde oluşan basıncın ölçülme sistemi



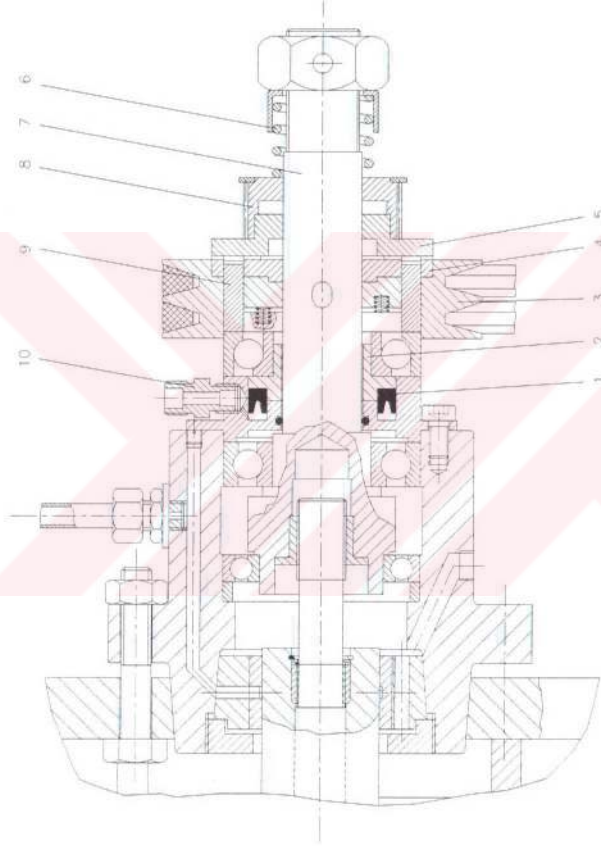
Şekil 11. Deney düzeneğinin şematik görünüşü

zorlanma yönlerinin farklı olması nedeniyle, birbirine göre izafi olarak dönmesi ve tekrar dişli kavramanın devreye girmesi sonucu gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde periyodik olarak yükün değişiminde deney miline bağlı basınç algılayıcısı bir periyotta her bir andaki yatakta oluşan basınç değerlerini ölçebilmekte ve bu ölçüm kaydedebilmektedir. Konum değiştirme düzeni yardımıyla her yük periyodu için 2°'lik atlatma yapılmak suretiyle bilgisayarda kaydedilen yağ filmi basınç değerleri yapılan bir bilgisayar programı yardımıyla her bir dinamik yükte yatağın çevresinde oluşan basınç dağılımı elde edilebilmektedir.



Şekil 12. Konum değiştirme sistemi ve baskı düzeneğinin görüntüsü

Şekil 14’de deney miline yerleştirilmiş basınç algılayıcısıyla ölçülen değerlerin iletilmesinde kullanılan biri sabit diğeri hareketli gümüş bilezik fırça sistemi görülmektedir. Basınç algılayıcısının bulunduğu konumda yataktaki çevresel basınç dağılımı ölçülmesi yanında deney milinin geliştirilen bir konstrüksiyon yardımıyla çalışma sırasında eksenel yönde kaydırılmasıyla yatak yüzeyinde oluşan basınç değerleri ölçülebilmektedir.



- | | | |
|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1. Nut ring | 5. Hareketli alın dişli | 8. Dişli kasnak (kam tahrik kasnağı) |
| 2. Ara bilezik | 6. Baskı yayı | 9. Döndüren dişli |
| 3. Tahrik kasnağı | 7. Tahrik mili | 10. Basınçlı yağ giriş nipeli |
| 4. Sabit alın dişli | | |

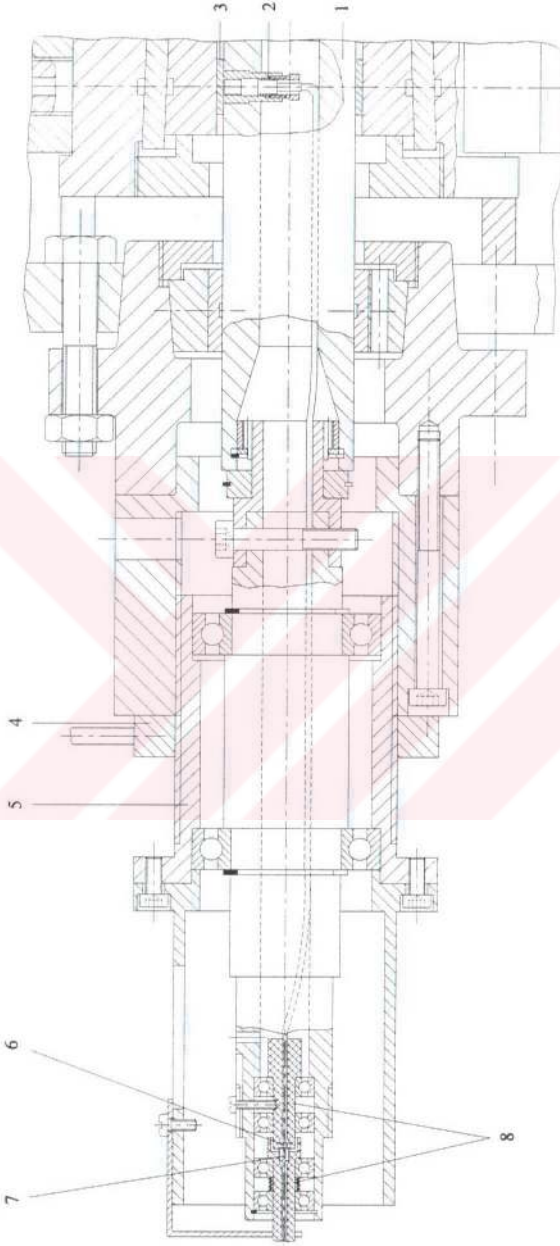
Şekil 13. Konum değiştirme sistemi

Dinamik yük altında çalışan deney yatağı ile mil arasında oluşan yağ filmindeki basıncın ölçümünde Quartz Pressure Transducer kullanıldı. Bu algılayıcı, basınç şoklarında ve ani basınç artışlarında sürekli çalışabilme özelliğine sahiptir ve 100 MPa'a kadar dinamik basınç değerlerini ölçebilmektedir (Şekil 10). Algılayıcı mile yerleştirildikten sonra, sabit basınç sağlayan bir el pompası vasıtasıyla kalibre edildi. Bu işlemler sonucu elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 15'de görülmektedir. Deney sırasında yağ filminde oluşan basınç değerleri, algılayıcıdan alınan sinyaller ile gümüş bilezik - fırça sistemi yardımıyla bir kuvvetlendiriciye (yükselticiye) aktarılmaktadır. Burada kuvvetlendirilen sinyaller, bir osiloskopa gönderilerek ekranda o andaki konum için basınç değeri görülmektedir. Aynı anda bu ölçüm değerleri bilgisayara da kaydedilebilmektedir.

2.1.4. Deney Yatağı

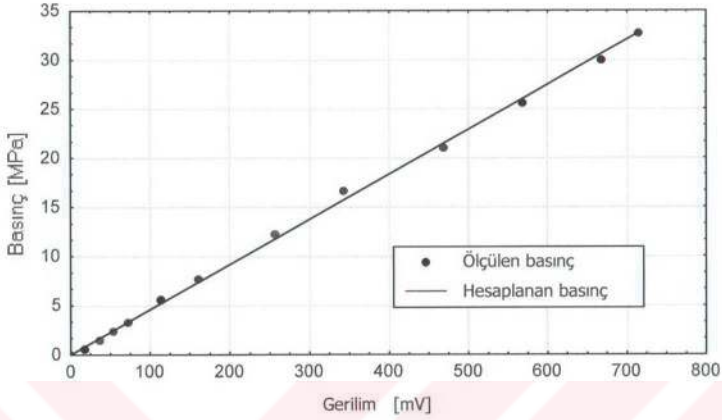
Dinamik yük altında teflon-bronz tabakalı kaymalı yatağın yüzey yorulması deneylerinde kullanılan yatak zarfının, üretici firma kataloğundan alınan kesiti Şekil 16'da verilmektedir. Burada yatak zarfı, taşıyıcılık görevi yapan yaklaşık 2,18 mm kalınlığında çelik destek tabakası üzerinde yaklaşık 0,32 mm kalınlığındaki teflon-bronz tabakasından oluşmaktadır. Yatak zarfının imalatı üretici firma [36,64], tarafından şöyle verilmektedir: Bir çelik destek tabakası üzerine gözenekli bronz tabakası sinterlenmektedir. Bu bronz tabakasının gözeneklerini dolduracak şekilde teflon-kurşun karışımı plastik malzeme, yüzeyde 0,01-0,03 mm kalınlığında kayma tabakası oluşturacak şekilde haddeleme ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca çelik destek tabakasının dış yüzeyi ve kenarları korozyona karşı koruyucu amaçla 2 µm kalınlığında kalayla kaplanmaktadır.

Deneylerde "Permaglide Plain Bearings P10" tipli kaymalı yataklar kullanılmıştır. Yatağın şekli ve boyutları Şekil 17'de görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere yataklardaki yağlama delikleri, yatay eksenle 45°'lik açı yapacak şekilde imal edildiler. Yataklar tek parçalı olup, 0°'de alın birleşim yüzeyi vardır. Deneylerde kullanılan kaymalı yatakların diğer konstrüksiyon bilgileri Ek 1'de verilmiştir.

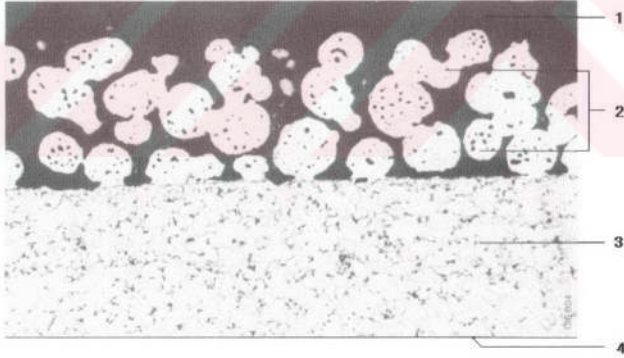


- | | |
|------------------------|----------------------------|
| 1. Deney mili | 5. Eksenel hareket yuvası |
| 2. Basınç algılayıcısı | 6. Fiber yalıtım malzemesi |
| 3. Deney yatağı | 7. Fırça |
| 4. Sabitleme somunu | 8. Gümiş bilezik |

Şekil 14. Basınç algılama sistemi

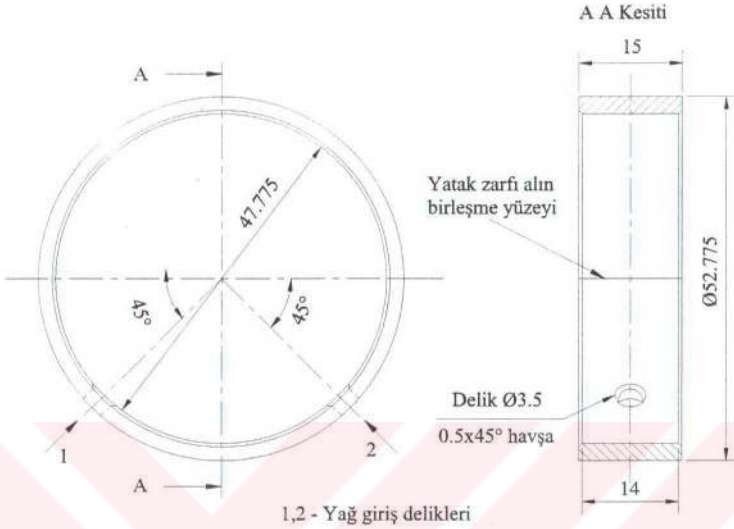


Şekil 15. Basınç algılayıcısının kalibrasyon eğrisi



1. PTFE ve kurşun karışımı kayma tabakası
2. Bronz tabakası
3. Çelik destek tabakası
4. Koruyucu tabaka

Şekil 16. Deney yatağının iç yapısı



Şekil 17. Deney yatağının şekli ve boyutları

2.2. Sayısal Çözüm İçin Yapılan Çalışmalar

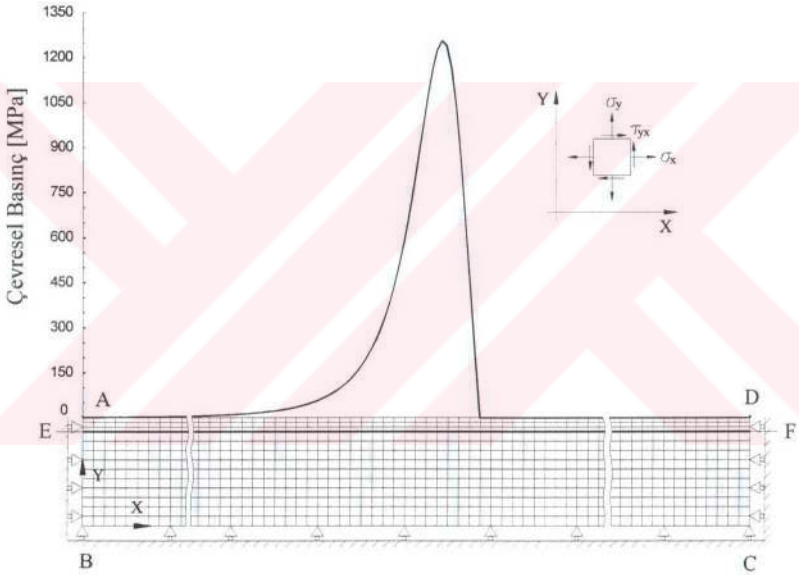
Deney yataklarına uygulanan yük etkisinde, yağ filminde oluşan değişik dağılım gösteren basınçlar altında, yatakta oluşan gerilmeleri ve şekil değişimlerini hesaplamak için sayısal çözümler yapıldı. Bu çözümler gerilmeler ile yorulma davranışı arasındaki ilişkileri belirlemek için yapıldı. Bu çözümlerlerde yataklar iki ve üç boyutlu olmak üzere iki kısımda ele alındı.

Sayısal çözümlerlerde sonlu eleman analizi ve dizaynı için bir bilgisayar programı olan ANSYS [65] kullanıldı. Bu programla dış zorlanmalar altında sonlu elemanlarla tanımlanabilen belirli geometriye sahip elemanlarda ortaya çıkan gerilmeler ve şekil değiştirmeler, 100'den fazla eleman türü ile hesaplanabilmektedir.

2.2.1. İki Boyutlu Yatak Modelleri

Radyal kaymalı yatakların sonlu elemanlar yöntemiyle analizinde iki boyutlu çözümlerde, yatak orta ekseninde ortaya çıkan çevresel basınç değişimi göz önüne alınarak

eksenel yönde basıncın değişmediği kabul edildi. Şekil 18'de görüldüğü gibi yatak zarfının sonlu elemanlarla modellenmesinde zarf AB, BC, CD sınırları boyunca rijit bir yuvaya oturtulmuş olduğu ve bu sınırlarda yer değiştirmeler olmadığı kabul edilmiştir [20,21,22,30]. Burada AD yatağın kayma yüzeyini göstermektedir. AD ile EF arasında kalan sonlu elemanlar ise teflon (PTFE) ve bronz karışımı olan tabakaya karşılık gelmektedir. Yatak zarfının çelik destek tabakası ise EFCB'deki sonlu elemanlar olarak göz önüne alınmıştır. Yatak modellerinde X eksenı yüzey doğrultusunu ve Y eksenı de yüzey normalini göstermektedir.



Şekil 18. Hidrodinamik yağ film basınç dağılımı ve iki boyutlu kaymalı yatak sonlu eleman modeli

Şekil 18'de görüldüğü gibi bir hidrodinamik yağ filmi basıncı etkisinde olan bir kaymalı yatak zarfı, çevresel doğrultuda ve kalınlık boyunca dörtgen tipli sonlu elemanlara ayrılarak modellenmiştir. Yapılan iki boyutlu sayısal çözümlerde Şekil 19'da görüldüğü gibi değişik modelleme örnekleri kullanılmıştır. Şekil 18'de verilen basınç dağılımında eleman sayısı 210, 450, 1000, 1950, 3900, 7800 ve 7560 olarak alındığında, yatak zarf

yüzeyinde elde edilen teğetsel ve radyal gerilmelerin dağılımı sırasıyla Şekil 20’de verilmiştir. Burada gerilme dağılımlarının incelenmesinden de görüldüğü gibi en uygun eleman sayısı, 7560 ve 7800 eleman alındığında elde edilmektedir. Bu nedenle yatak zarflarının sonlu elemanlarla modellenmesinde eleman sayısı olarak bu değerler göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Basınç dağılımının ani değişiminin söz konusu olduğu basınç gradyanı bölgesinde, Şekil 19-g’de verildiği gibi, ağ sıklaştırılması yapılarak daha net çözümler elde edilmeye çalışılmıştır. Çözümlerde sonlu elemanlar tanımlanırken 4 düğüm noktalı ve 8 düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır.

Yatak yüzeyi kabul edilen AD yüzeyine etkiyen yağ film basıncı, bu bölgedeki elemanlar için dış yük olarak göz önüne alınmıştır. Teflon ve bronz karışımı olan AEFD tabakası ile çelik destek tabakasının ortak birleşme yüzeyleri olan EF’de iki malzeme arasında mükemmel birleşme şartlarının sağlandığı varsayılmıştır. Bu nedenle ortak birleşme yüzeyi EF’de, gerilmeler ve yer değiştirmelerin aynı olduğu kabul edilmiştir [20,21,22,30].

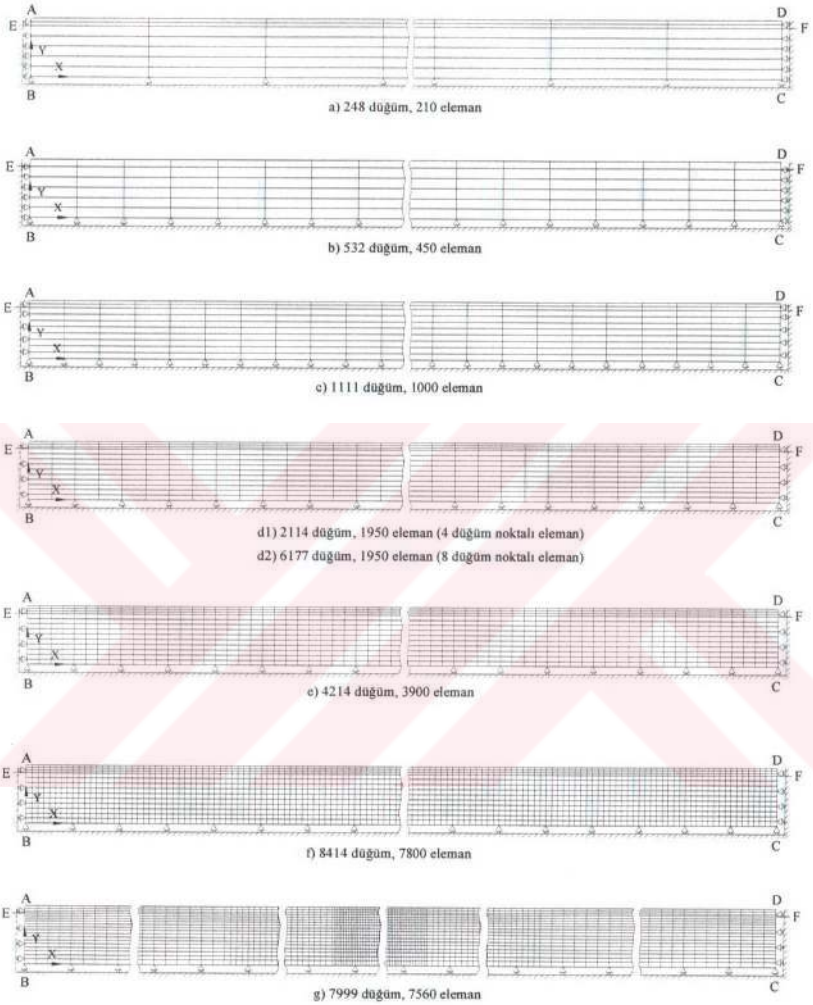
Daha önce Şekil 16’da verilen deney yatağının PTFE kayma tabakasının kalınlığı çok ince (0,01-0,03 mm aralığında) ve PTFE ile bronz karışık olduğundan, bu kısımlar kompozit malzeme gibi düşünülüp, elastisite modülleri ve Poisson oranları yeniden hesaplanmıştır. Bu hesaplama şu şekilde yapıldı: Bütün alan içindeki bronzun (A_B) ve PTFE (A_P) alanlarının, toplam alana (A) oranlarının, elastisite modüllerinin çarpımının toplamı, kompozit malzemenin elastisite modülü olarak bulunmuştur [66]. Bu işlem aynı şekilde Poisson oranı içinde yapılmıştır.

$$E_K = E_B * \frac{A_B}{A} + E_P * \frac{A_P}{A} \quad (1)$$

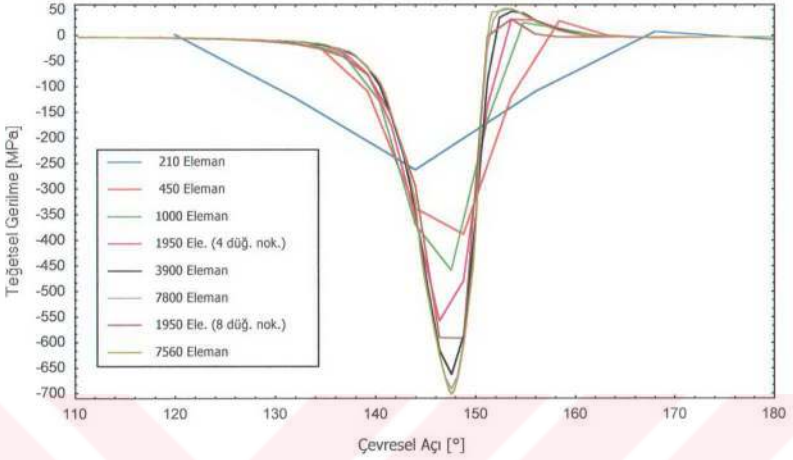
$$V_B = \frac{A_B}{A}, \quad V_P = \frac{A_P}{A} \quad (2)$$

$$E_K = E_B * V_B + E_P * V_P \quad (3)$$

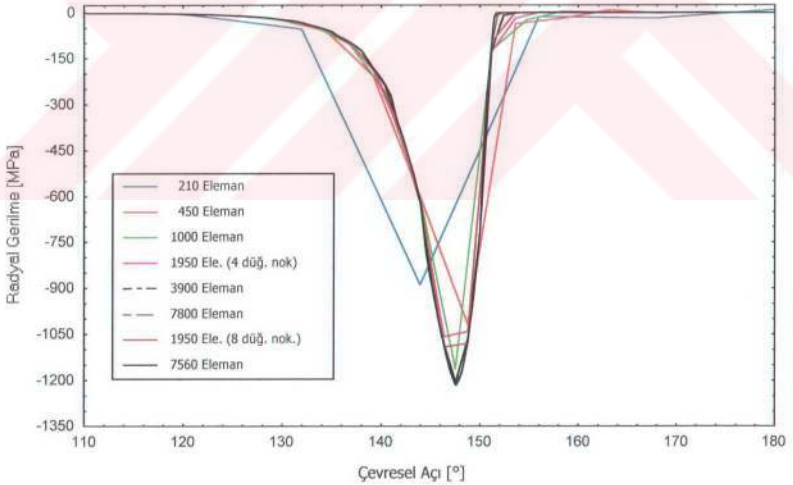
$$\nu_K = \nu_B * \frac{A_B}{A} + \nu_P * \frac{A_P}{A} = \nu_B * V_B + \nu_P * V_P \quad (4)$$



Şekil 19. İki boyutlu sayısal çözümlerde kullanılan modeller



a- Teğetsel gerilmelerin dağılımı



b- Radyal gerilmelerin dağılımı

Şekil 20. Yatak zarfının sonlu elemanlarla modellenmesinde eleman sayısının teğetsel ve radyal gerilime dağılımlarına etkisi

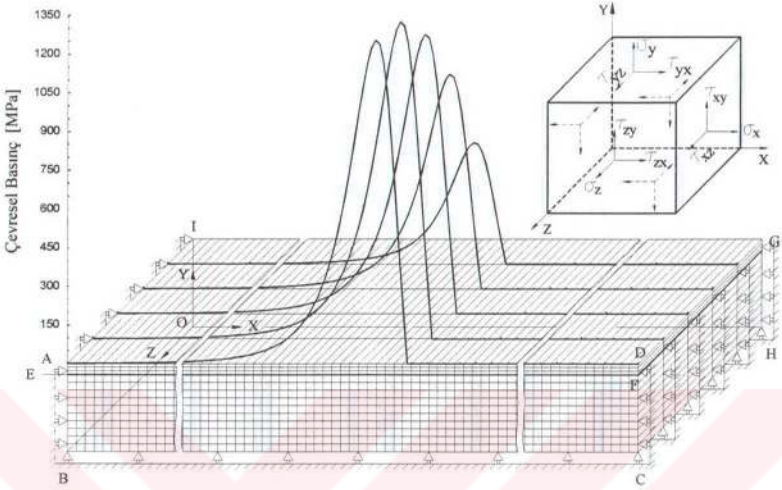
Burada imalatçı firma kataloglarında [64] verilen elastisite modülü (E) değerleri ve Poisson oranları (ν) esas alınarak, kompozit malzeme için elastisite modülü $E_K = 46$ GPa ve Poisson oranı $\nu_K = 0,373$ olarak hesaplanmış, çelik destek tabakası için elastisite modülü $E_C = 210$ GPa ve Poisson oranı $\nu_C = 0,3$ olarak alınmıştır.

Yukarıda belirlenen kabuller altında düzlem şekil değiştirme şartlarının geçerli olduğu yatak modellerinde hidrodinamik yağ filmi basıncı nedeniyle ortaya çıkan gerilmeler ve şekil değiştirmeler ANSYS paket programı yardımıyla hesaplanarak grafikler halinde ortaya koyulmuştur.

2.2.2. Üç Boyutlu Yatak Modelleri

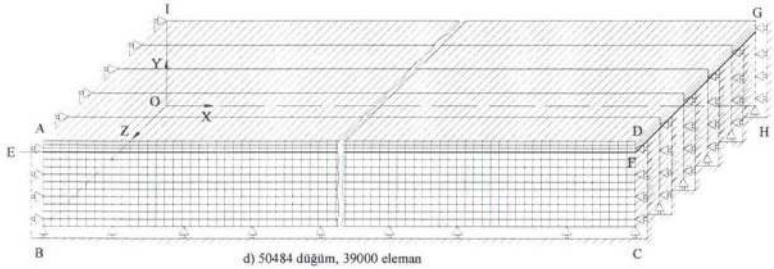
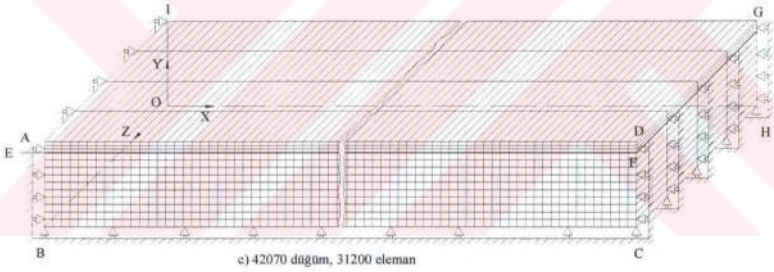
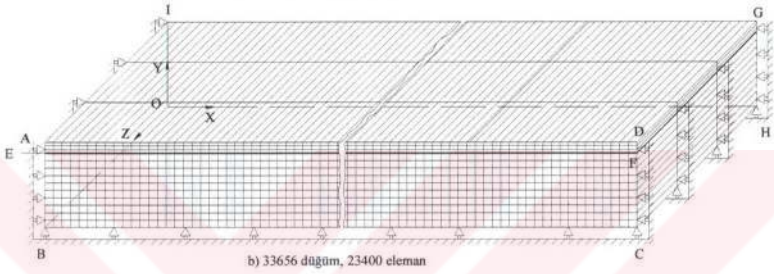
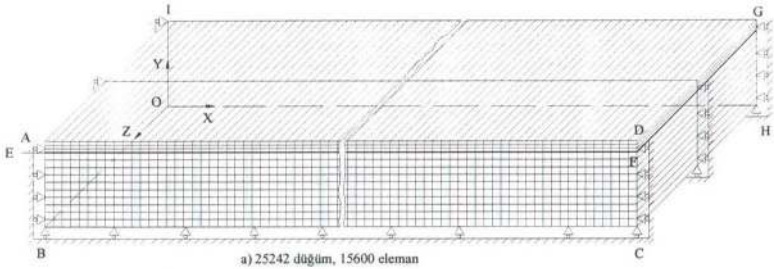
Bir kaymalı yatakta, yük etkisi altındaki yağ filminde oluşan basınç dağılımı, hem çevresel yönde hem de enine yönde değişim gösterir. Bu nedenle, basınç dağılımı etkisinde ortaya çıkan gerilmeleri ve şekil değişimlerini hesaplamak için yatak zarfı üç boyutlu sonlu elemanlar ile modellenmiştir. Yatakta enine doğrultudaki basınç dağılımı simetrik olarak parabolik formda ortaya çıktığından [10,20,22,67,68,69,70], sonlu eleman ile çözümler yapılmasında yatağın yarı genişliği çözüm bölgesi olarak göz önüne alınmıştır, Şekil 21. Burada sonlu elemanlar analizi yapılırken yatak zarfının oturduğu yuvanın rijit (OBCH yüzeyi) ve zarf uç kısımlarından (ABOI ile DCHG yüzeyleri) sınırlandırılarak yer değiştirmelerinin engellenmiş olduğu kabul edilmiştir [20],[22]. Yatağın yağ filmi basıncı etkisinde, hem zarf kalınlığı hem de eksenel doğrultuda şekil değişimi yapabildiği, hesaplarda göz önüne alınmıştır. Yağ giriş delikleri, gerek yağ film basınçlarının hesaplanmasında gerekse yatak zarfının modellenmesinde, yatak zarfının yüklenen bölgesi dışında olacak şekilde göz önüne alınmışlardır. Bu nedenle hesaplamalarda yağ giriş delikleri ihmal edilmişlerdir. Yatak zarfının sonlu elemanlarla modellenmesinde, Şekil 19-f'de verilen iki boyutlu modellemeye olduğu gibi, yatak zarfı kalınlığı boyunca benzer modelleme göz önüne alınmıştır. Burada teflon ve bronz karışımı olan tabaka (AEFD) ile çelik destek tabakasının (EBCF) sonlu elemanlarla modellenmesinde, enine doğrultuda aynı elemanlar devam ettirilerek çözüm üç boyutlu hale getirilmiştir.

Şekil 21'de görülen OB uzunluğu, eksenel doğrultudaki yatak yarı genişliğidir. İki boyutlu çözümlerde olduğu gibi tabakalar arasındaki ortak yüzeyde ideal birleşme şartlarının geçerli olduğu varsayılarak, benzer kabuller altında üç boyutlu modellemelerde hesaplamalar yapılmıştır.

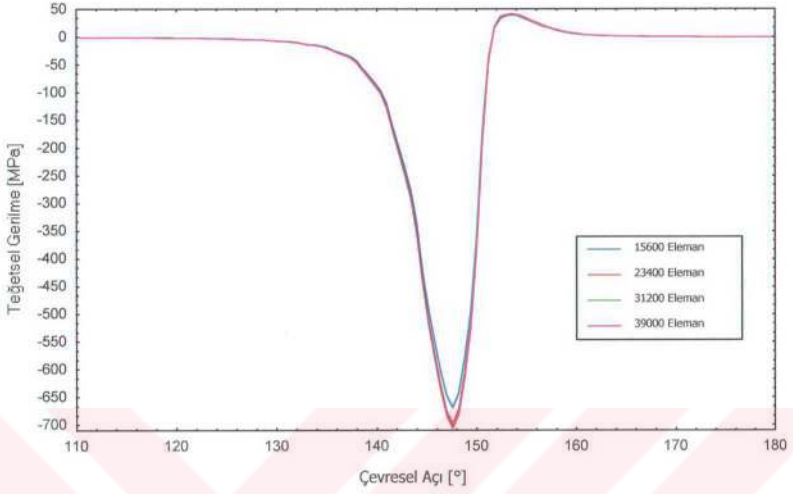


Şekil 21. Yataкта oluşan üç boyutlu hidrodinamik basınç dağılımı ve kaymalı yatak sonlu eleman modeli

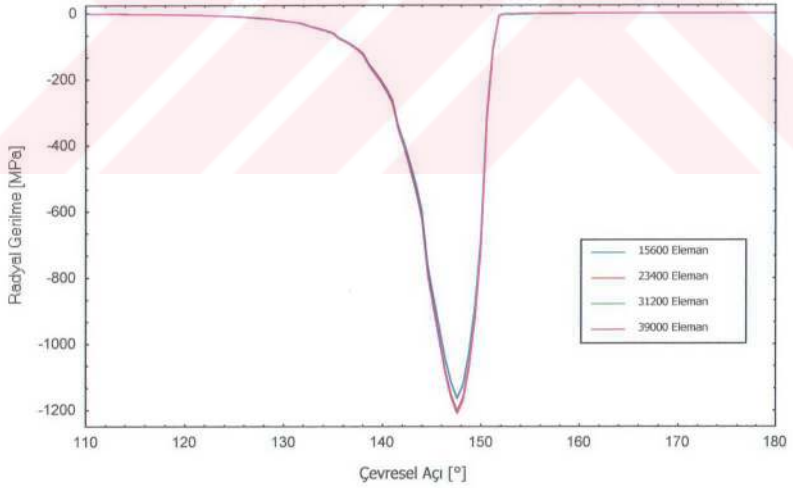
Üç boyutlu sayısal çözümlerde kullanılan modelleme örnekleri, eleman ve düğüm sayıları Şekil 22'de verilmektedir. Burada yatak zarfının enine yönde modellenmesi 2, 3, 4 ve 5 elemanlı olarak göz önüne alınmıştır. Şekil 21'de verilen basınç dağılımı etkisinde yapılan sonlu elemanlar çözümünüyle, yatak orta kesiti ve zarf yüzeyinde elde edilen gerilme dağılımları Şekil 23'te görülmektedir. Teğetsel, radyal ve eksenel gerilme dağılımlarının incelenmesinden de görüldüğü gibi en düzgün gerilme dağılımı yatak zarfının enine yönde 5 elemanlı olarak alınması durumunda elde edilmektedir. Bu nedenle üç boyutlu olarak yapılan çözümlerde Şekil 22-d'de verilen modelleme göz önüne alınmıştır. Burada yapılan sayısal çözümlerde 8 düğüm noktalı prizmatik elemanlar kullanılmıştır.



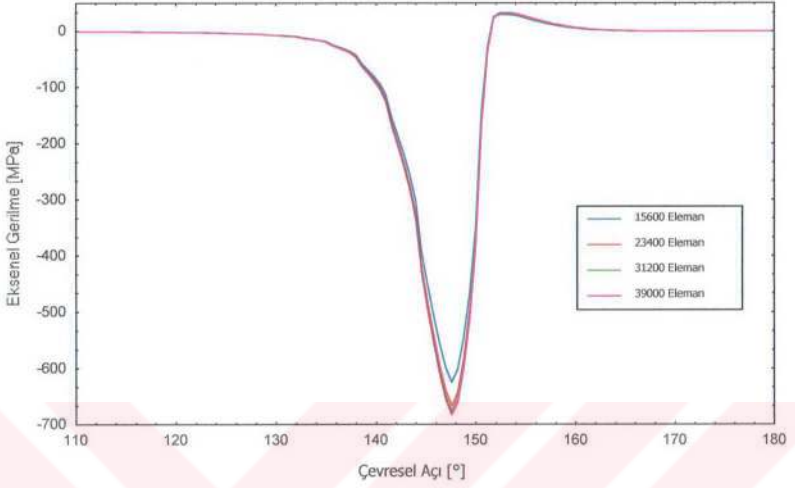
Şekil 22. Üç boyutlu sayısal çözümlerde kullanılan modeller



a- Teğetsel gerilme dağılımı



b- Radyal gerilme dağılımı



c- Eksenel gerilme dağılımı

Şekil 23. Yatak zarfının üç boyutlu modellenmesinde eleman sayılarının gerilme dağılımlarına etkisi

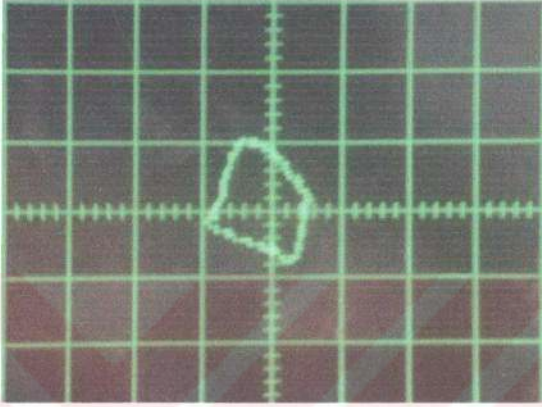
3. BULGULAR

3.1. I Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular

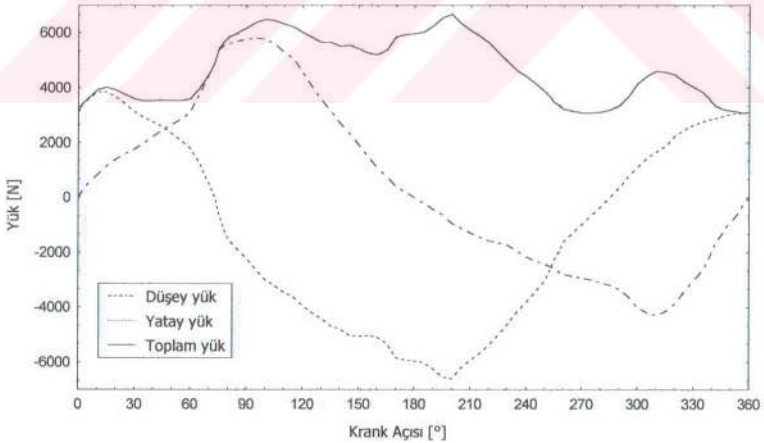
Dinamik yük altında çalışan teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yatakların yüzey yorulması deneylerinde, yük frekansı ile mil frekansı aynı (1240 d/dak) değerde belirlenmiştir. Deneylerde, milin dönme yönü ile polar yükün dönme yönü saat ibrelerinin tersi yönünde alınmıştır. Ayrıca deneylerde test yatağına gönderilen yağın sıcaklığı, yağ tankı içine yerleştirilmiş bir ısı değiştiricisinin soğutma debisinin ayarlanmasıyla, yağın test yatağından çıkış sıcaklığı 50°C sabit değere ayarlanmıştır.

Plastik yatakların dinamik yük etkisinde yorulma ömürleri ve yorulma bölgeleri ile yorulma çatlaklarının oluşum formlarının belirlenmesi için yapılan deneylerde göz önüne alınan dinamik yük örneği Şekil 24'de görülmektedir. Bu dinamik yükün zamana göre değişimini ifade eden her bir krank açısındaki düşey ve yatay eksenlerdeki kuvvet değerleri ile bunların bileşkesi olan toplam kuvvet değerlerinin değişimi ise Şekil 25'de verilmektedir. Yapılan her bir deney için, yatağa uygulanan dinamik yük ve yatak büyüklükleri göz önüne alınıp, Schaffrath [71] tarafından verilen çözüm yöntemi kullanılarak, mil yörüngesi ve her bir krank açısındaki yağ film basınç değişimleri hesaplanmıştır [72]. Bu çözüm yönteminde Reynolds sınır şartları kullanılmıştır. Ayrıca mil yörüngeleri hesabı için, paket program olarak verilen Ricardo [73] hesaplama yöntemine göre elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak, uygunlukları belirtilmiştir. I nolu dinamik yük etkisinde 19,5 mm genişliğindeki yataкта ortaya çıkan mil yörüngesi dağılımı Şekil 26'da görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, mil yörüngeleri birbiriyle uyum içerisinde. Şekil 27'de krank açısına göre yatağa uygulanan dinamik yük ile Harbordt'a göre hesaplanan eksantrisite oranı değerlerinin değişimi verilmektedir. Burada en büyük yük değerleri 185° ile 210° krank açısı aralığında uygulanmakta ve maksimum yük değeri ise 200°'lik krank açısında 6680,6 N olmaktadır. Bu çalışmada en büyük yükün uygulandığı 200°'lik krank açısında ortaya çıkan eksantrisite oranı 0,93678, minimum yağ filmi kalınlığının ortaya çıktığı 255° krank açısındaki eksantrisite oranı ise 0,95133 olarak belirlendi. Harbordt'a göre I nolu dinamik yük etkisinde yataкта ortaya çıkan her 10°'deki çevresel basınç dağılımları Şekil 28'de görülmektedir. Burada maksimum basınçlar 170° ile 220° krank açısı aralığında ortaya çıkmakta olup, deney yatağının 155° ile 240°'lik

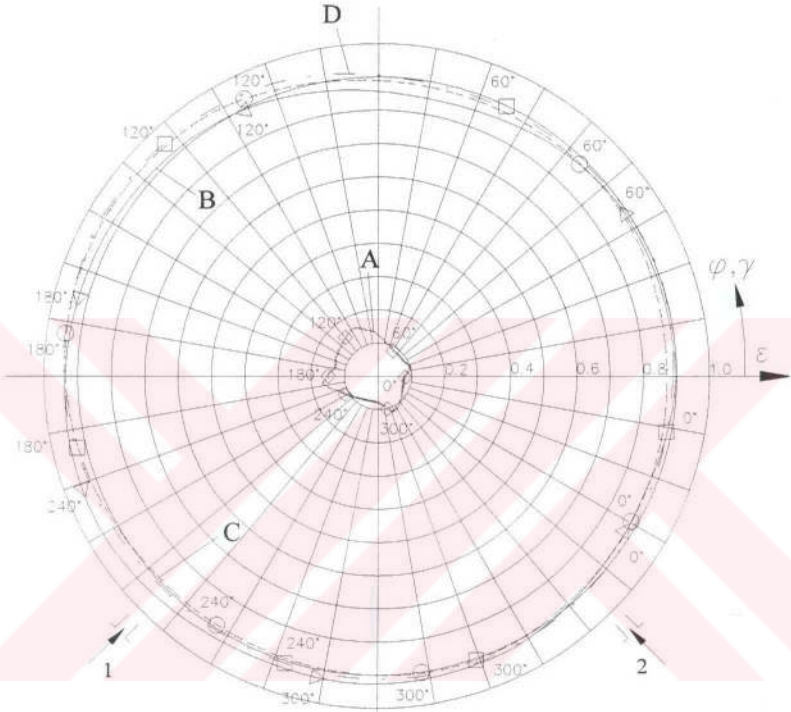
çevresel konumuna etki etmektedirler. Burada kullanılan program yatak zarfı alın birleşim yüzeyini enine bir kanal olarak kabul etmektedir. Bu nedenle tek bir kuvvette kanalın her iki tarafında da basınç dağılımları ortaya çıkmaktadır, Şekil 28.



Şekil 24. I nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı



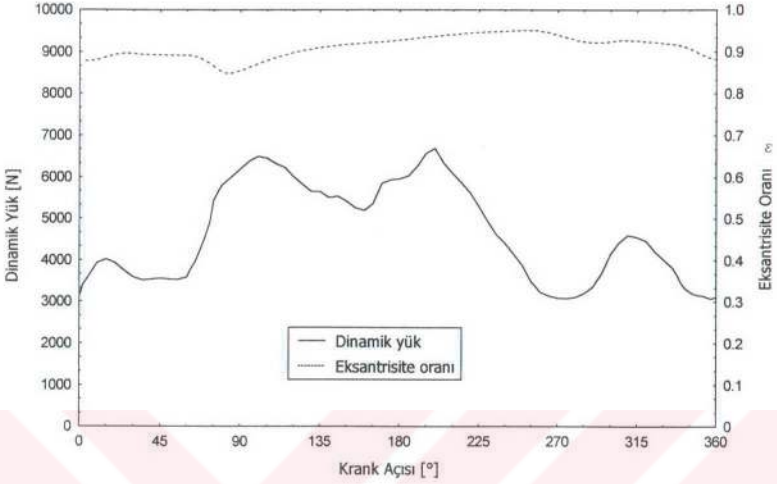
Şekil 25. I nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi



- A - Polar yük diyagramı
 B - Mil merkezi yörüngesi (Harbordt prog.)
 C - Mil merkezi yörüngesi (Ricardo - Mobility)
 D - Mil merkezi yörüngesi (Ricardo - Sonlu Hacim)
 1,2- Yağ giriş delikleri

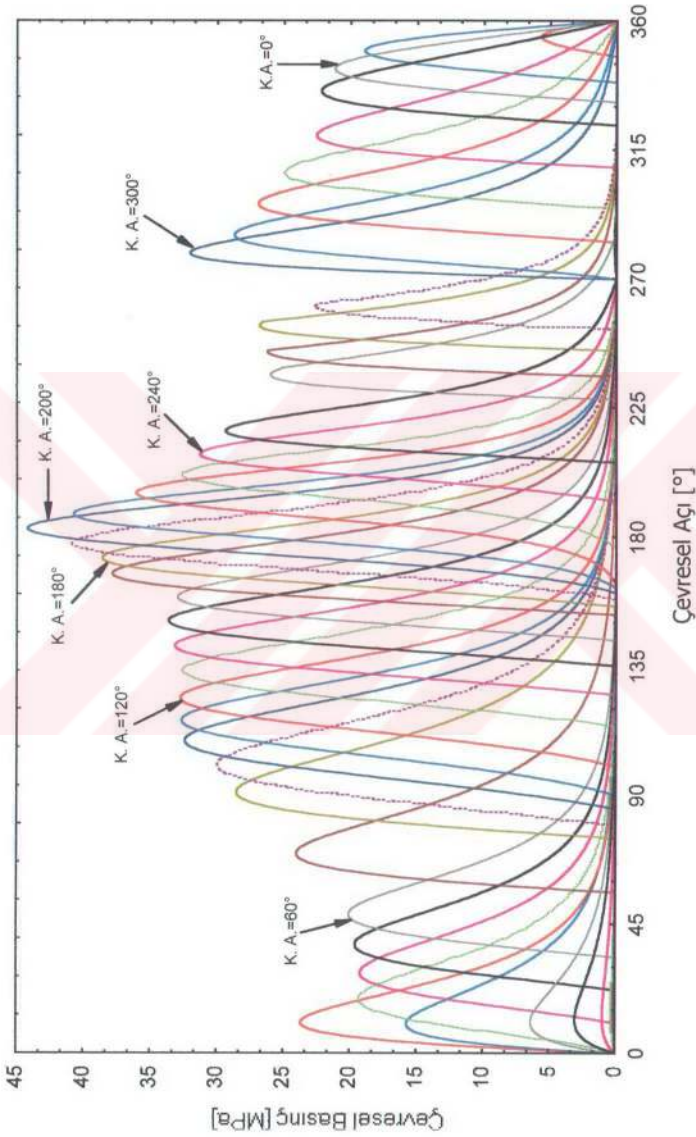
ϕ, γ
 ε

Şekil 26. I nolu dinamik yük altında ve 19,5 mm genişliğindeki yataкта oluşan mil merkezi yörüngeleri

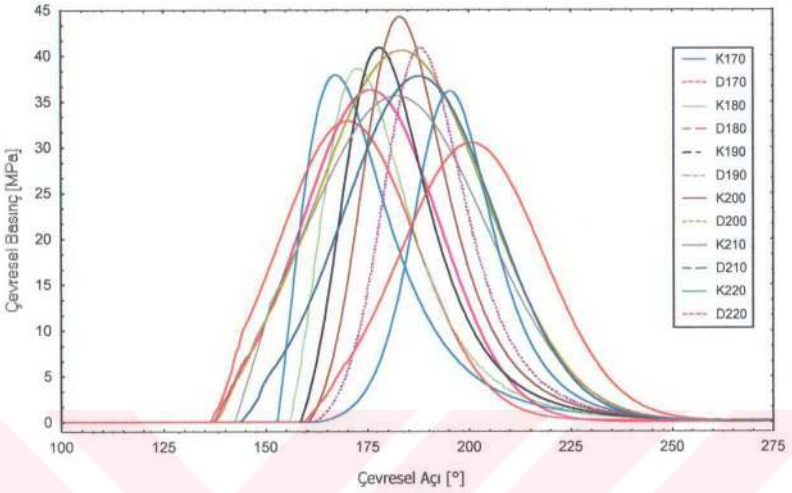


Şekil 27. I nolu dinamik yükün ve eksantrisite oranının krank açısıyla değişimi

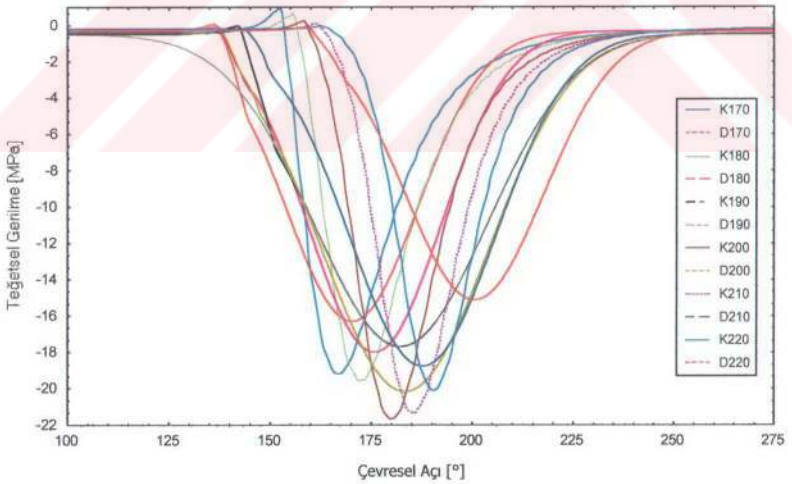
Yatağa uygulanan I nolu dinamik yük etkisi altında yağ filminde ortaya çıkan basınç ve bunların dağılımları, geliştirilen ölçme düzeneği ile ölçüldü. Şekil 29'da ölçülen ve hesaplanan yağ film basınç dağılımları verilmektedir. Dağılımların incelenmesinden de görüldüğü gibi hesaplanan ve ölçülen değerler arasında uygun bir uyum söz konusudur. Burada gerek hesaplanan ve gerekse ölçülen basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel ve radyal gerilme dağılımları Şekil 30'da verilmektedir. Söz konusu basınç dağılımları altında teğetsel çeki gerilmelerinde en büyük değerler, ölçülen basınç dağılımlarında 0.07 MPa, hesaplanan basınç dağılımlarında ise 1 MPa, civarlarındadır. Teğetsel bası gerilmelerinin en büyük değerleri hesaplanan basınç dağılımları için 21,7 MPa, ölçülen basınç dağılımları için de 20,2 MPa olmaktadır. Genel olarak gerilme dağılımları aynı eğilimde değişim göstermektedir, Şekil 30. Ölçülen ve hesaplanan basınç dağılımları etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal gerilmeler basınç dağılımına uygun bası gerilmeleri oluşturmaktadırlar, Şekil 31.



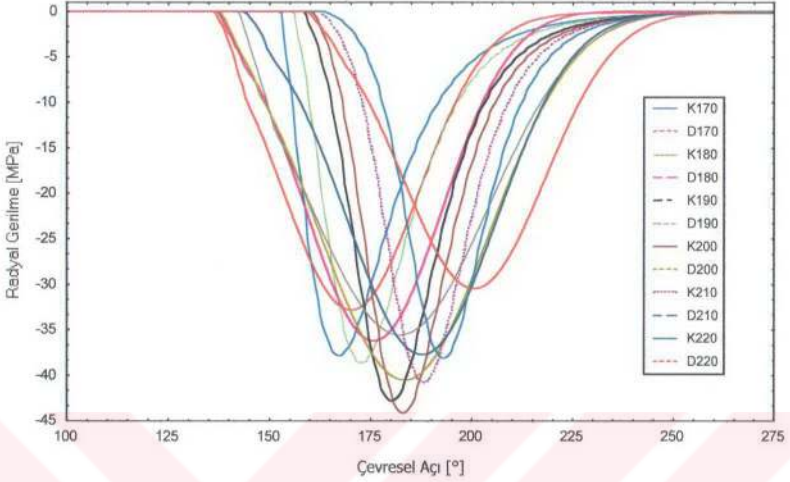
Şekil 28. I nolu dinamik yük altında ve 19,5 mm genişliğindeki yataкта 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları



Şekil 29. I nolu dinamik yük altında krank açısının 170° ile 220° arasındaki değerlerinde hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları



Şekil 30. I nolu yük altında hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler



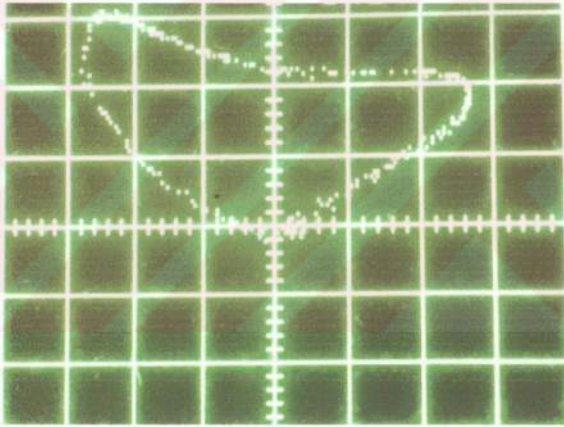
Şekil 31. I nolu yük altında hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler

Seçilen I nolu dinamik yükleme durumunda (Şekil 24), teflon-bronz tabakalı test yatağı yaklaşık 200 saatin üzerinde deneye tabi tutulmuş, ancak yatakta gözle ve büyüteçle yapılan incelemeler sonucunda herhangi bir yorulma belirtisine rastlanmamıştır. Bu nedenle bu yük altında daha fazla deneye devam edilmemiş, bundan sonraki deneylerde yükün artırılması ve yataklama alanının küçültülmesinin gerektiği sonucu çıkartılmıştır. Bu nedenle daha sonraki yüklemelerde daha büyük genlikli dinamik yük göz önüne alınarak yorulma çatlakları oluşturulmaya çalışılmıştır.

3.2. II Nolu Dinamik Yükle Elde Edilen Bulgular

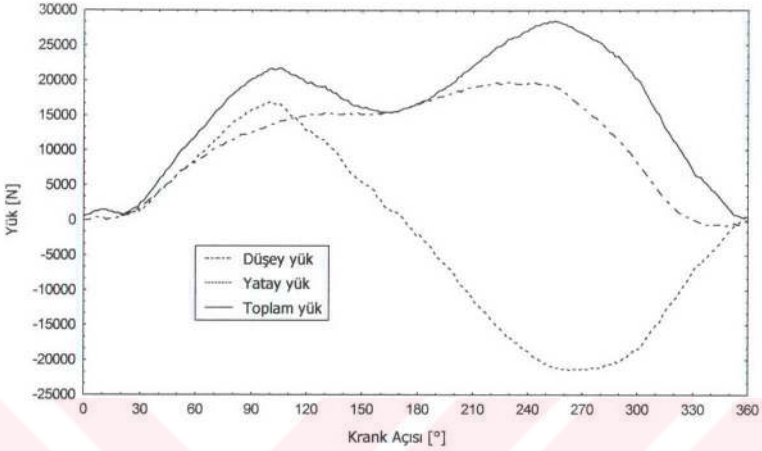
I nolu dinamik yükle yapılan deneylerden sonraki deneyler iki ayrı yaklaşımla ele alınmıştır. İlk olarak bir yük örneğinde, değişik yatak genişliklerinde ortaya çıkan yorulma bölgeleri, kılcal çatlakların dağılımı ve gerilme analizi ile etkili büyüklüklerin değişimi incelenmiştir. İkinci olarak da, sabit yatak genişliğinde, değişik dinamik yük örneklerinde yukarıda açıklanan incelemeler yapılmıştır.

Plastik tabakalı yatakların üzerine yapılan yüzey yorulması deneylerinde, yatağa uygulanan II nolu dinamik yükün osiloskoptan alınmış görüntüsü Şekil 32’de polar diyagram şeklinde görülmektedir. Bu dinamik yük örneğinin yatay ve düşey eksen üzerindeki değişimleri ile bunların bileşkesi olan toplam yükün aynı periyod içindeki değişimi Şekil 33’de verilmektedir. II nolu yük örneğinin gerek polar diyagramı gerekse eksenler üzerindeki bileşenleri incelendiğinde; düşey eksendeki bileşen titreşimli yük, yatay eksendeki bileşen ise sintüs formulu değişken bir yük şeklinde etki etmektedir. Burada polar yük yatak zarfının üst bölgesine etki edecek şekilde belirlenmiştir. Yatağa etki eden maksimum yük değerleri 238° ile 267° ’lik krank açıları arasında olup, en büyük değerini 255° ’lik krank açısında 28558 N olarak almaktadır, Şekil 33.



Şekil 32. II nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı

Burada II nolu dinamik yükleme durumunda yataklama alanının yatağın yorulma ömrü ve yorulma bölgeleri üzerindeki etkilerini incelemek için yatak genişliği 10 mm, 12 mm ve 14 mm olarak alınmıştır.



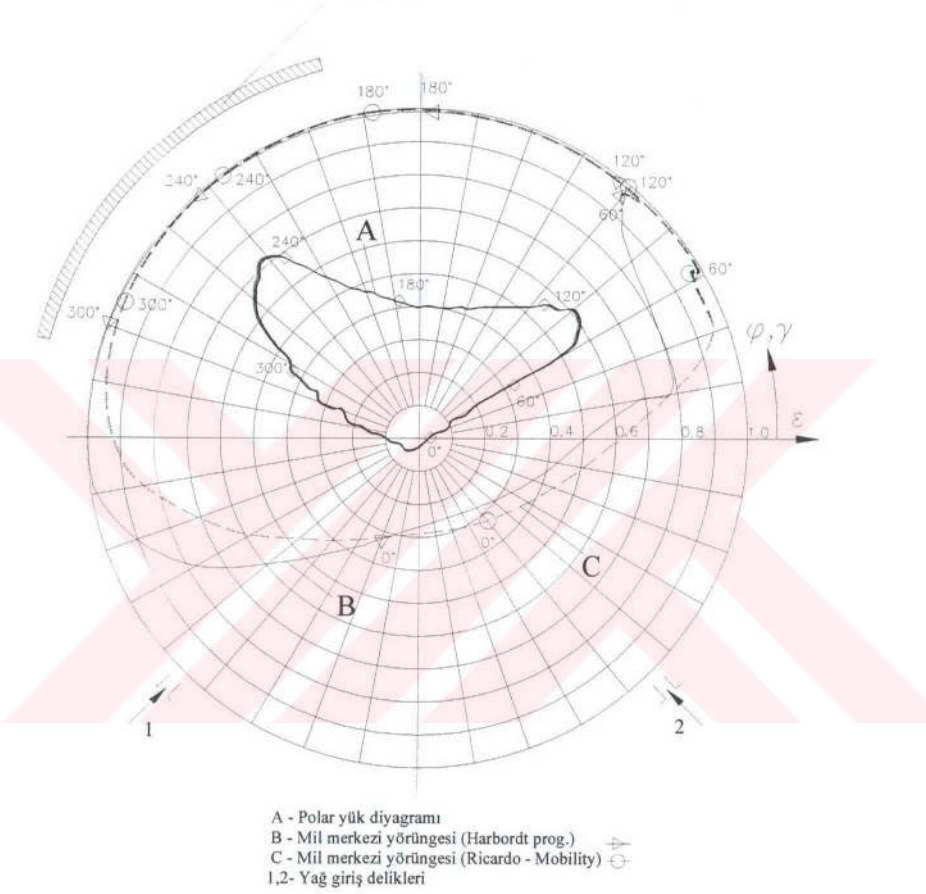
Şekil 33. II nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi

3.2.1. Genişliği 10 mm Olan Yatakla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

II nolu dinamik yük örneğinde yatak genişliği 10 mm olarak alındığında polar yük diyagramı, mil merkezinin yörüngesi ve yorulma bölgeleri Şekil 34'de görüldüğü gibi ortaya çıkmaktadır. Deney yatağında yüzey yorulmasının oluştuğu bölge ve yorulma çatlaklarının dağılımı ve biçimi Şekil 35'de görülmektedir. Yorulma çatlaklarının daha belirgin görülmesi amacıyla penetrent sıvı yöntemi uygulanarak, çatlaklarının meydana geldiği bölgelerin fotoğrafı çekildi.

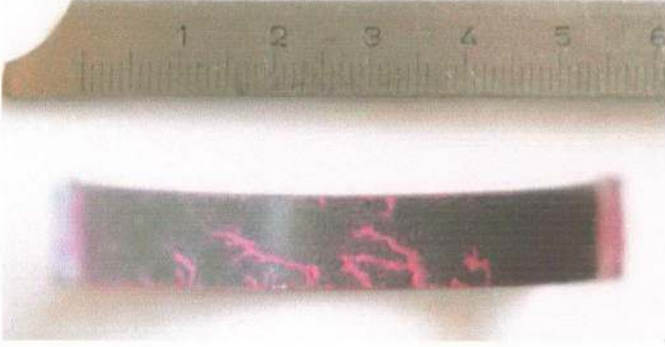
Kılcal çatlakların yatak orta kısmında başlayıp dallanarak eksenel ve çevresel yönde ilerleyip yatak kenarlarına ulaştığı görülmektedir. Deney yatağında yorulma bölgesi yatağın 105° ile 165° çevresel açıları arasında oluştuğu gözlemlendi. Bu bölge yatağa uygulanan yükün maksimum değerleri aldığı bölge olup, mil merkezinin yörüngesi göz önüne alındığında da minimum yağ filminin ortaya çıktığı konumdan yaklaşık 15° kadar önceki bir bölgede meydana gelmektedir. Deney yatağında oluşan yorulma çatlakları yaklaşık 1 saatlik çalışma süresi (74.400 yük tekrarı) sonunda ortaya çıkmaktadır.

Yorulma bölgesi



Şekil 34. II nolu dinamik yük altında ve 10 mm genişliğindeki yataкта oluşan mil merkezi yörüngeleri

Yatağa uygulanan dinamik yük etkisinde milin her 10°'lik krank açısında yataкта ortaya çıkan basınç dağılımları Şekil 36'da görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Burada oluşan

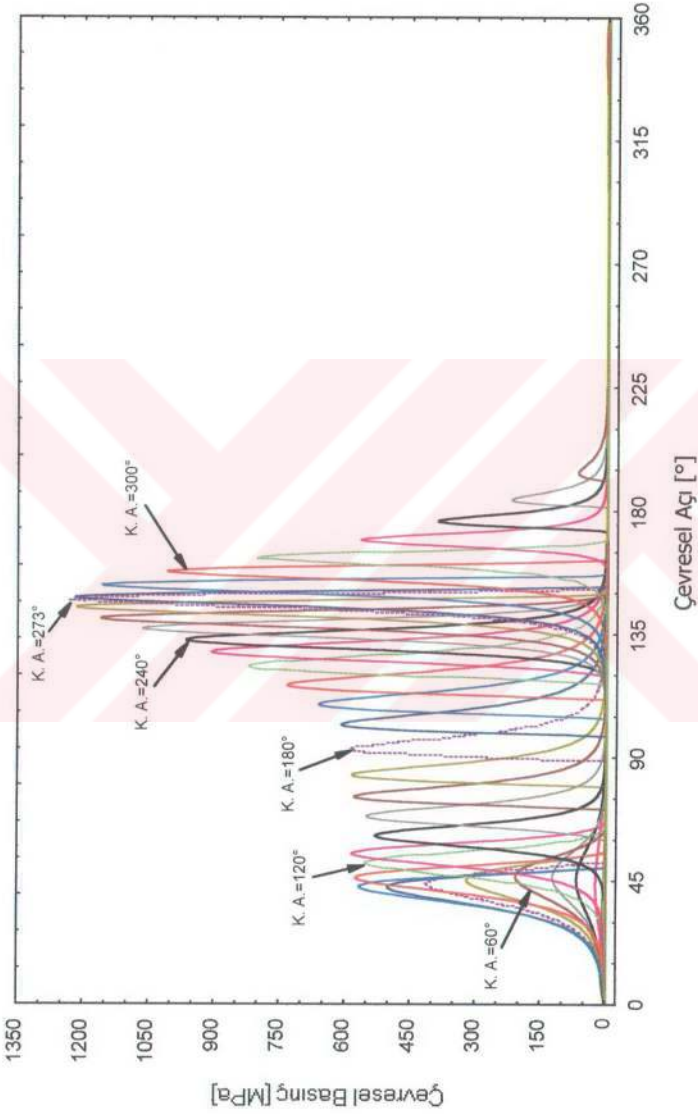


Şekil 35. II nolu yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta oluşan yorulma bölgeleri

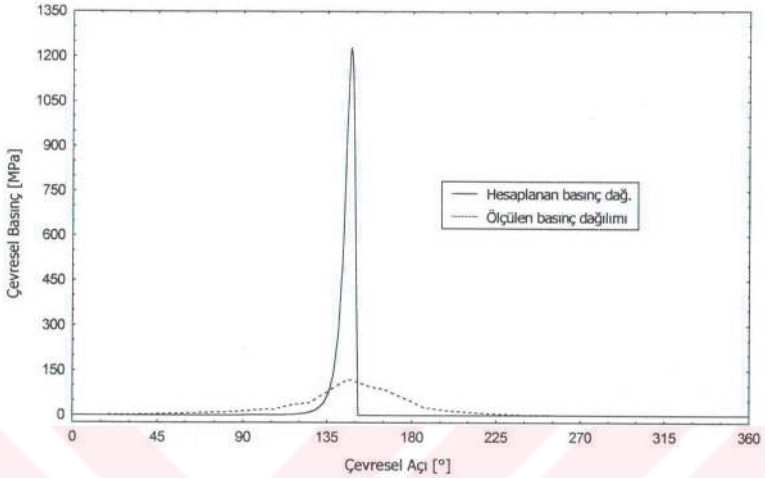
en büyük basınç değerleri yatağın çevresel açısı 105° ile 165° arasına karşılık gelen yorulma bölgesi içerisinde ortaya çıkmaktadır. Yatakta hesaplanan basınçlar içerisinde maksimum basınç 273° 'deki krank açısında 1230 MPa değerinde hesaplandı ve bu anda yatağa etki eden kuvvette 26461 N değerinde olmaktadır.

II nolu dinamik yük altında yatakta ortaya çıkan yağ film basınç ve dağılımları deneysel olarak ölçülmüştür. Ancak ölçülen değerlerle hesaplanan değerler arasında büyük fark olduğu belirlenmiştir, Şekil 37. Bunun nedeni, ölçüm cihazının nominal kapasitesi 100 MPa ile sınırlı olduğundan, yatakta ortaya çıkan basınç değerleri ölçülememiştir. Şekil 37'de maksimum basınç değerini veren basınç dağılımının ortaya çıktığı 273° 'deki krank açısında ölçülen ve hesaplanan basınç değerleri görülmektedir. Basınç algılayıcısının (Şekil 10) basınç ölçüm alanı büyük olduğundan, Şekil 37'deki ölçülen basınç dağılımı, hesaplanan basınç dağılımı gibi dik basınç gradyanına sahip olamamıştır. Bütün bu nedenlerden dolayı yatak zarfında ortaya çıkan gerilmelerin belirlenmesinde hesaplanan basınç dağılımları esas alınmıştır.

Heisel [15], dinamik yüklü kaymalı yataklarda deneysel olarak yaptığı yağ filmindeki basınç ölçmeleri ile teorik olarak hesapladığı basınç değerlerini karşılaştırmasında, yağ filmindeki gerçek basınç değerlerinin, ölçülen değerlerden daha büyük, hesaplanan değerlerden ise daha küçük olduğunu ifade etmektedir.



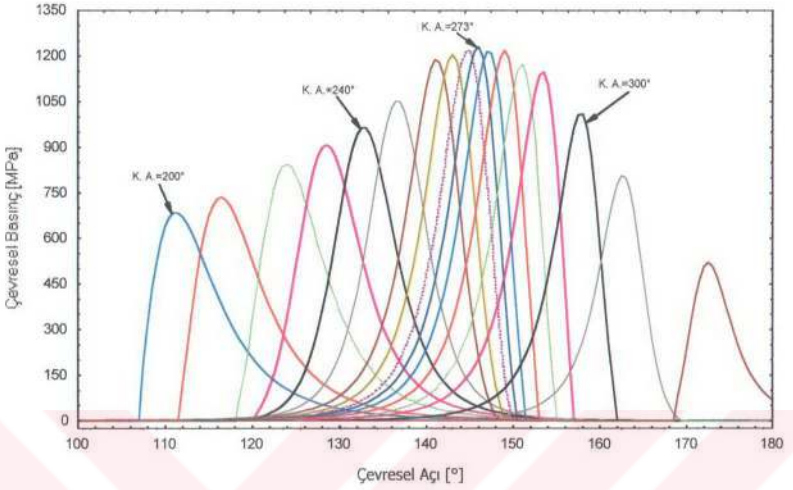
Şekil 36. II nolu dinamik yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta 10° 'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları



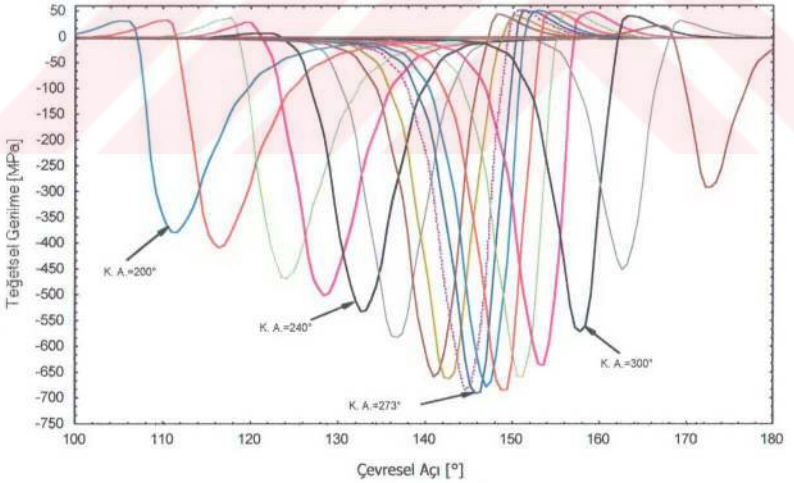
Şekil 37. II nolu yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatakta 273° krank açısında hesaplanan ve ölçülen basınç dağılımları

3.2.1.1. Genişliği 10 mm Olan Yatak İçin İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

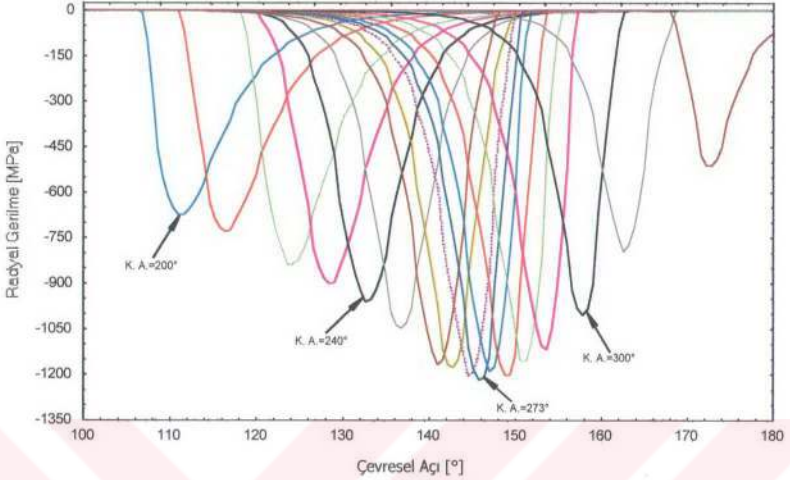
Yatakta II nolu dinamik yük örneği altında ortaya çıkan yorulma bölgeleri yatağın 105° ile 165° çevresel açıları arasında olmaktadır. Yatağın ana yüklenme bölgesi olan bu bölgeye etki eden basınç dağılımları Şekil 38'deki gibi göz önüne alınabilir. Sonlu elemanlarla modellenen yatak zarfında ortaya çıkan gerilmelerin hesabında bu basınç dağılımları göz önüne alınmıştır. Bu basınç dağılımları etkisinde yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 39 ve radyal gerilme dağılımları da Şekil 40'da verilmektedir. Radyal gerilmeler yağ filminde oluşan basınç değerinde bası gerilmeleri oluşturmaktadır. Teğetsel gerilmeler ise basınç dağılımına bağlı olarak yatak zarfında hem bası hem de çeki gerilmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır. Yatağın yorulma bölgesinde ortaya çıkan teğetsel çeki gerilmelerinin maksimum değeri 273°'lik krank açısındaki basınç dağılımı etkisinde 51 MPa ($\sigma_x = 0,041 P_{max}$) olarak hesaplanmıştır. Burada ilk kılcal çatlaklar teğetsel çeki gerilmesiyle başlayıp ilerlerken aynı anda etkiyen yağ filmi basıncı etkisi ile de kılcal çatlak yüzeylerinin birbirinden ayrılmaya zorlandığı söylenebilir. Şekil 35'de görülen yatakta oluşan yorulma çatlakları ile Şekil 39'da hesaplanan teğetsel



Şekil 38. II nolu yük altında ve 10 mm genişliğindeki yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları



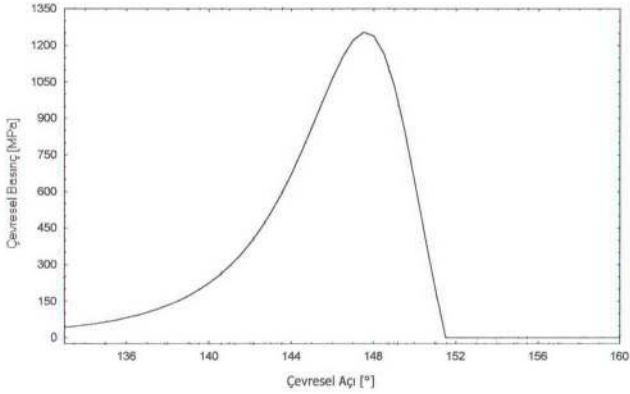
Şekil 39. Şekil 38'deki basınç dağılımları altında yatak zarfının yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan teğetsel gerilmeler



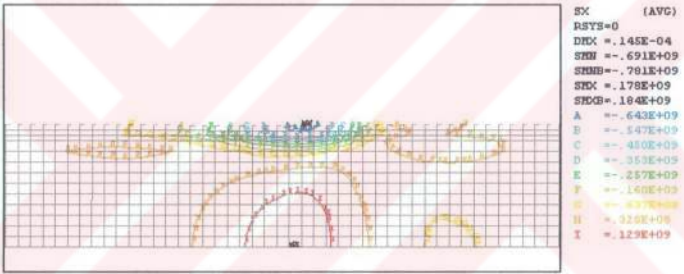
Şekil 40. Şekil 38'deki basınç dağılımları altında yatak zarfının yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan radyal gerilmeler

gerilmeler birlikte göz önüne alındığında, ilk kılcal çatlaklar yatağın çevresel açısı 105° ile 120° ve 145° ile 165° aralıklarında başlayıp ilerleyerek tüm bölgeye yayıldığı görülmektedir.

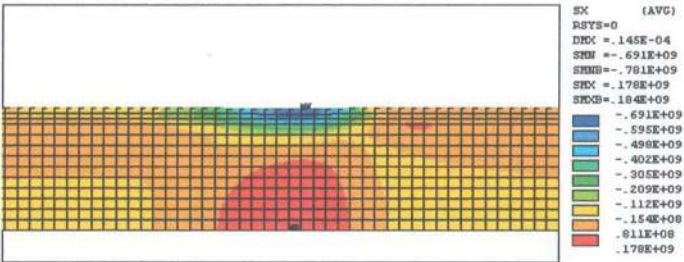
Yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları içerisinde tepe basıncı maksimum olan veya en büyük teğetsel çeki gerilmesini veren basınç dağılımı göz önüne alınıp, iki boyutlu olarak sonlu elemanlarla modellenen yatak zarfında, zarf kalınlığı boyunca ortaya çıkan gerilme ve deformasyonlar hesaplanmıştır. Bu nedenle, II nolu dinamik yük altında, yatakta yağ filminde krank açısı 273° 'de iken oluşan maksimum basınç dağılımı göz önüne alınarak, yatak zarfında zarf kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir. Bu basınç dağılımı altında zarfta ortaya çıkan eş teğetsel gerilme değerlerinin dağılımı Şekil 41-b'de görülmektedir. Burada basınç alanı altında kalan yatak zarfı yüzeyinden itibaren $0,86 \text{ mm}$ 'ye kadar maksimum değeri 691 MPa ($\sigma_x = 0,56 P_{\max}$) olan bası karakterindeki teğetsel gerilmeler söz konusu iken, buradan daha aşağıdaki bölgede maksimum değeri 178 MPa ($\sigma_x = 0,145 P_{\max}$) olan teğetsel çeki gerilmeleri söz konusu olmaktadır. Yağ filmindeki basınç alanının bittiği yerden itibaren zarf yüzeyinde maksimum değeri 51 MPa ($\sigma_x = 0,041 P_{\max}$) olan çeki karakterli teğetsel gerilmeler zarf



a-Çevresel basınç dağılımı ($P_{\max}=1230$ MPa)



b- Eş teğetsel gerilme eğrileri

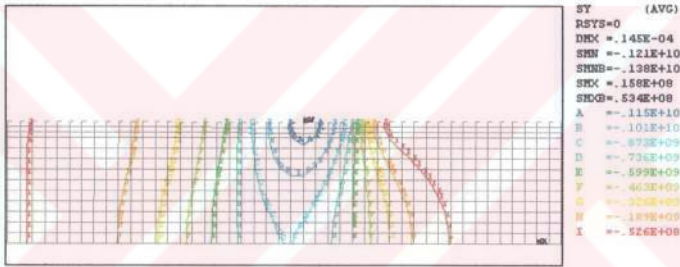


c- Teğetsel gerilmelerin bölgesel dağılımı

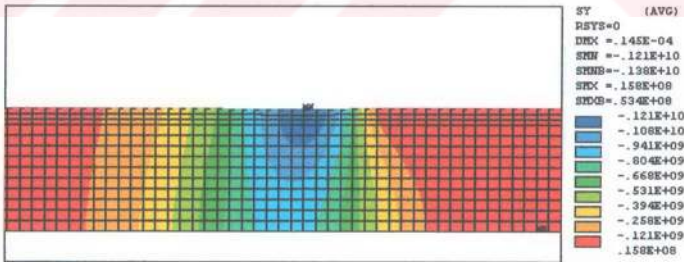
Şekil 41. II nolu yükte 273° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan teğetsel gerilmeler

uzunluğu boyunca gittikçe azalırken ve yüzeyden itibaren zarf kalınlığı yönünde yaklaşık 0,86 mm derinliğe kadar etkili olmaktadır, Şekil 41-b. Teğetsel gerilmelerin yatak zarfı kalınlığı boyunca çeki ve bası karakterli olarak bölgesel dağılımı Şekil 41-c'de görülmektedir.

Aynı basınç alanı etkisi altında yatak zarfı kalınlığı boyunca oluşan eş radyal gerilme değerleri dağılımı Şekil 42-a'da verilmektedir. Burada basınç dağılımının maksimum tepe noktası altına karşılık gelen yatak yüzeyinde en büyük bası karakterli radyal gerilme 1214 MPa ($\sigma_r \approx 1 P_{max}$) olarak ortaya çıkmaktadır. Radyal gerilmelerin yatak zarfı kalınlığı boyunca gerilme değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 42-b'de görülmektedir.



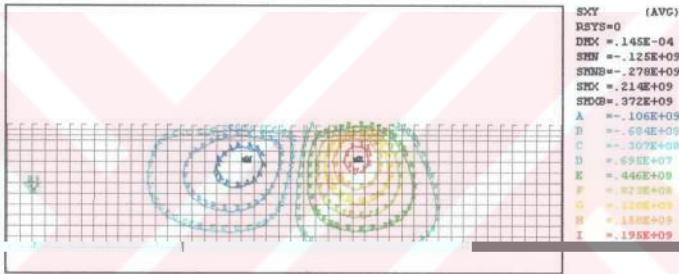
a- Eş radyal gerilme eğrileri



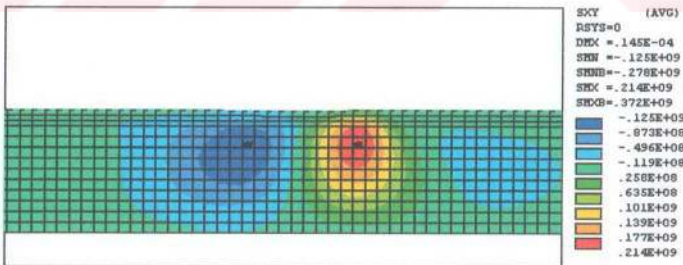
b- Radyal gerilmelerin bölgesel dağılımı

Şekil 42. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal gerilmeler

Yağ filmindeki aynı basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında oluşan eş kayma gerilmesi değerleri Şekil 43-a'da verilmektedir. Burada zarf yüzeyinde etkili basınç dağılımı alanı altında pozitif ve negatif değerli eş kayma gerilmesi dağılımları ortaya çıkmaktadır. Yağ film basıncının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında maksimum değeri 214 MPa ($\tau_{xy} = 0,174 P_{max}$) olan pozitif değerli kayma gerilmesi, zarf yüzeyinin yaklaşık 0,76 mm ($h/s = 0,304$; h: zarf yüzeyinden olan derinlik, s: zarf kalınlığı) altında ortaya çıkmaktadır. Daha düşük eğime sahip basınç gradyanı altında ise maksimum değeri 125 MPa ($\tau_{xy} = 0,1 P_{max}$) olan negatif değerli kayma gerilmesi yine aynı derinliğe yakın bölgede ortaya çıkmaktadır. Kayma gerilmelerinin yatak zarfı kalınlığı boyunca bölgesel dağılımları Şekil 43-b'de verilmektedir.



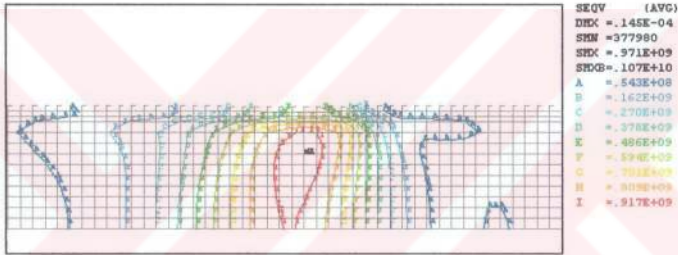
a- Eş kayma gerilme eğrileri



b- Kayma gerilmelerin bölgesel dağılımı

Şekil 43. II nolu yükte 273°deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan kayma gerilmeleri

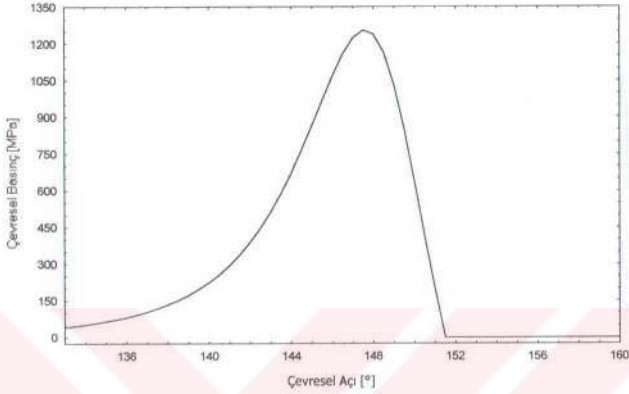
Göz önüne alınan yağ filmi basıncı altında ortaya çıkan gerilmelerden von Mises hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilme dağılımları Şekil 44'de görülmektedir. Burada kırılma açısından en büyük eşdeğer gerilmelerin söz konusu olduğu yer yağ filmi basıncının tepe basıncına karşılık gelen yatak yüzeyinin yaklaşık 1 mm ($h/s = 0,4$) kadar altında 971 MPa ($\sigma_{eq} = 0,79 P_{max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. Bu gerilme değerinin hemen üzerinde bronz-teflon tabakasının en alt kısmında 701 MPa ($\sigma_{eq} = 0,57 P_{max}$), yatak zarf yüzeyinde ise 486 MPa ($\sigma_{eq} = 0,4 P_{max}$) olarak eşdeğer gerilme değerleri ortaya çıkmaktadır. Yatak yüzeyinde ortaya çıkan yorulma çatlakları açısından eşdeğer gerilmelerin maksimum olduğu bu noktalar yorulma çatlaklarının başlaması için kritik noktalar olarak göz önüne alınabilir.



Şekil 44. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatakta hesaplanan von Mises eş gerilme eğrileri

Yağ filmindeki bu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Şekil 45-b'de görülmektedir. Burada basınç alanı altında, basınç alanı ile uyumlu bir radyal deformasyon dağılımı ortaya çıkmakta ve maksimum çökme değerini 14,4 μm olarak basıncın maksimum olduğu noktada almaktadır. Radyal boşluk ve bu anda oluşan film kalınlığı (Şekil 34) birlikte göz önüne alındığında bu çökme değerinin çok büyük değerde olduğu görülmektedir. Bu durumda metal metal temasının oluşması gerekmektedir. Fakat yapılan yorulma deneylerinde böyle bir durum gözlenmemiştir. Bunun nedenleri ise hesaplanan bu çökme değerinin teorik olmasından ve yatak zarfı yüzeyinin PTFE malzemesinden dolayı rahatça çökmesinden dolayı metal metal teması olmamaktadır. Yağ film basınç alanından sonraki yatak zarfı yüzeyinde ise çökme miktarı hızla azaldıktan sonra zarf yüzeyinden 0,12 μm kadar bir yükselme göstermektedir. Aynı

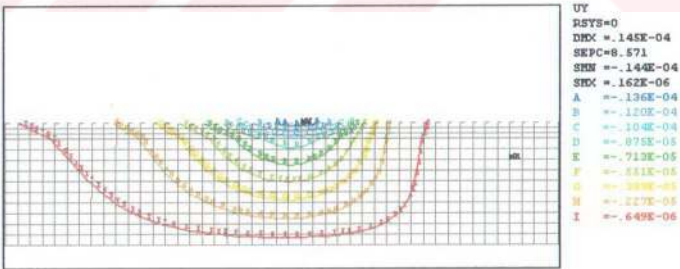
basınç alanı etkisinde yatak zarfında ortaya çıkan eş radyal deformasyon dağılımları Şekil 45-c'de verilmektedir.



a- Çevresel basınç dağılımı



b- Yatak zarf yüzeyinde oluşan radyal deformasyon

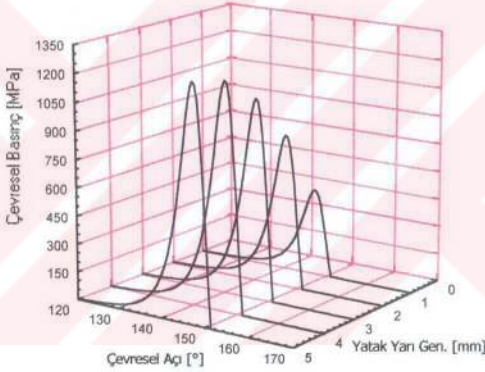


c- Yatak zarf kesitinde oluşan radyal eş deformasyon eğrileri

Şekil 45. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal deformasyonlar

3.2.1.2. Genişliği 10 mm Olan Yatak İçin Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Kaymalı yataklarda yağ filminde çevresel basınç dağılımı yanında eksenel doğrultuda ortaya çıkan basınç değişiminin yatak zarfında oluşturduğu etkileri de belirlemek için üç boyutlu çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerde yapılan kabuller Bölüm 2.2.2.'de daha önce verilmiştir. Burada da II nolu dinamik yük örneği altında krank açısının 273°'deki değerinde yağ filminde ortaya çıkan en büyük basınç dağılımı göz önüne alınacaktır. Bu basınç dağılımının yatak zarfının yarı genişliğindeki üç boyutlu değişimi Şekil 46'da verilmektedir. Yatak ortasındaki çevresel basınç dağılımı enine yönde parabolik olarak değişim gösterip yatak zarfı yüzeyine üç boyutlu bir basınç dağılımı şeklinde etki etmektedir.

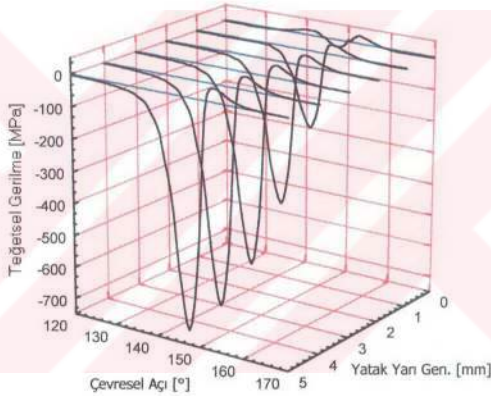


Şekil 46. II nolu yükte 10 mm genişliğindeki yatakta 273° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{max} = 1230$ MPa)

Bu basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel, radyal, eksenel ve kayma gerilme dağılımları ile radyal ve eksenel deformasyonlar hesaplanmıştır. Burada yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel, radyal, eksenel ve kayma gerilme dağılımları yatak zarfı yüzeyinden itibaren tabaka tabaka teflon-bronz tabakası kalınlığı boyunca veelik destek tabakasında çevresel ve enine yöndeki dağılımları hesaplanarak, değişimleri analiz edildi.

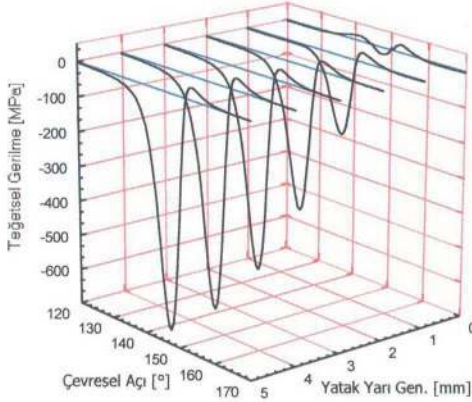
3.2.1.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları

Yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yatak zarfı yüzeyindeki değişimleri Şekil 47’de verilmektedir. Yağ filminde ortaya çıkan basınç alanı altında bası karakterli teğetsel gerilmeler söz konusu olurken, basınç alanının bittiği yerden itibaren çeki karakterli teğetsel gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Burada teğetsel gerilmelerin maksimum değeri çeki karakterli 41,65 MPa ($0,034 P_{\max}$) olarak yatak ortasında başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde gittikçe azalarak 24 MPa ($0,02 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Benzer şekilde bası karakterli teğetsel gerilmelerde yatak ortasında 705 MPa ($0,57 P_{\max}$) değeriyle başlayıp, yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 21,7 MPa ($0,0176 P_{\max}$) değerine düşmektedir.



Şekil 47. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler

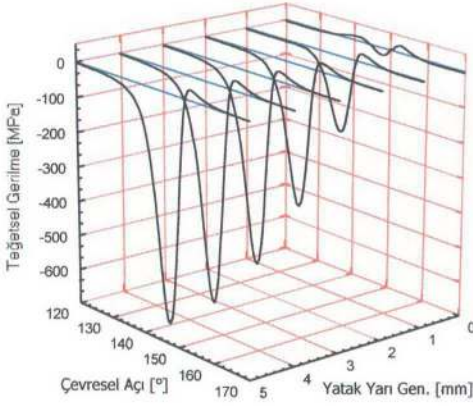
Yatak yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 48’de verilmektedir. Bu tabakada çeki karakterli teğetsel gerilmeler maksimum değeri 34,5 MPa ($0,028 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 22,7 MPa ($0,018 P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır. Yine bu tabakada bası karakterli teğetsel gerilmeler ise maksimum değeri 659 MPa ($0,54 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 19 MPa ($0,015 P_{\max}$) değerine düşmektedir.



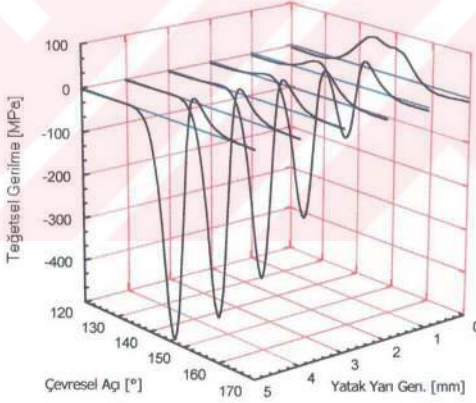
Şekil 48. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilmeler

Yatak yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilme dağılımları da Şekil 49'da verilmektedir. Bu tabakada çeki karakterli teğetsel gerilmeler maksimum değeri 29 MPa ($0,024 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 20,8 MPa ($0,017 P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır. Yine bu tabakada bası karakterli teğetsel gerilmeler ise maksimum değeri 641 MPa ($0,52 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 19,1 MPa ($0,0155 P_{\max}$) değerine düşmektedir.

Yatak zarfı yüzeyinden 0,32 mm derinlikte teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyine karşılık gelen yüzeyde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 50'de verilmektedir. Birleşim yüzeyinde çeki karakterli teğetsel gerilmeler maksimum değeri 64,5 MPa ($0,052 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde artarak 76,1 MPa ($0,062 P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır. Birleşim yüzeyinde bası karakterli teğetsel gerilmeler ise maksimum değeri 491 MPa ($0,34 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 12,5 MPa ($0,01 P_{\max}$) değerine düşmektedir.



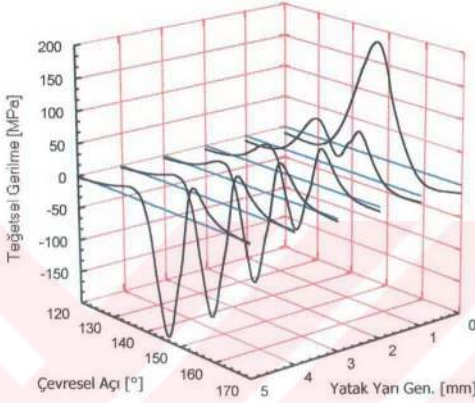
Şekil 49. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilmeler



Şekil 50. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler

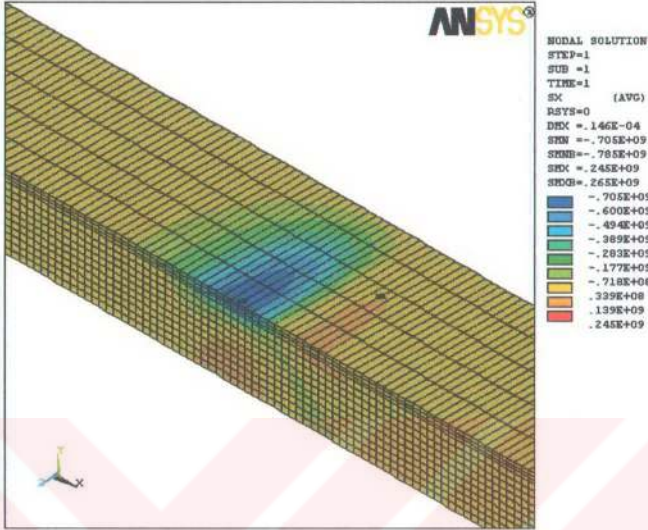
Birleşim yüzeyinin hemen altında yatak zarfı yüzeyinden 0,538 mm derinlikte çelik destek takakasındaki elemanların yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları da Şekil 51'de görülmektedir. Bu yüzeyde çeki karakterli teğetsel gerilmeler yatak ortasından 48,7 MPa ($0,04 P_{max}$) maksimum değerinde başlayıp yatak kenarına doğru enine doğrultuda

artarak 180,2 MPa (0,146 $P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır. Yine bu yüzeyde bası karakterli teğetsel gerilmeler ise maksimum değeri 191,7 MPa (0,156 $P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 20,5 MPa (0,017 $P_{\max}$) değerine düşmektedir.



Şekil 51. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan teğetsel gerilmeler

Yatak zarfında üç boyutlu olarak hesaplanan teğetsel gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 52'de görülmektedir. Yatak zarfının tümü göz önüne alındığında, yatak zarfının alt yüzeyinde yatak kenarında çeki karakterli teğetsel gerilme 245 MPa (0,199 $P_{\max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. En büyük bası karakterli teğetsel gerilme ise yatak ortasında yatak zarfı yüzeyinde 705 MPa (0,57 $P_{\max}$) değerinde oluşmaktadır. Burada göz önüne alınan basınç alanı altında yatak ortasında zarfıta ortaya çıkan çeki karakterli teğetsel gerilmeler zarfı yüzeyindeki değerden tabaka kalınlığı boyunca önce bir miktar azalma gösterip daha sonra artarak birleşim tabakasında maksimum değere ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra çelik destek tabakası kalınlığı boyunca gittikçe teğetsel gerilme değerlerinde azalma ortaya çıkmaktadır.



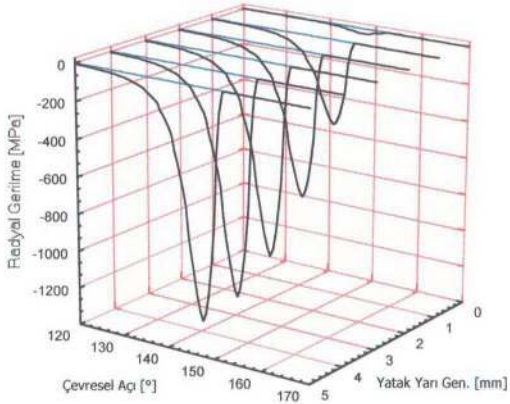
Şekil 52. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilmeler

3.2.1.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları

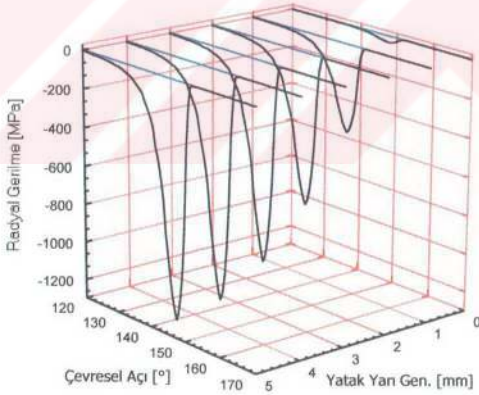
Göz önüne alınan üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal gerilmeler basınç dağılımına uygun bası karakterli gerilmeler şeklindedir, Şekil 53. Yatak zarfı yüzeyinde yatak ortasında maksimum değeri 1210 MPa ($\sim 1 P_{max}$) olan radyal gerilmeler, eksenel doğrultuda yatak kenarına doğru azalarak 26,4 MPa ($0,021 P_{max}$) değerine düşmektedir.

Yatak yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilme dağılımları Şekil 54'de verilmektedir. Bu tabakada radyal gerilmeler maksimum değeri 1205 MPa ($0,98 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 32,6 MPa ($0,0265 P_{max}$) değerine düşmektedir.

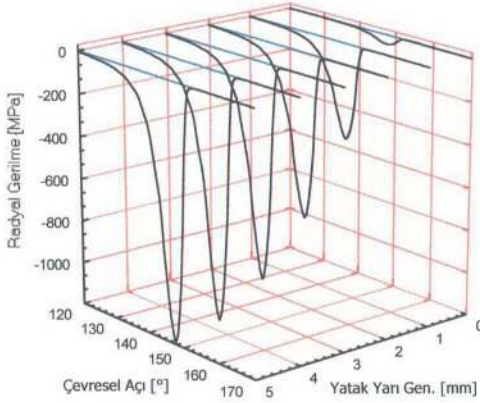
Yatak yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilme dağılımları da Şekil 55'de verilmektedir. Bu tabakada radyal gerilmeler maksimum 1191,3 MPa ($0,97 P_{max}$) değerinde yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 43,4 MPa ($0,035 P_{max}$) değerine düşmektedir.



Şekil 53. II nolu yükte 273°'deki krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler

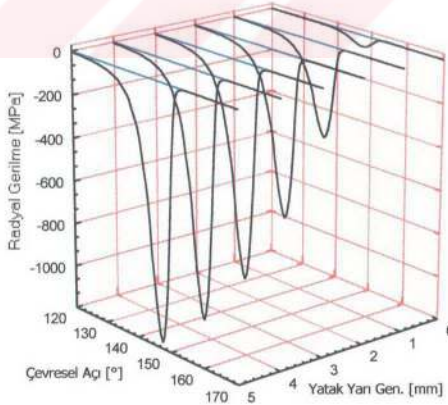


Şekil 54. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler



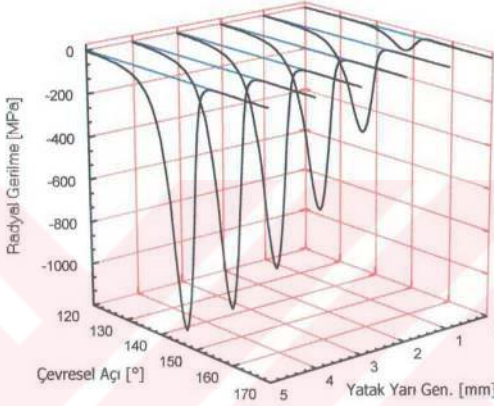
Şekil 55. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler

Yatak zarfı yüzeyinden 0,32 mm derinlikte teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyine karşılık gelen yüzeyde ortaya çıkan radyal gerilme dağılımları Şekil 56'da verilmektedir. Birleşim yüzeyinde radyal gerilmeler maksimum değeri 1168,3 MPa ($0,95 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 51,7 MPa ($0,042 P_{max}$) değerine ulaşmaktadır.



Şekil 56. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler

Yine birleşim yüzeyinin hemen altında yatak zarfı yüzeyinden 0,538 mm derinlikte çelik destek takakasındaki elemanların yüzeyinde ortaya çıkan radyal gerilme dağılımları da Şekil 57’de görülmektedir. Burada radyal gerilmeler maksimum değeri 1126,2 MPa ($0,92 P_{\max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 73,8 MPa ($0,06 P_{\max}$) değerini almaktadır.

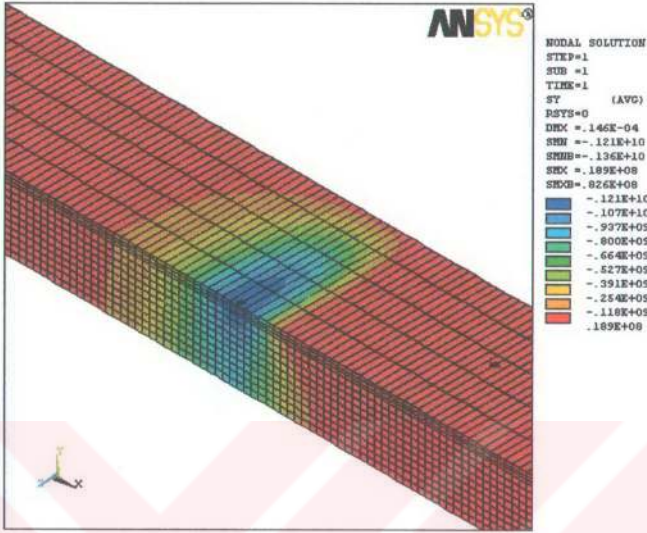


Şekil 57. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler

Üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan radyal gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 58’de görülmektedir. Burada oluşan en büyük radyal gerilme yatak ortasında ve yatak zarfı yüzeyinde 1210 MPa ($\sim 1 P_{\max}$) olarak meydana gelmektedir. Burada yağ filmindeki basınç alanı altında zarf yüzeyinde radyal gerilme değerleri bası gerilmesi olarak yağ filmi basınç değerlerine eşit olarak ortaya çıkmakta, yüzeyden itibaren kalınlık boyunca tabaka tabaka radyal gerilme değerleri gittikçe azalma göstermektedir.

3.2.1.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları

Yağ filmindeki aynı basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel gerilmeler de Şekil 59’da verilmektedir. Yağ filminde ortaya çıkan basınç alanı altında bası karakterli eksenel gerilmeler oluşurken, basınç alanının bitiminden sonra çeki

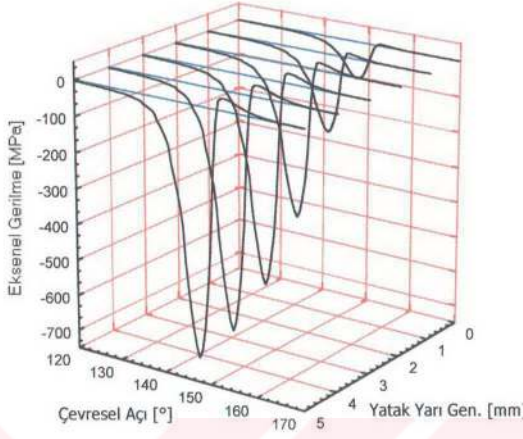


Şekil 58. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal gerilmeler

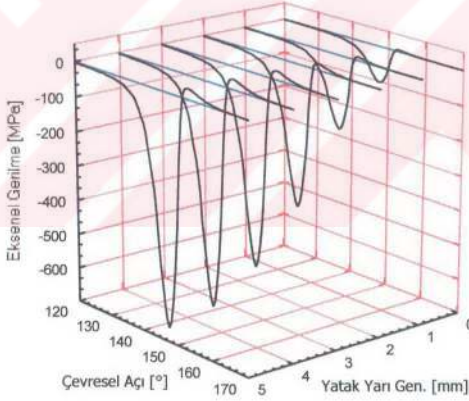
karakterli eksenel gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Burada yatak ortasında çeki karakterli en büyük eksenel gerilme 32,6 MPa ($0,0265 P_{max}$) değerinde başlayıp enine yönde yatak kenarında 5,4 MPa ($0,004 P_{max}$) değerine düşmektedir. Benzer şekilde yatak ortasında bası karakterli en büyük eksenel gerilme 682,4 MPa ($0,555 P_{max}$) değeriyle başlayıp enine yönde yatak kenarında 104,6 MPa ($0,085 P_{max}$) değerine düşmektedir.

Yatak yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilme dağılımları Şekil 60'da verilmektedir. Bu tabakada çeki karakterli teğetsel gerilmeler maksimum 29,8 MPa ($0,024 P_{max}$) değerinde yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine doğrultuda azalarak 5,4 MPa ($0,004 P_{max}$) değerine ulaşmaktadır. Yine bu tabakada bası karakterli eksenel gerilmeler ise maksimum değeri 659 MPa ($0,54 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 104,1 MPa ($0,085 P_{max}$) değerine düşmektedir.

Yatak yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilme dağılımları da Şekil 61'de verilmektedir. Bu tabakada çeki karakterli eksenel gerilmeler maksimum değeri 27,8 MPa ($0,023 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde

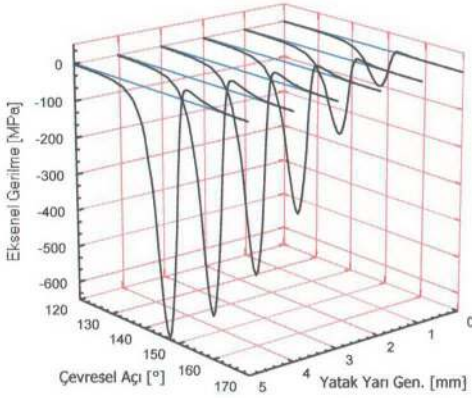


Şekil 59. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler



Şekil 60. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler

azalarak 4,9 MPa (0,004 P_{max}) değerine ulaşmaktadır. Yine bu tabakada bası karakterli eksenel gerilmeler ise maksimum değeri 645,5 MPa (0,525 P_{max}) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 103 MPa (0,084 P_{max}) değerine düşmektedir.

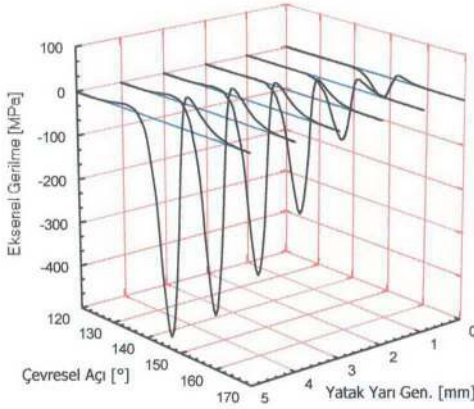


Şekil 61. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler

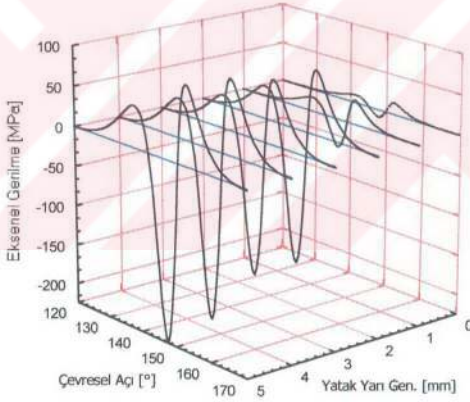
Yatak zarfı yüzeyinden 0,32 mm derinlikte teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyine karşılık gelen yüzeyde ortaya çıkan eksenel gerilme dağılımları Şekil 62’de görülmektedir. Birleşim yüzeyinde çeki karakterli eksenel gerilmeler maksimum değeri 72 MPa ($0,059 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 10,9 MPa ($0,009 P_{max}$) değerine düşmektedir. Birleşim yüzeyindeki bası karakterli eksenel gerilmeler ise maksimum değeri 471,8 MPa ($0,384 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 49,7 MPa ($0,04 P_{max}$) değerini almaktadır.

Yine birleşim yüzeyinin hemen altında yüzeyden 0,538 mm derinlikte çelik destek takakasındaki elemanların yüzeyinde ortaya çıkan eksenel gerilme dağılımları da Şekil 63’de verilmektedir. Bu yüzeyde çeki karakterli eksenel gerilmeler maksimum değeri 97 MPa ($0,079 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 14,8 MPa ($0,012 P_{max}$) değerine düşmektedir. Yine bu yüzeyde bası karakterli eksenel gerilmeler ise maksimum değeri 223 MPa ($0,181 P_{max}$) olarak yatak ortasından başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 9 MPa ($0,007 P_{max}$) değerini almaktadır.

Yağ filmindeki aynı basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfında oluşan eksenel gerilme değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 64’de görülmektedir. Burada yatak ortasında zarf yüzeyinden 0,54 mm derinlikte çeki karakterli eksenel gerilme 97 MPa ($0,079 P_{max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. En büyük bası karakterli eksenel gerilme ise yatak ortasında



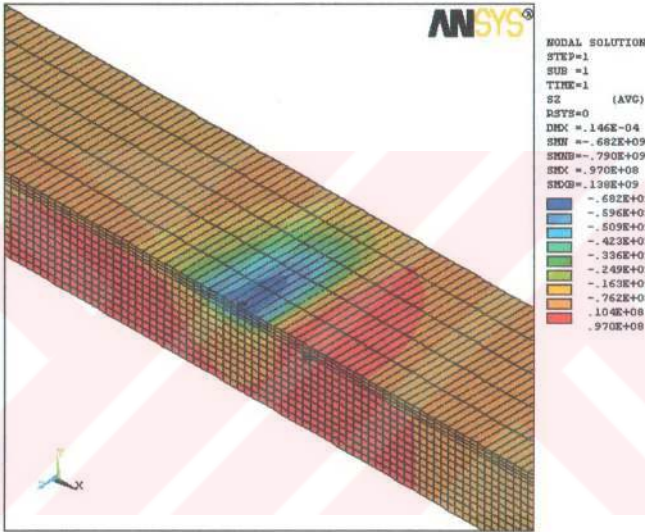
Şekil 62. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler



Şekil 63. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler

yatak zarfı yüzeyinde 682,4 MPa ($0,555 P_{\max}$) değerinde oluşmaktadır. Yatak zarfında ortaya çıkan eksenel gerilme dağılımları incelendiğinde, yatak ortasında çeki karakterli eksenel gerilmelerin zarf yüzeyinde aldığı değer, teflon-bronz tabakası kalınlığı boyunca belli bir miktar azalma gösterdikten sonra birleşim tabakasına doğru artarak maksimum değere

erişmektedir. Bu noktadan sonra çelik destek tabakasında çeki karakterli eksenel gerilmeler artarak, daha büyük gerilme değerlerine ulaşmaktadır. Bu tezde bütünlük olması açısından ve bilgisayar kapasitesinden dolayı eksenel doğrultuda yatak genişliği 5 elemana bölündü. Bu nedenle, eksenel gerilmelerin bulunduğu grafiklere bakıldığında, serbest yüzey olan yatak kenarlarında eksenel gerilmelerin sıfır değerini almadığı görülmektedir. Yatak genişliğinin 10 elemana bölündüğü başka modellemelerde bu değerin sıfıra yaklaştığı görüldü.

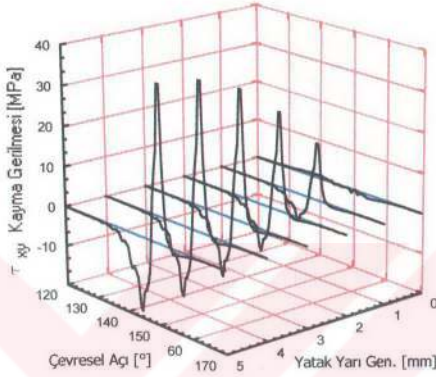


Şekil 64. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilmeler

3.2.1.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatak zarfına etki eden basınç dağılımı altında zarfın yapılan üç boyutlu çözümü sonucunda yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri dağılımı Şekil 65'de verilmektedir. Burada yağ filmi basıncı altında, büyük eğime sahip basınç gradyanı altında pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi ortaya çıkarken, daha düşük eğime sahip basınç gradyanı altında negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi ortaya çıkmaktadır. Maksimum kayma

gerilmesi değerleri basınç gradyanına uygun olarak yatak ortasında pozitif değerlikli 38 MPa ($0,03 P_{\max}$) kayma gerilmesi ile negatif değerlikli 18,3 MPa ($0,0145 P_{\max}$) kayma gerilmesi değerinde başlayıp yatak kenarına doğru gittikçe azalmaktadır.

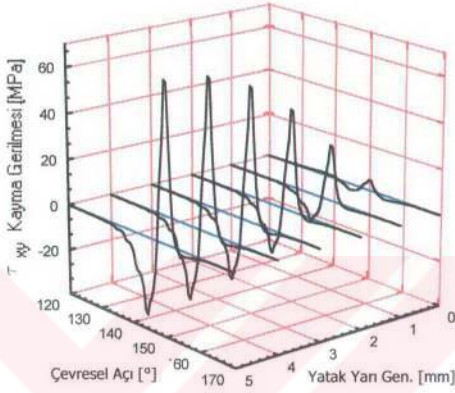


Şekil 65. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri

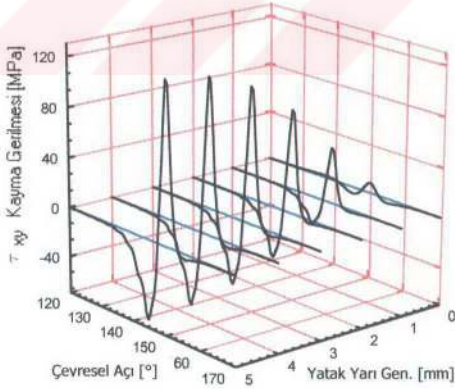
Pozitif kayma gerilmesi yatak yüzeyinin 0,107 mm altında 68,6 MPa ($0,056 P_{\max}$) değerinde (Şekil 66), 0,213 mm altında 127,4 MPa ($0,104 P_{\max}$) değerinde (Şekil 67), 0,32 mm altında teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakasının birleşim yüzeyinde 181 MPa ($0,147 P_{\max}$) değerinde (Şekil 68) ve 0,538 mm altında çelik destek tabakası içerisinde de 213,4 MPa ($0,173 P_{\max}$) değerinde (Şekil 69) ortaya çıkmaktadır. Yatak yüzeyi altında göz önüne alınan derinliklerdeki tabakalarda ortaya çıkan negatif kayma gerilmesi değerleri pozitif değerlerden daha küçük olmak üzere gittikçe artış göstermektedir. Yatak yüzeyi altındaki her tabakada pozitif ve negatif τ_{xy} kayma gerilmeleri yatak ortasında çevresel yönde maksimum değerlerde ortaya çıkmakta, bu değerler yatak kenarına doğru gittikçe azalma göstermektedirler.

Yatak zarfına etki eden basınç dağılımı altında zarfın yapılan üç boyutlu çözümü sonucunda zarfta ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 70'de görülmektedir. Yatak zarfının tümü göz önüne alındığında, yatak ortasında yüzeyden 0,76 mm derinlikte büyük basınç gradyanına sahip basınç ayağının altında en büyük pozitif

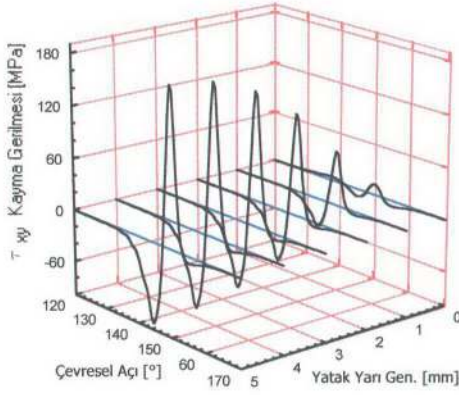
değerli τ_{xy} kayma gerilmesi 215,6 MPa ($0,175 P_{max}$) olarak ortaya çıkmaktadır. En büyük negatif değerli τ_{xy} kayma gerilmesi ise yine aynı kesitte ve derinlikte diğer basınç ayağının altında 125,3 MPa ($0,102 P_{max}$) değerinde oluşmaktadır.



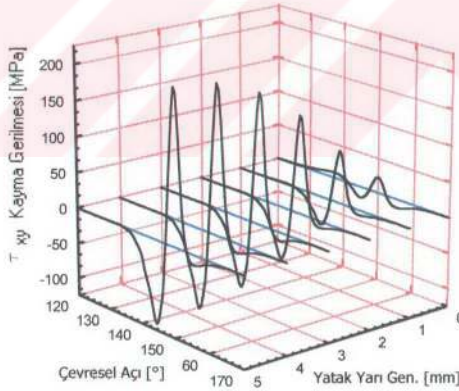
Şekil 66. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



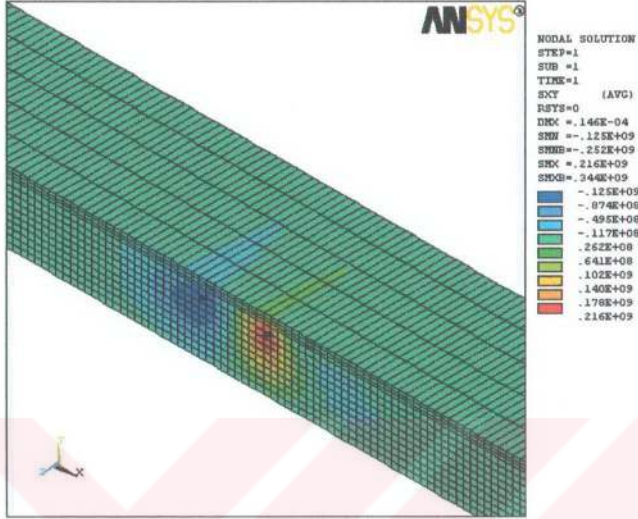
Şekil 67. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



Şekil 68. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



Şekil 69. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri

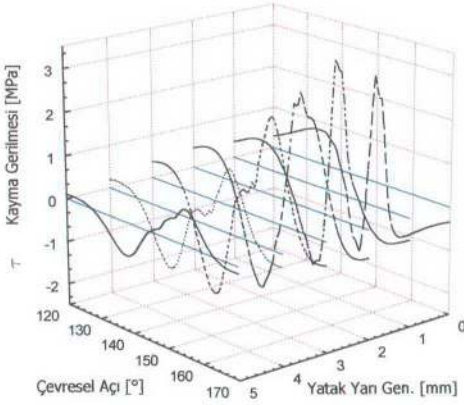


Şekil 70. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları

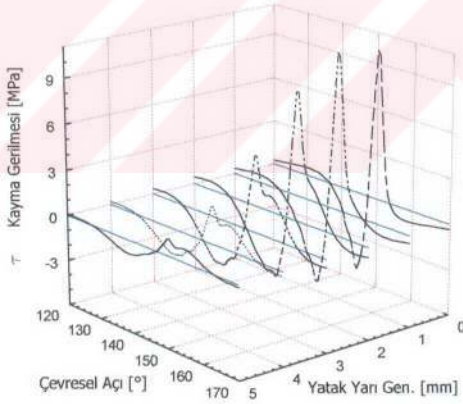
3.2.1.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları Şekil 71'de verilmektedir. Burada pozitif kayma gerilmesi 3,1 MPa (0,0025 P_{max}) değerinde ve negatif kayma gerilmesi 1,9 MPa (0,0015 P_{max}) değerinde olmak üzere en büyük değerler olarak yatak kenarına doğru ortaya çıkmaktadır. Yatak ortasında ise negatif 0,76 MPa (0,0006 P_{max}) kayma gerilmesi ile pozitif 0,81 MPa (0,0007 P_{max}) kayma gerilmesinin en küçük değerlerinin almaktadır.

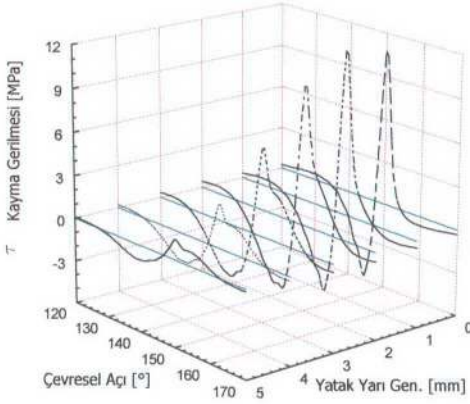
Yatak yüzeyinin altında 0,107 mm derinlikteki tabakada Şekil 72'de, 0,213 mm altındaki tabakada Şekil 73'de, 0,32 mm derinlikteki teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakasının birleşim yüzeyinde Şekil 74'de ve 0,538 mm derinlikte çelik destek tabakası içerisinde Şekil 75'de τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları verilmektedir. Burada derinlik arttıkça kayma gerilmesi değerlerinde artış gözlenmekte, yatağın enine doğrultusundaki değişim ise yatak yüzeyine benzer olarak yatak kenarına doğru gittikçe artmaktadır.



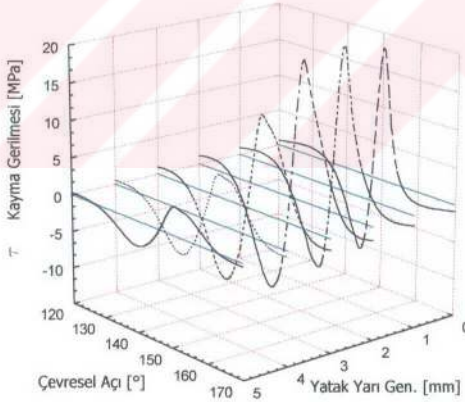
Şekil 71. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



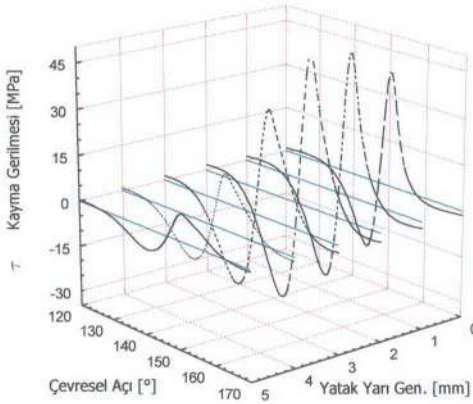
Şekil 72. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



Şekil 73. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



Şekil 74. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



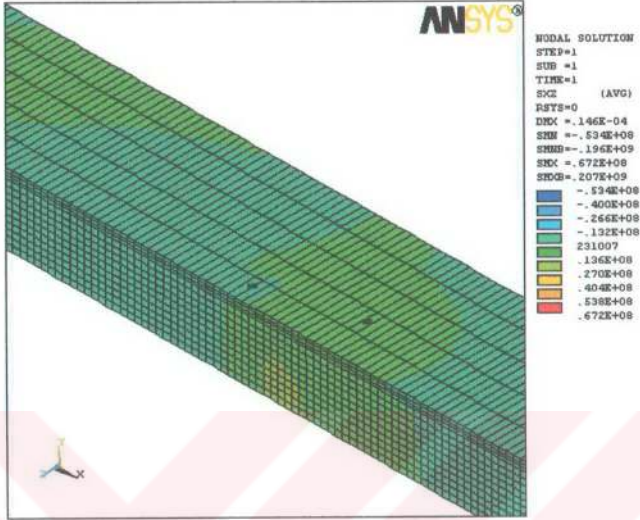
Şekil 75. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri

Yatak zarfına etki eden yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan τ_{xz} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 76'da görülmektedir. Burada yüzeyden 1,63 mm derinlikte enine yönde 2 mm ileride en büyük pozitif değerli τ_{xz} kayma gerilmesi 67,2 MPa (0,055 P_{max}) olarak ortaya çıkmaktadır. En büyük negatif değerli τ_{xz} kayma gerilmesi ise yatak zarfı alt yüzeyinde enine yönde yine 2 mm ileride 53,4 MPa (0,043 P_{max}) değerinde oluşmaktadır.

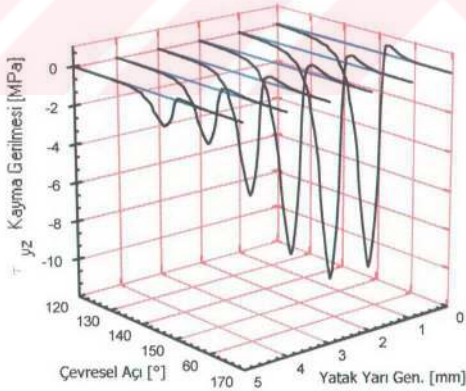
3.2.1.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfında yatak yüzeyinde ortaya çıkan τ_{yz} kayma gerilmelerinin değişimi Şekil 77'de verilmektedir. Yatak yüzeyi ortasında τ_{yz} negatif kayma gerilmeleri 1,5 MPa (0,001 P_{max}) değerinde ortaya çıkıp yatak kenarına doğru 11,5 MPa (0,009 P_{max}) değerinde maksimum değere ulaşmaktadır. Pozitif kayma gerilmeleri ise yatak ortasında 0,11 MPa (0,00009 P_{max}) değerinden başlayıp yatak kenarına doğru 0,46 MPa (0,00037 P_{max}) değerine artış göstermektedir.

Yatak zarfı yüzeyinin altında 0,107 mm derinlikte Şekil 78'de, 0,213 mm derinlikte Şekil 79'da, 0,32 mm derinlikte teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakasının birleşim yüzeyinde Şekil 80'de ve 0,538 mm derinlikte çelik destek tabakası içerisinde Şekil 81'de τ_{yz}

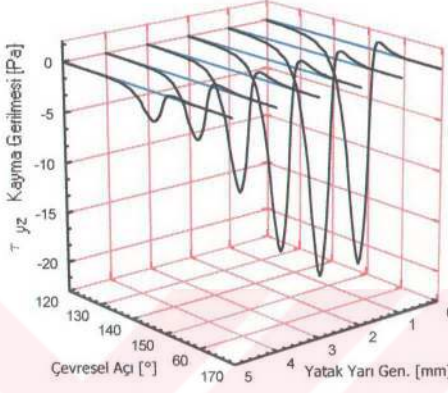


Şekil 76. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları

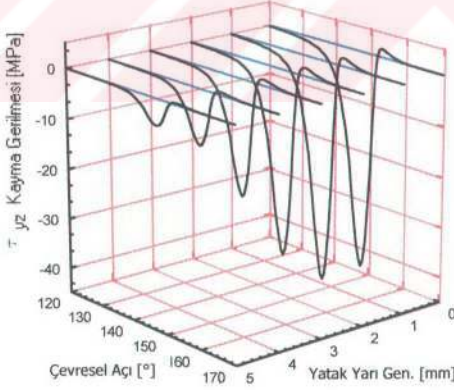


Şekil 77. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri

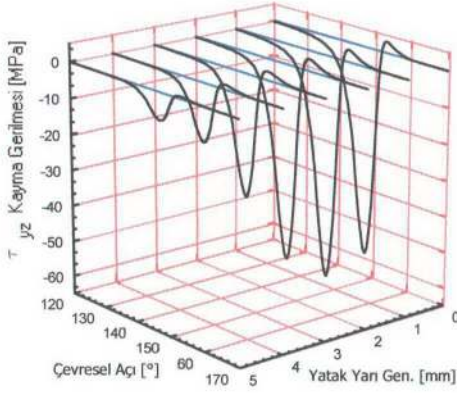
kayma gerilmesi dağılımları verilmektedir. τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımlarında yüzey tabakasından itibaren derinlik arttıkça gerilme değerlerinde de artış olduğu gözlenmektedir.



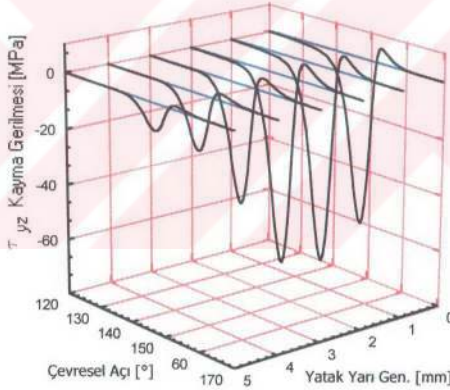
Şekil 78. Yatak zarfı yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



Şekil 79. Yatak zarfı yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



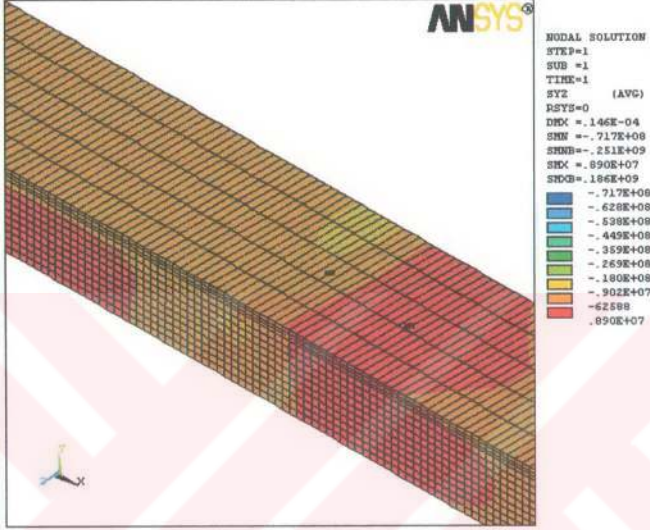
Şekil 80. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



Şekil 81. Yatak zarfı yüzeyinin 0,538 mm altındaki tabakada oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri

Aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfında τ_{yz} kayma gerilmelerinin bölgesel gerilme dağılımları Şekil 82’de görülmektedir. Burada yüzeyden 0,97 mm derinlikte enine yönde 2 mm ileride en büyük pozitif değerli τ_{yz} kayma gerilmesi 8,9 MPa (0,007 P_{max}) olarak ortaya çıkmaktadır. En büyük negatif değerli τ_{yz} kayma gerilmesi ise yatak zarfı yüzeyinden

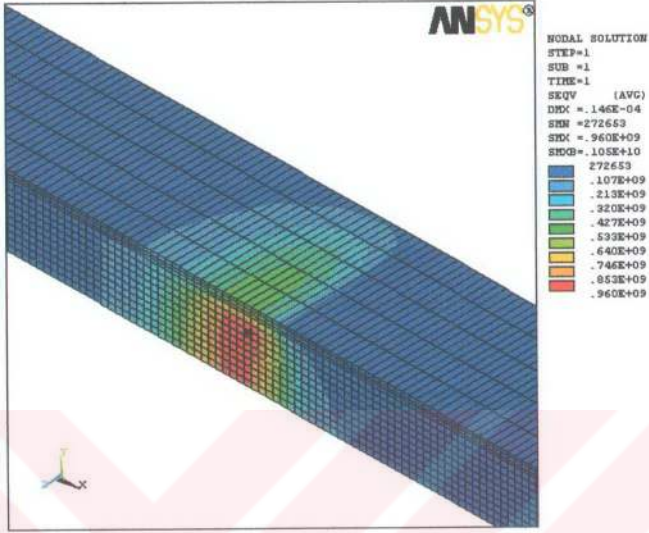
0,76 mm derinlikte enine yönde yine 2 mm ileride 71,7 MPa (0,058 P_{max}) değerinde oluşmaktadır.



Şekil 82. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{vz} kayma gerilmesi dağılımları

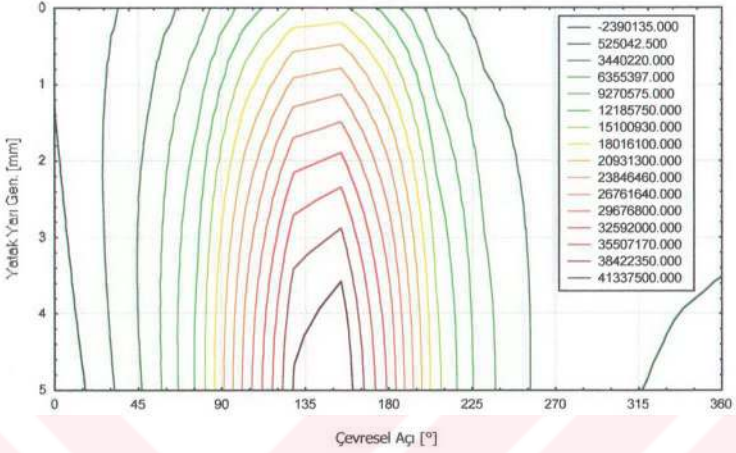
3.2.1.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları

Yatak zarfının üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde elde edilen gerilme dağılımlarının yatak zarfında von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanmış eşdeğer gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 83'de görülmektedir. Burada göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımı altında maksimum eşdeğer gerilme, yağ film basıncının maksimum değere eriştiği tepe noktası altında, yatak ortasında, yatak yüzeyinin 0,98 mm altında yatak destek tabakası içerisinde 960 MPa (0,78 P_{max}) değerinde ortaya çıkmaktadır. Von Mises gerilme hipotezine göre yatak yüzeyinde hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri

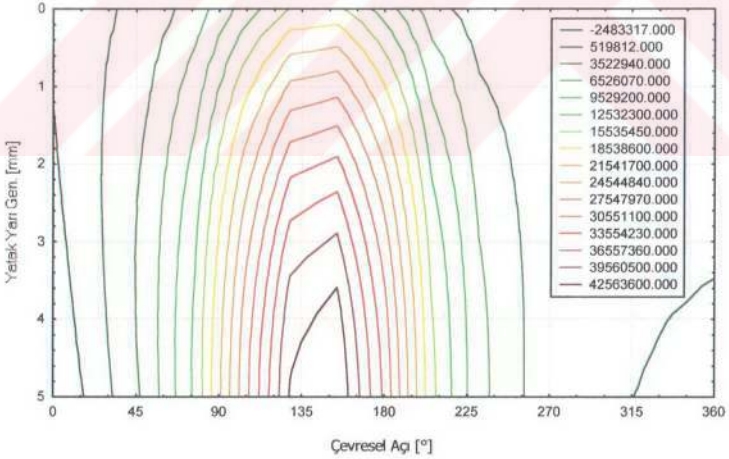


Şekil 83. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları

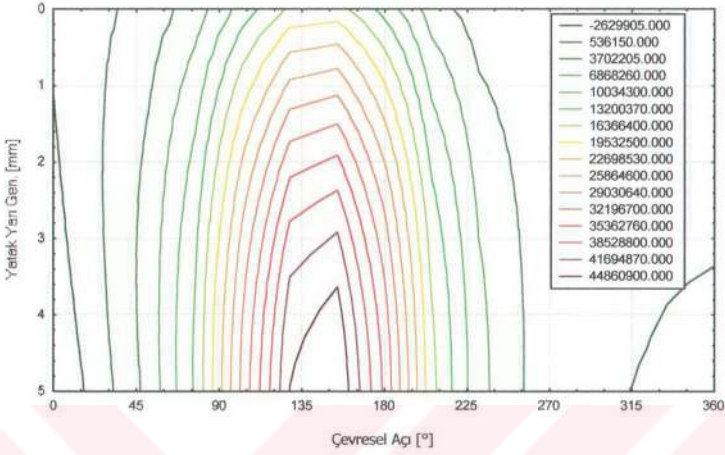
Şekil 84’de verilmektedir. Burada maksimum gerilme değerleri yatak ortasında yağ filminin tepe basıncına karşılık gelen yerde 516,4 MPa ($0,42 P_{max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. Yatak yüzeyinin 0,107 mm altındaki tabakada Şekil 85’de, yatak yüzeyinin 0,213 mm altındaki tabakada Şekil 86’da, yatak yüzeyinin 0,32 mm altındaki teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyindeki tabakada Şekil 87’de ve 0,538 mm altındaki çelik destek tabakası içerisinde Şekil 88’de von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanmış eşdeğer gerilmelerin eş gerilme dağılım eğrileri verilmektedir. Burada yatak yüzeyinde ortaya çıkan maksimum eş gerilme değeri zarf derinliği arttıkça artış göstermekte ve teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde 687,3 MPa ($0,56 P_{max}$) değerine erişmektedir. Bu tabakada eşdeğer gerilmenin yatak yüzeyine göre yaklaşık 1,3 kat daha büyük olduğu gözlenmektedir. Söz konusu kritere göre yorulma çatlaklarının oluşumunun başlangıç noktası olarak bu birleşim yüzeyinde yatak ortasında yağ film basıncının tepe noktasma karşılık gelen konum olarak göz önüne alınabilir.



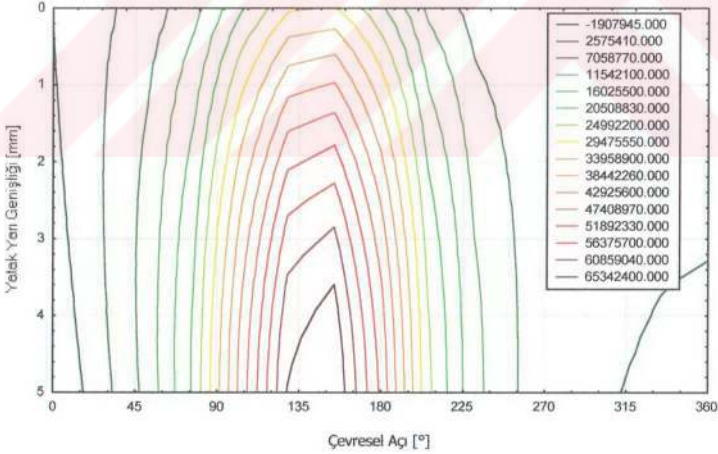
Şekil 84. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



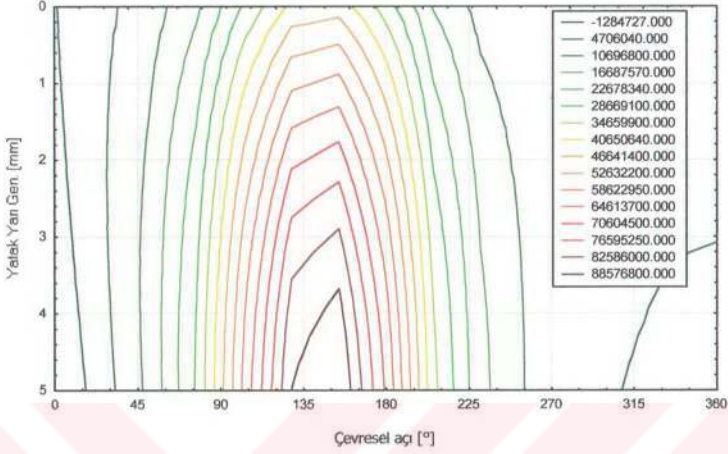
Şekil 85. Yatak zarfı yüzeyini 0,107 mm altındaki tabakada hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



Şekil 86. Yatak zarfı yüzeyini 0,213 mm altındaki tabakada hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



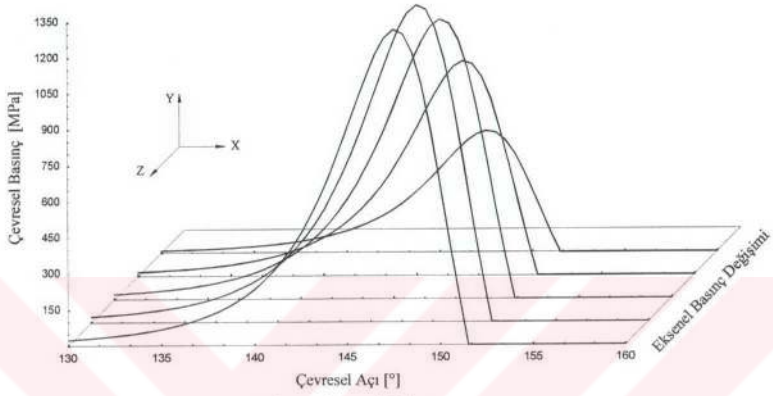
Şekil 87. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



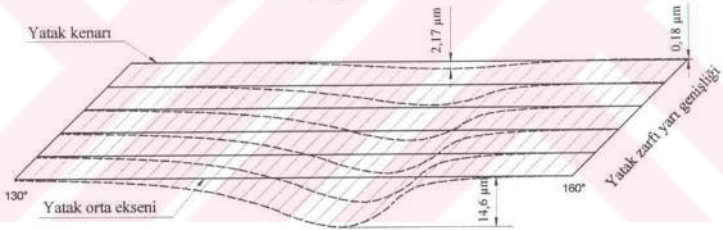
Şekil 88. Yatak zarfı yüzeyini 0,538 mm altındaki tabakada hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları

3.2.1.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları

Yağ filmindeki aynı basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Şekil 89'da görülmektedir. Burada ortaya çıkan çökmeler yatak ortasında maksimum 14,6 μm değerini alıp basınç alanı ile uyumlu olarak yatak kenarına doğru enine doğrultuda 2,17 μm değerine kadar gittikçe azalmaktadır. Basınç alanı dışında ise çevresel olarak gittikçe azalan çökme miktarları yatak zarfı yüzeyinde sona erip bu noktadan sonra 0,18 μm kadar yükselme göstermektedir. Radyal deformasyonların yatak zarfındaki deformasyon bölgeleri şeklinde ortaya çıkan dağılımları Şekil 90'da görülmektedir.

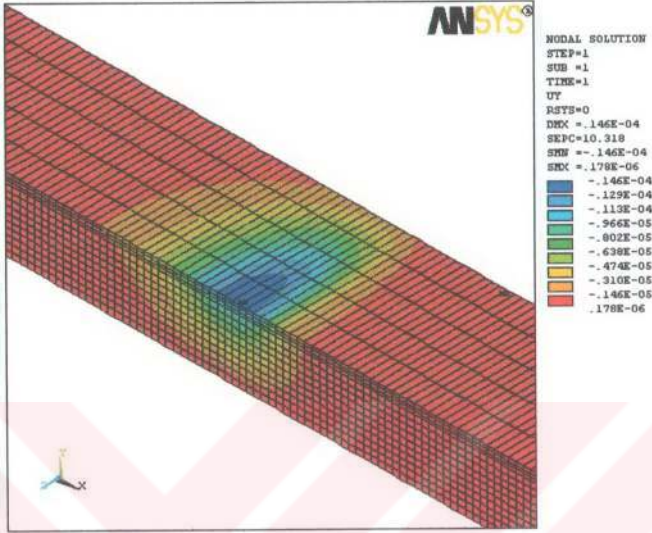


a- Çevresel basınç dağılımı



b- Radyal yer değiştirme

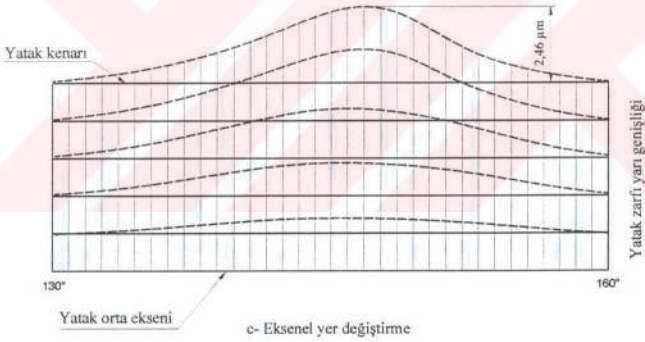
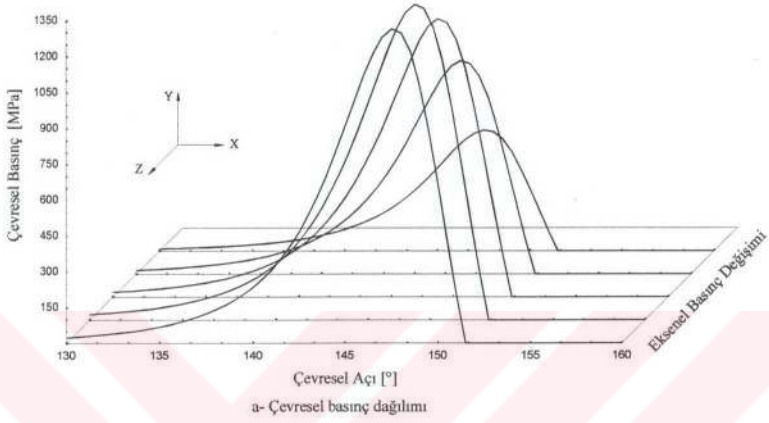
Şekil 89. II nolu yük altında 273° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar



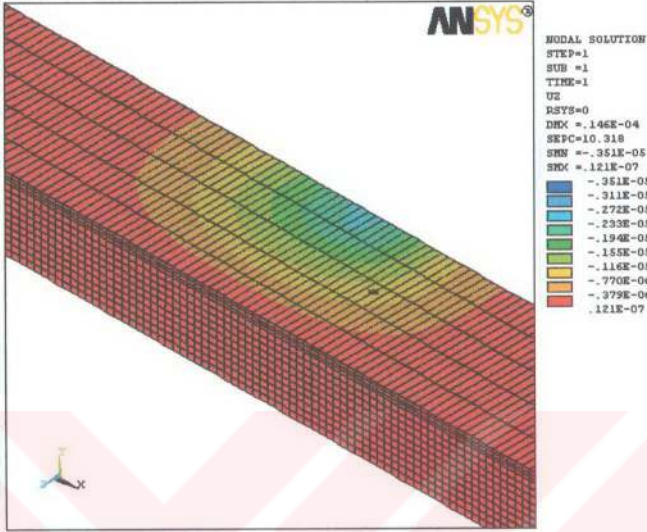
Şekil 90. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları

3.2.1.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları

Bu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar Şekil 91'de verilmektedir. Burada en büyük deformasyonlar basınç alanı içinde yatak kenarında, yatak zarfından dışarıya doğru 2,46 μm olarak ortaya çıkmaktadır. Eksenel deformasyonların yatak zarfındaki bölgesel dağılımları Şekil 92'de görülmektedir. Yatak zarfında en büyük eksenel deformasyon yatak kenarında zarf alt yüzeyinde 3,5 μm değerinde ortaya çıkmaktadır.



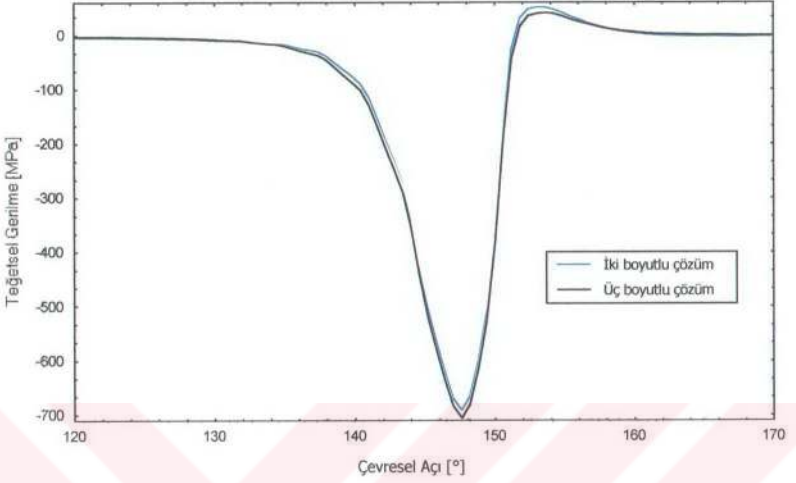
Şekil 91. II nolu yük altında 273°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar



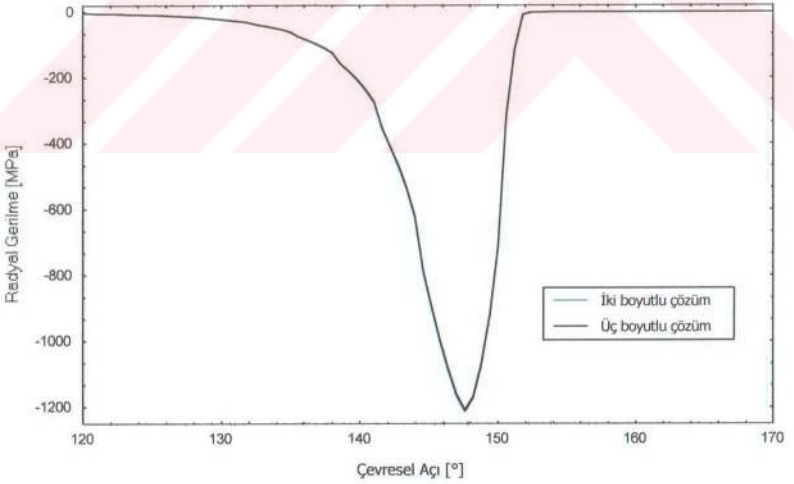
Şekil 92. II nolu yükte 273° krank açısında oluşan basınç etkisinde 10 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları

3.2.1.3. İki ve Üç Boyutlu Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan sonlu elemanlar çözümleri sonucunda, iki boyutlu çözümlerde yatak yüzeyinde ve üç boyutlu çözümlerde ise yatak orta eksenı üzerinde oluşan teğetsel ve radyal gerilme dağılımları ile radyal deformasyon dağılımları karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 93, Şekil 94 ve Şekil 95'de verilmektedir. Çeki karakterli en büyük teğetsel gerilme iki boyutlu çözümde 51 MPa, üç boyutlu çözümde ise 41,65 MPa değerlerini almaktadır. Bası karakterli en büyük teğetsel gerilme ise iki boyutlu çözümde 691 MPa, üç boyutlu çözümde de 705 MPa değerlerini almaktadır. Şekil 93'den de görüldüğü gibi bu değerler aynı konumlarda meydana gelmektedir. Aynı durum radyal gerilme dağılımlarında da görülmektedir, Şekil 94. İki boyutlu çözümde bası karakterli en büyük radyal gerilme 1214,6 MPa olurken, üç boyutlu çözümde de 1210 MPa olmaktadır.

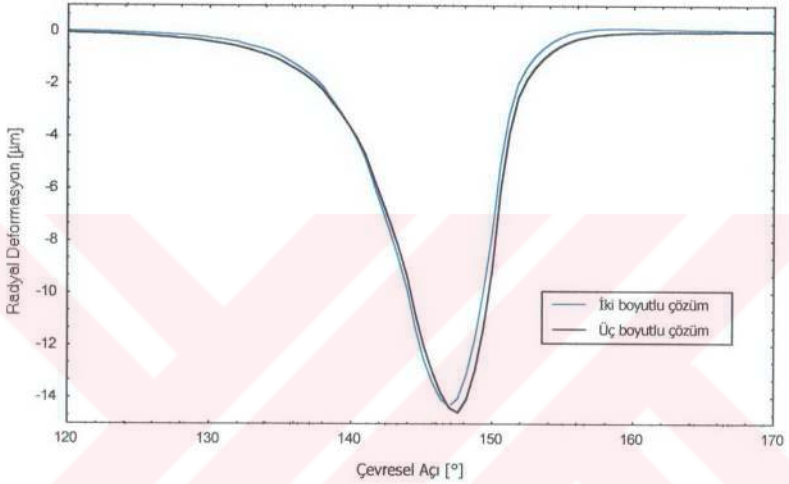


Şekil 93. 10 mm genişliğindeki yatağın iki ve üç boyutlu çözümleri sonucunda yatak orta eksenli yüzeyinde oluşan teğetsel gerilme dağılımları



Şekil 94. 10 mm genişliğindeki yatağın iki ve üç boyutlu çözümleri sonucunda yatak orta eksenli yüzeyinde oluşan radyal gerilme dağılımları

İki boyutlu sayısal çözümde oluşan en büyük radyal deformasyon $14,4 \mu\text{m}$ iken üç boyutlu çözümde ise $14,6 \mu\text{m}$ olmaktadır. İki boyutlu çözümde yatak yüzeyinden $0,12 \mu\text{m}$ 'lik bir yükselme olurken üç boyutlu çözümde ise $0,023 \mu\text{m}$ 'lik bir yükselme olmaktadır, Şekil 95.

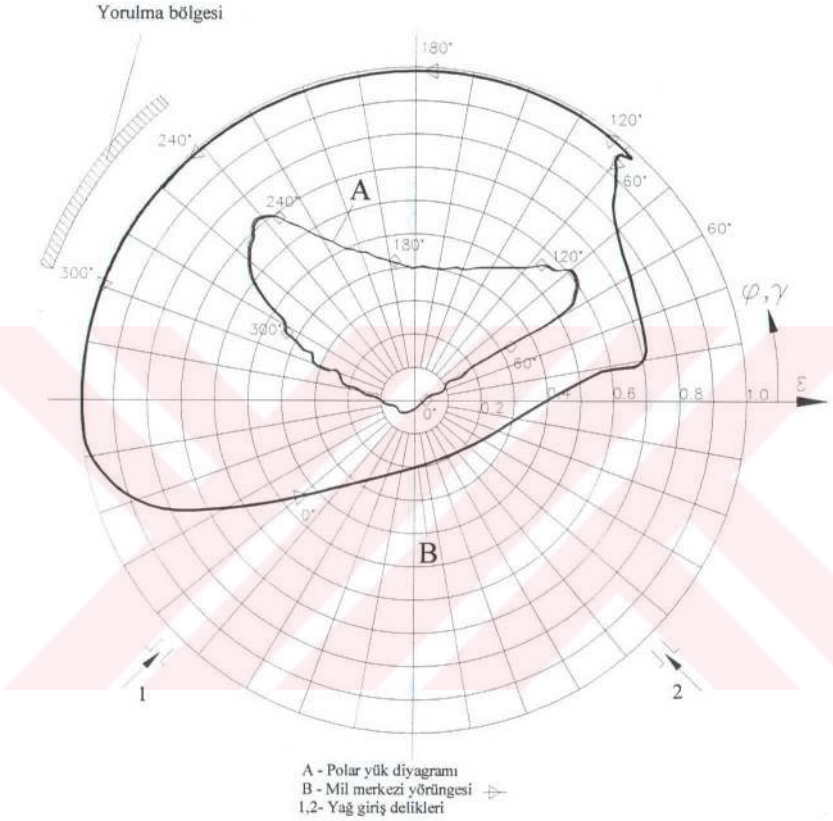


Şekil 95. 10 mm genişliğindeki yatağın iki ve üç boyutlu çözümleri sonucunda yatak orta eksen yüzeyinde oluşan radyal deformasyon dağılımları

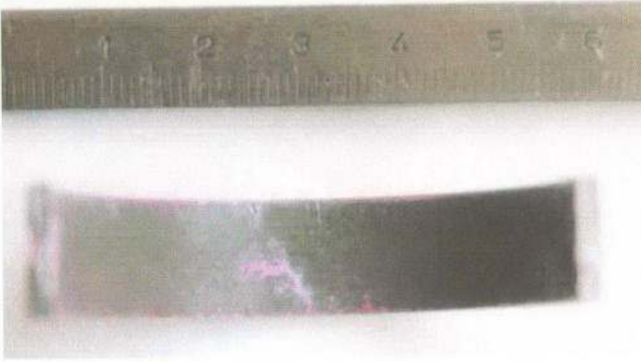
İki ve üç boyutlu yapılan çözümlerde, göz önüne alınan konumlarda elde edilen sonuçlar yaklaşık olarak aynı kabul edilebilir.

3.2.2. Genişliği 12 mm Olan Yatakla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Yatak genişliği değişiminin etkisini görmek üzere, yatak genişliği 12 mm olarak alındığında aynı II nolu dinamik yükün polar yük diyagramı, mil merkezinin yörüngesi ve yorulma bölgesi Şekil 96'da görüldüğü gibi elde edilmektedir. Deney yatağında oluşan yorulma çatlaklarının yataktan alınmış fotoğrafı Şekil 97'de görülmektedir.



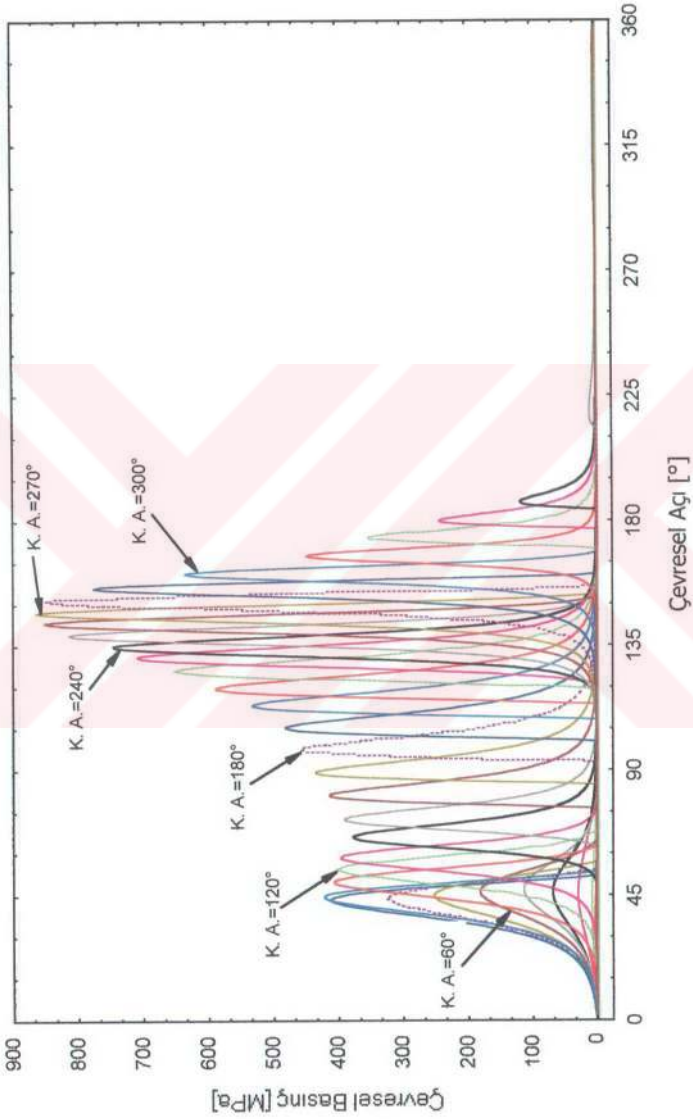
Şekil 96. II nolu dinamik yük altında ve 12 mm genişliğindeki yataкта oluşan mil merkezi yörüngesi



Şekil 97. II nolu yük altında ve 12 mm genişliğindeki yatakta oluşan yorulma bölgesi

Burada kılcak çatlaklar yatak orta kısmında başlayıp hem çevresel hem de eksenel yönde ilerlemekte ve yatak kenarına kadar ulaştığı görülmektedir. Deney yatağında yorulma bölgesi yatağın çevresel açısı göz önüne alındığında 130° ile 160° arasında oluşmaktadır. Yorulma çatlaklarının başlangıç konumu mil merkezi yörüngesinin minimum olduğu konumdan 25° daha önce ortaya çıkmaktadır. Deney yatağında oluşan bu yorulma çatlakları yaklaşık 2 saatlik çalışma süresi (148.800 yük tekrarı) sonunda ortaya çıkmaktadır.

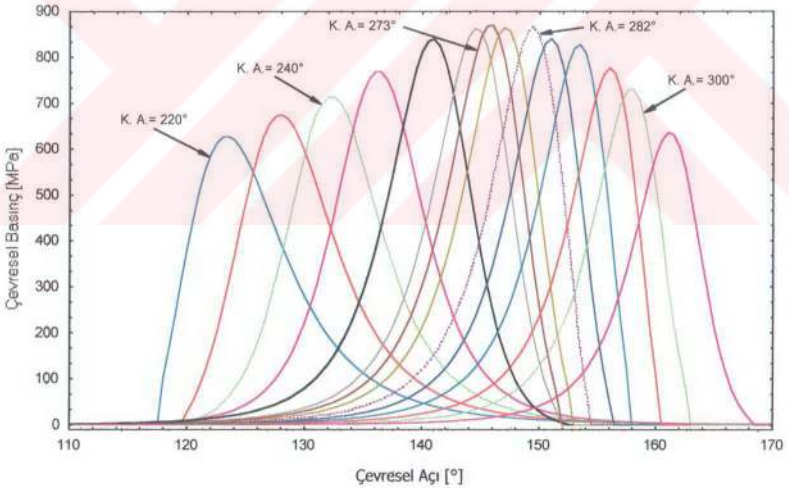
II nolu dinamik yük etkisinde 12 mm genişliğindeki yatakta milin her 10° 'lik krank açısında ortaya çıkan çevresel basınç dağılımları Şekil 98'de verilmektedir. Basınç dağılımlarının incelenmesinden de görüldüğü gibi en büyük basınç dağılımı değerleri yatağın çevresel açısı 130° ile 160° arasındaki yorulma bölgesinde oluşmaktadır. Burada en büyük basınç değeri 273° 'deki krank açısındaki basınç dağılımında 868 MPa olarak ortaya çıkmaktadır. Bu anda yatağa 26461 N'luk bir kuvvet etki etmektedir. II nolu dinamik yük etkisinde yatak genişliği 10 mm'den 12 mm'ye arttığında, ortaya çıkan yağ film basınçlarının maksimum değerlerinde gözle görülür bir azalma olmaktadır. Örneğin krank açısının 273° 'deki değeri 10 mm yatak genişliğinde 1230 MPa, 12 mm yatak genişliğinde ise 868 MPa olmaktadır. Diğer krank açılarındaki basınç dağılımları da yaklaşık aynı oranlarda bir azalma göstermektedir.



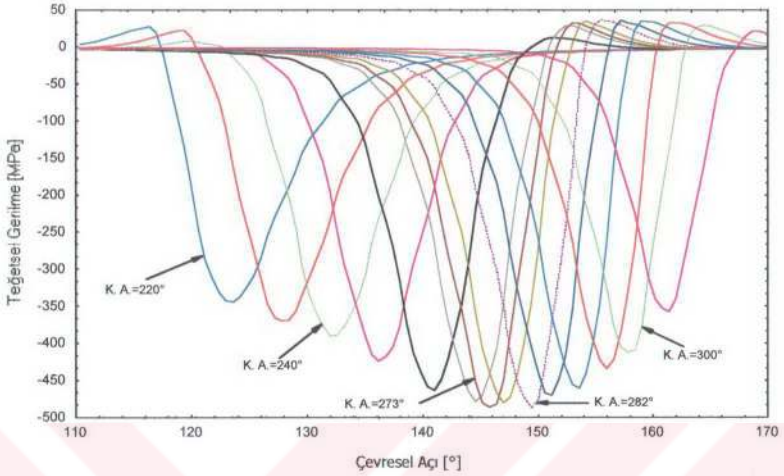
Şekil 98. II nolu dinamik yük altında ve 12 mm genişliğindeki yataкта 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları

3.2.2.1. Genişliği 12 mm Olan Yatak İçin İki Boyutlu Sayısal özüm Sonuçları

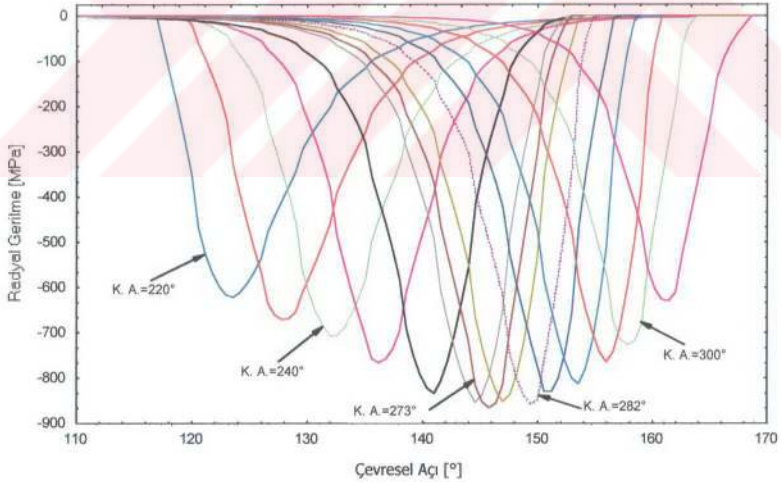
Burada ortaya çıkan yorulma bölęesi yatağın çevresel açıları 130° ile 160° arası göz önüne alındığında bu bölęeye etki eden yağ filmi basınç dağılımları Şekil 99'da verilmektedir. Sonlu elemanlarla modellenen 12 mm genişliğindeki yatak zarfında ortaya çıkan gerilmelerin hesabında bu basınç dağılımları göz önüne alınmıştır. Yapılan iki boyutlu çözümleme sonucunda yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 100 ve radyal gerilme dağılımları da Şekil 101'de verilmektedir. Burada teğetsel çeki gerilmelerinin maksimum değeri yatağın 155° 'lik çevresel açısında 36 MPa olarak 282° 'lik krank açısında ortaya çıkmaktadır. Bu krank açısında yağ filminde oluşan basınç dağılımının maksimum değeri 866 MPa'dır. Teğetsel eki gerilmelerinin yorulma çatlakları üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, yorulma bölęesi ile teğetsel çeki gerilmelerinin oluştuğu bölęenin uyum içerisinde olduğu söylenebilir.



Şekil 99. II nolu yük altında ve 12 mm genişliğindeki yatağın yorulma bölęesine etki eden basınç dağılımları



Şekil 100. Şekil 99'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan teğetsel gerilmeler



Şekil 101. Şekil 99'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan radyal gerilmeler

Krank açısı 282° 'de iken yatakta yağ filminde oluşan basınç dağılımı göz önüne alınarak yatak zarfında zarf kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Ek Şekil 1-b'de göz önüne alınan basınç dağılımı altında zarf kalınlığı boyunca eş teğetsel gerilme eğrileri verilmektedir. Burada yağ filmi basıncının altındaki bölgede teflon-bronz tabakasında teğetsel bası gerilmeleri söz konusu olur iken basınç alanı dışında teğetsel çeki gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Teflon-bronz tabakasında basınç alanı altında yatak zarfı yüzeyinde en büyük teğetsel bası gerilmesi $487,6 \text{ MPa}$ ($0,563 P_{\max}$) değerinde oluşurken, teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ise basınç alanı altında en büyük teğetsel bası gerilmesi $308,7 \text{ MPa}$ ($0,356 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. Basınç alanı dışında yatak zarfı yüzeyinde en büyük teğetsel çeki gerilmesi 36 MPa ($0,041 P_{\max}$) değerinde hesaplanırken, birleşim yüzeyinde ise basınç alanı dışında en büyük teğetsel çeki gerilmesi de $61,8 \text{ MPa}$ ($0,071 P_{\max}$) değerinde belirlenmiştir.

Göz önüne alınan basınç alanı etkisi altında yatak zarfı kalınlığı boyunca oluşan eş radyal gerilme değerleri dağılımı Ek Şekil 2'de verilmektedir. Burada basınç dağılımının maksimum tepe noktası altına karşılık gelen yatak yüzeyinde en büyük bası karakterli radyal gerilme $858,4 \text{ MPa}$ ($\approx 1 P_{\max}$) olarak ortaya çıkmaktadır.

Aynı basınç dağılımı altında yatak zarfı kalınlığı boyunca ortaya çıkan eş kayma gerilmesi değerleri Ek Şekil 3'de verilmektedir. Burada büyük basınç gradyanı altında maksimum değeri 126 MPa ($0,145 P_{\max}$) olan pozitif değerli kayma gerilmesi zarf yüzeyinin yaklaşık $0,76 \text{ mm}$ ($h/s = 0,304$) altında, daha küçük eğime sahip basınç gradyanı altında ise maksimum değeri 80 MPa ($0,092 P_{\max}$) olan negatif değerli kayma gerilmesi yaklaşık aynı derinliğe yakın bölgede ortaya çıkmaktadır.

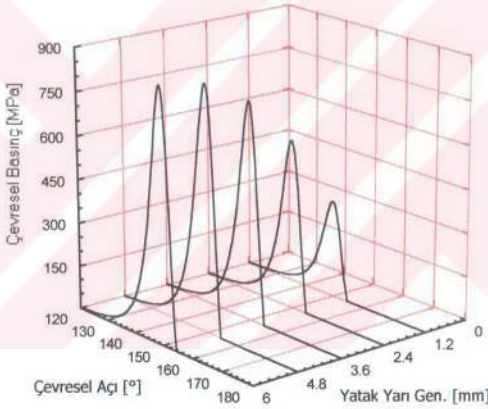
Yatak zarfında göz önüne alınan basınç dağılımı altında ortaya çıkan gerilmeler von Mises hipotezine göre hesaplandığında eş gerilme dağılımları Ek Şekil 4'deki gibi elde edilmektedir. Burada en büyük eşdeğer gerilmeler yağ filminin tepe basıncı altına karşılık gelen yatak yüzeyinden yaklaşık $1,2 \text{ mm}$ kadar altında 706 MPa ($0,815 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. Teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ise 432 MPa ($0,499 P_{\max}$), yatak zarfı yüzeyinde ise 353 MPa ($0,407 P_{\max}$) olarak eşdeğer gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu kritere göre yatak için yorulma çatlaklarının başlangıç noktası olarak basınç dağılımının tepe basınç değerine karşılık gelen yatak yüzeyi altında teflon-bronz tabakası çelik destek tabakası birleşim noktası olarak söylenebilir.

Bu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan radyal deformasyonlar çevresel basınç dağılımı değişimiyle uyumlu olarak ortaya çıkmaktadır, Ek Şekil 5-b.

Burada yağ film tepe basıncına karşılık gelen noktada çökme $10,5 \mu\text{m}$ değerini alıp çevresel basıncın azalmasına uyumlu olarak çökme miktarı azalmakta ve basınç alanı dışında zarf yüzeyinde $0,118 \mu\text{m}$ kadar yükselme göstermektedir. Bu basınç alanı altında yatak zarfındaki eş deformasyon eğrileri Ek Şekil 5-c’de verilmektedir.

3.2.2.2. Genişliği 12 mm Olan Yatak İçin Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Burada II nolu dinamik yük örneği altında krank açısının 282° ’deki değerinde yağ filminde ortaya çıkan çevresel ve enine basınç dağılımı Şekil 102’de verilmektedir. Bu basınç dağılımının enine doğrultuda parabolik bir dağılıma sahip olması nedeniyle ortaya çıkan gerilmeler ve deformasyonlar yatak yarı zarfında hesaplanacaktır.



Şekil 102. II nolu yük altında 12 mm genişliğindeki yatakta 282° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max} = 866 \text{ MPa}$)

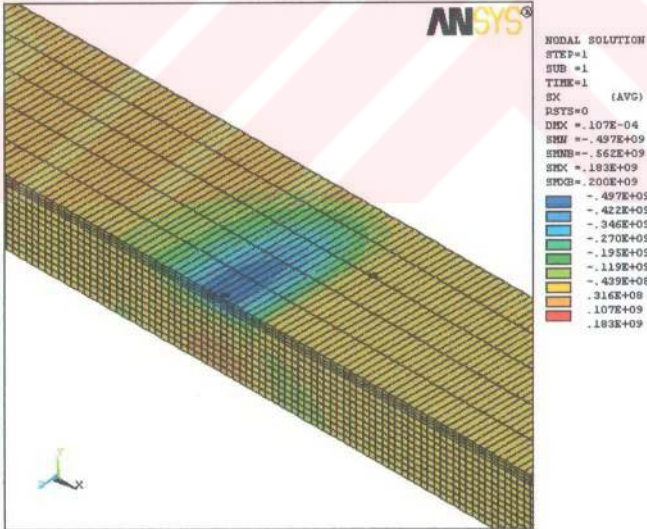
3.2.2.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları

Bu basınç dağılımı altında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin zarf yüzeyindeki değişimleri Ek Şekil 6’da görülmektedir. Burada basınç alanı dışında kalan zarf yüzeyinde meydana gelen teğetsel çeki gerilmelerin maksimum değeri yatak ortasında $29,3 \text{ MPa}$ ($0,034 P_{\max}$) değerinde başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde gittikçe azalarak

17 MPa ($0,02 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Yağ filmi basınç alanı altında ise bası karakterli teğetsel gerilmeler yatak ortasında 497 MPa'lık ($0,574 P_{\max}$) değerle başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 13,8 MPa ($0,016 P_{\max}$) değerine düşmektedir.

Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altında, teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Ek Şekil 7'de verilmektedir. Burada çeki karakterli teğetsel gerilmeler maksimum 45,6 MPa ($0,053 P_{\max}$) değerinde başlayıp yatak kenarına doğru artarak 61,1 MPa ($0,07 P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır. Birleşim yüzeyinde bası karakterli teğetsel gerilmeler ise maksimum değeri 342,4 MPa ($0,395 P_{\max}$) olarak başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde azalarak 10,5 MPa ($0,012 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Burada yatak ortasındaki teğetsel çeki gerilmeleri yatak yüzeyinden teflon-bronz tabakasının çelik destek tabakası birleşim yüzeyine kadar gittikçe artış gösterirken, bası karakterli teğetsel gerilmeler ise yatak yüzeyinden birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalış göstermektedir.

Yukarıda verilen teğetsel gerilmelerin üç boyutlu bölgesel dağılımı Şekil 103'de görülmektedir. Burada en büyük çeki karakterli teğetsel gerilme yatak zarfının alt



Şekil 103. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilmeler

yüzeyinde yatak kenarında 182,7 MPa ($0,211 P_{max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. En büyük bası karakterli teğetsel gerilme ise yatak ortasında yatak zarfı yüzeyinde 497 MPa ($0,574 P_{max}$) değerinde oluşmaktadır.

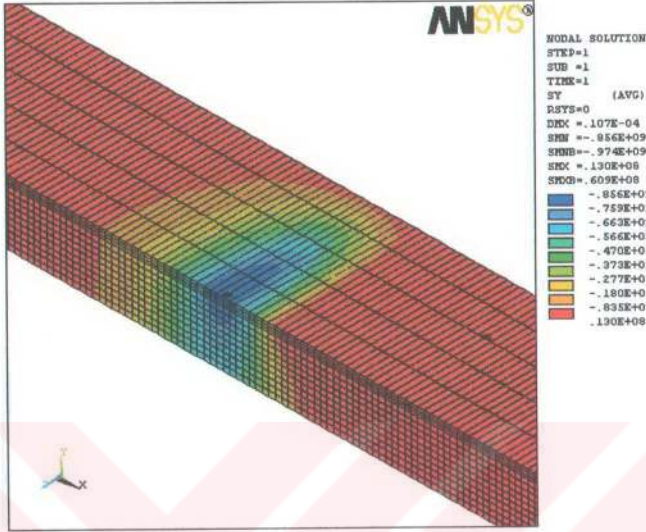
3.2.2.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları

Göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyinde ortaya çıkan bası karakterli radyal gerilmelerin dağılımı Ek Şekil 8 ve Ek Şekil 9'da verilmektedir. Burada basınç dağılımına uygun olarak yatak yüzeyinde ortaya çıkan maksimum radyal gerilme değeri 855,6 MPa ($\approx 1 P_{max}$), birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak 837 MPa ($0,967 P_{max}$) değerine düşmektedir. Radyal gerilmeler yatak yüzeyinde ve birleşim yüzeyinde yatak ortasında maksimum değerden başlayıp yatak kenarına doğru enine yönde gittikçe azalarak, yatak yüzeyinde 19,8 MPa ($0,023 P_{max}$) birleşim yüzeyinde ise 31,6 MPa ($0,036 P_{max}$) değerine ulaşmaktadır.

Üç boyutlu yatak zarfında hesaplanan radyal gerilmelerin bölgesel gerilme dağılımları Şekil 10'da verilmektedir. Yatak zarfının tümü göz önüne alındığında, en büyük radyal gerilme yatak ortasında ve yatak zarfı yüzeyinde 855,6 MPa ($\approx 1 P_{max}$) olarak oluşmaktadır.

3.2.2.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları

Yağ filmindeki aynı basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfı yüzeyi ile yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyinde ortaya çıkan eksenel gerilme dağılımları Ek Şekil 10 ve Ek Şekil 11'de verilmektedir. Burada yağ filmi basınç alanı içerisinde bası karakterli eksenel gerilmeler ortaya çıkarken basınç alanı dışında çeki karakterli eksenel gerilmeler oluşmaktadır. Bası karakterli eksenel gerilmeler yatak yüzeyinde 479,6 MPa ($0,554 P_{max}$) değerinde başlayıp birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak 331,2 MPa ($0,382 P_{max}$) değerine düşmektedir. Enine yönde ise yatak ortasında maksimum değerden başlayıp yatak kenarına doğru gittikçe azalarak, yatak yüzeyinde 80,6 MPa ($0,093 P_{max}$), birleşim yüzeyinde 41,1 MPa ($0,047 P_{max}$) değerine azalmaktadır. Burada yatak ortasında çeki karakterli eksenel gerilmeler yatak yüzeyinde 26,2 MPa ($0,03 P_{max}$) değerinde başlayıp birleşim yüzeyinde 55,8 MPa ($0,064 P_{max}$) değerine kadar artmaktadır. Çeki karakterli eksenel gerilmeler enine doğrultuda ise gittikçe azalmakta ve yatak yüzeyinde



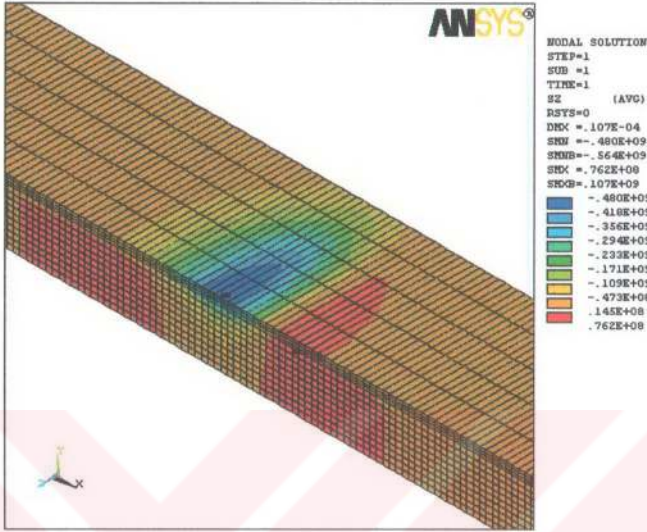
Şekil 104. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal gerilmeler

3,9 MPa (0,0045 P_{max}) değerine, birleşim yüzeyinde ise 7,8 MPa (0,009 P_{max}) değerine düşmektedir.

Üç boyutlu yatak zarfında hesaplanan eksenel gerilmelerin bölgesel gerilme dağılımları Şekil 105’de verilmektedir. Burada yatak ortasında zarf yüzeyinden 0,54 mm derinlikteki çeki karakterli eksenel gerilme 76,2 MPa (0,088 P_{max}) değerinde ortaya çıkmaktadır. En büyük bası karakterli eksenel gerilme ise yatak ortasında yatak zarfı yüzeyinde 479,6 MPa (0,554 P_{max}) değerinde oluşmaktadır.

3.2.2.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Sonuçları

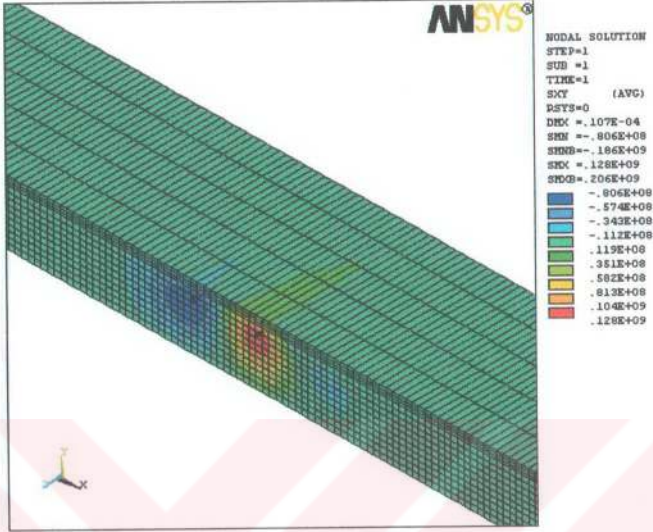
Göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak zarfında yapılan üç boyutlu çözümleme sonucu yatak zarfı yüzeyi ile yüzeyin 0,32 mm altında birleşim yüzeyinde hesaplanan τ_{xy} kayma gerilme dağılımları Ek Şekil 12 ve Ek Şekil 13’de verilmektedir. Burada ortaya çıkan pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi en büyük değerini yatak ortasında almakta, yatak yüzeyinde 20,1 MPa (0,023 P_{max}) değerinde başlayıp birleşim



Şekil 105. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilmeler

yüzeyinde 99,2 MPa ($0,114 P_{\max}$) değerine kadar artmaktadır. Benzer şekilde negatif değerlikli maksimum τ_{xy} kayma gerilmesi yatak yüzeyinde 12,1 MPa ($0,014 P_{\max}$) değerinde başlayıp birleşim yüzeyinde 60,3 MPa ($0,07 P_{\max}$) değerine kadar yükselmektedir. Yatak genişliği yönünde ise hem pozitif değerlikli hem de negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmeleri azalma göstermektedirler.

Hesaplanan τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin yatak zarfındaki üç boyutlu bölgesel dağılım değerleri Şekil 106'da verilmektedir. Burada yatak ortasında yüzeyden 0,76 mm derinlikte büyük basınç gradyanına sahip basınç ayağının altında en büyük pozitif değerli τ_{xy} kayma gerilmesi 127,6 MPa ($0,147 P_{\max}$) olarak ortaya çıkmaktadır. En büyük negatif değerli τ_{xy} kayma gerilmesi ise yine aynı kesitte ve derinlikte diğer basınç ayağının altında 80,6 MPa ($0,93 P_{\max}$) değerinde oluşmaktadır.



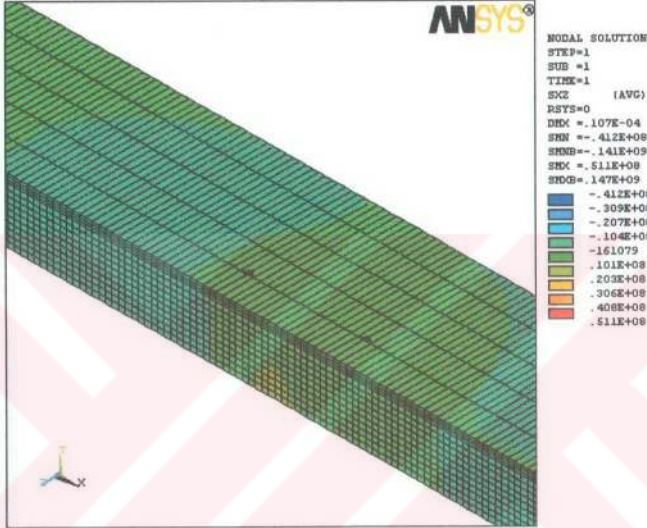
Şekil 106. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları

3.2.2.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Sonuçları

Aynı yağ filmi basıncı altında yatak yüzeyinde ve yatak yüzeyinin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları ise Ek Şekil 14 ve Ek Şekil 15’de görülmektedir. Burada pozitif ve negatif değerlikli maksimum τ_{xz} kayma gerilmeleri hem yatak ortasından kenara doğru gidildikçe hem de yatak yüzeyinden birleşim yüzeyine doru inildikçe artış göstermektedirler. Burada oluşan pozitif değerlikli en büyük τ_{xz} kayma gerilmesi değerleri yatak yüzeyinde 2,6 MPa (0,003 P_{max}) değerinde başlayıp birleşim yüzeyinde 14 MPa (0,016 P_{max}) değerine erişmektedir. Benzer şekilde negatif değerlikli en büyük τ_{xz} kayma gerilmesi yatak yüzeyinde 2,6 MPa (0,003 P_{max}) değerinde başlayıp birleşim yüzeyinde 11,2 MPa (0,013 P_{max}) değerine kadar artmaktadır.

Hesaplanan τ_{xz} kayma gerilmelerinin üç boyutlu yatak zarfındaki bölgesel gerilme değerleri dağılımı Şekil 107’de verilmektedir. Burada yatak zarfı alt yüzeyinde enine

doğrultuda 2,4 mm ileride en büyük pozitif değerli τ_{xz} kayma gerilmesi 51,1 MPa ($0,059 P_{max}$) olarak ortaya çıkmaktadır. En büyük negatif değerli τ_{xz} kayma gerilmesi ise yine yatak zarfı alt yüzeyinde enine yönde 2,4 mm ileride 41,2 MPa ($0,048 P_{max}$) değerinde oluşmaktadır.



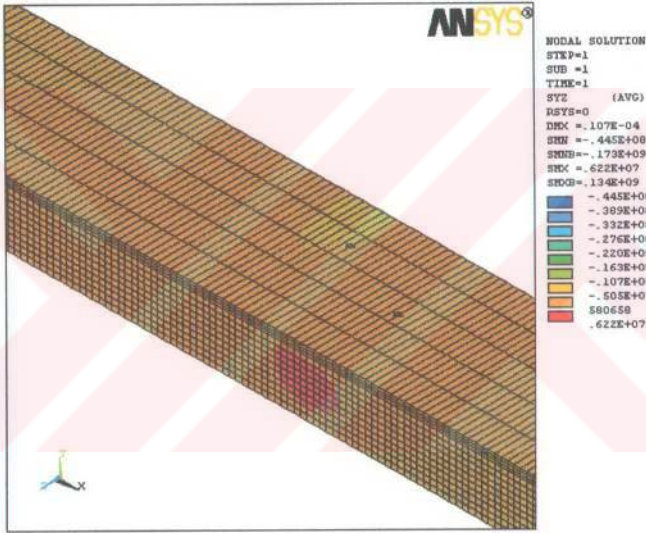
Şekil 107. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları

3.2.2.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Sonuçları

Göz önüne alınan yağ film basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde hesaplanan τ_{yz} kayma gerilmeleri değişimi Ek Şekil 16 ve Ek Şekil 17'de verilmektedir. Burada hem pozitif hem negatif değerlikli τ_{yz} kayma gerilmeleri yatak yüzeyinden birleşim yüzeyine doğru artış gösterdiği gibi yatak ortasından yatak kenarına doğru da artış göstermektedir. Burada oluşan pozitif değerlikli en büyük τ_{yz} kayma gerilmesi değerleri yatak yüzeyinde 0,33 MPa ($0,0004 P_{max}$) değerinde başlayıp birleşim yüzeyinde 2,3 MPa ($0,0027 P_{max}$) değerine yükselmektedir. Negatif

değerlikli en büyük τ_{yz} kayma gerilmesi ise yatak yüzeyinde 7,2 MPa (0,008 P_{max}) değerinde başlayıp birleşim yüzeyinde 38,8 MPa (0,045 P_{max}) değerine kadar artmaktadır.

Hesaplanan τ_{yz} kayma gerilmelerinin yatak zarfında üç boyutlu olarak bölgesel gerilme dağılımları Şekil 108'de verilmektedir. Yatak zarfının tümü göz önüne alındığında, yüzeyden 0,97 mm derinlikte enine yönde 2,4 mm ileride en büyük pozitif değerli τ_{yz} kayma gerilmesi 6,22 MPa (0,007 P_{max}) olarak ortaya çıkmaktadır. En büyük negatif değerli τ_{yz} kayma gerilmesi ise yatak zarfı yüzeyinden 0,76 mm derinlikte enine yönde yine 1,2 mm ileride 44,5 MPa (0,051 P_{max}) değerinde oluşmaktadır.

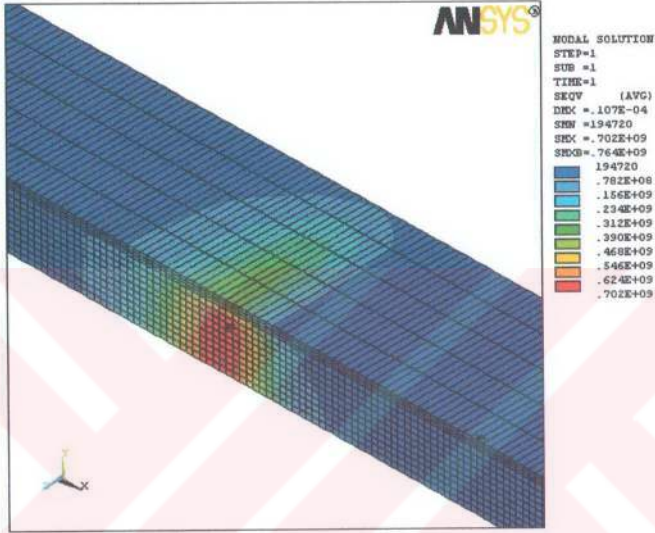


Şekil 108. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları

3.2.2.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Sonuçları

Göz önüne alınan yağ filmindeki basınç dağılımı altında üç boyutlu olarak yatak zarfında ortaya çıkan gerilmelerle von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanmış olan eşdeğer gerilmelerin bölgesel dağılımları Şekil 109'da verilmektedir. Burada yağ filmi

basıncının maksimum değere sahip olduğu tepe noktası altında, yatak ortasında, yatak yüzeyinden yaklaşık 0,98 mm derinlikte çelik destek tabakası içerisinde 702 MPa ($0,81 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır.

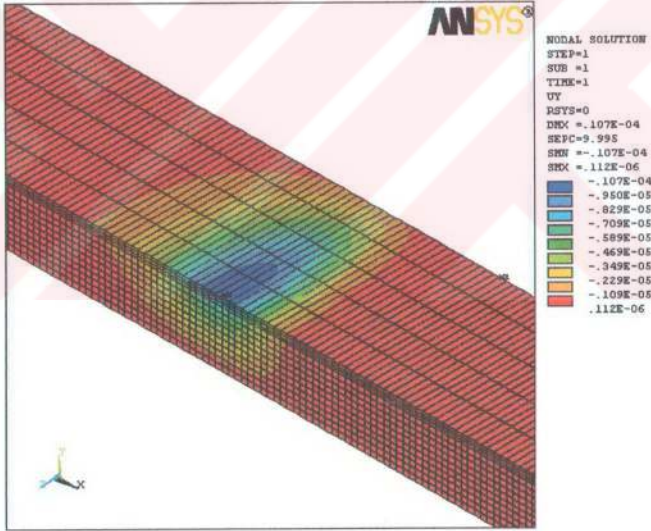


Şekil 109. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları

Yatak yüzeyinde von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri Ek Şekil 18’de görülmektedir. Burada maksimum eşdeğer gerilme yağ filmi basıncının tepe noktası altına karşılık gelen yerde 368 MPa ($0,425 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır. Aynı noktanın yatak yüzeyinin 0,32 mm altındaki teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilme ise 500,4 MPa ($0,578 P_{\max}$) değerindedir. Bu birleşim yüzündeki eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri de Ek Şekil 19’da verilmektedir. Yatak zarfının üç boyutlu analizi sonucu hesaplanan eşdeğer gerilmelerin yatak yüzeyinden birleşim yüzeyine doğru artış gösterdiği görülmektedir.

3.2.2.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Sonuçları

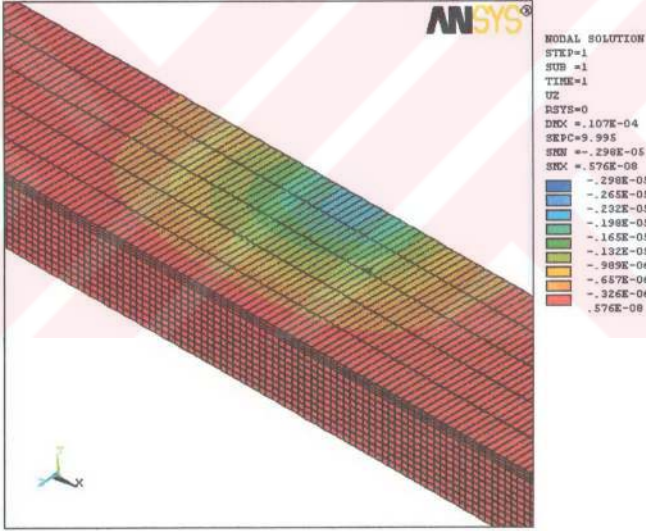
Yatak zarfının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analizinde göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Ek Şekil 20'de verilmektedir. Burada en büyük çökme değeri basınç dağılımının tepe noktasına karşılık gelen yatak ortasında $10,7 \mu\text{m}$ olarak ortaya çıkmakta ve yatak kenarına doğru gittikçe azalarak $1,4 \mu\text{m}$ değerine düşmektedir. Çevresel yönde basınç alanı ile uyumlu bir çökme ortaya çıkmakta olup basınç alanının bitmesinden sonra çökmeler sıfıra inmekte ve daha sonra yatak yüzeyinden $0,112 \mu\text{m}$ kadar yükselme göstermektedir. Radyal deformasyonların yatak zarfında deformasyon bölgeleri şeklinde ortaya çıkan dağılımları Şekil 110'da verilmektedir.



Şekil 110. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları

3.2.2.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Sonuçları

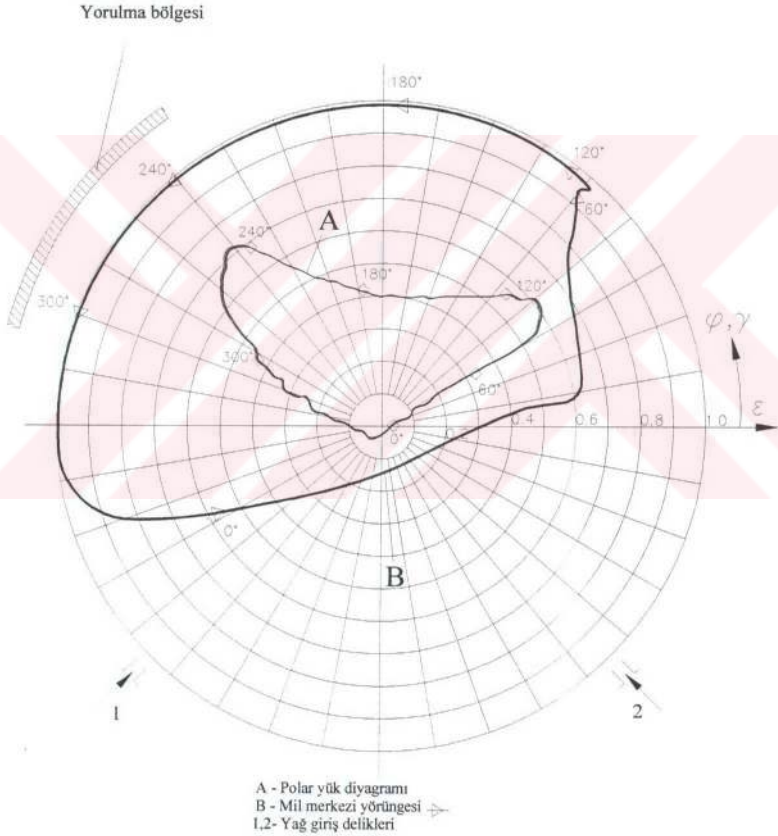
Yatak zarfında göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar Ek Şekil 21'de görülmektedir. Burada en büyük deformasyonlar basınç dağılımının maksimum olduğu kısma karşılık gelen yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru 2,11 μm değerinde ortaya çıkmaktadır. Yatak zarfında eksenel deformasyonların bölgesel dağılımı Şekil 111'de verilmektedir. Eksenel olarak ortaya çıkan en büyük deformasyonlar yatak kenarında yatak yüzeyinde 2,11 μm değerinden başlayıp zarf kalınlığı boyunca artarak zarf alt yüzeyinde 3 μm değerine erişmektedir.



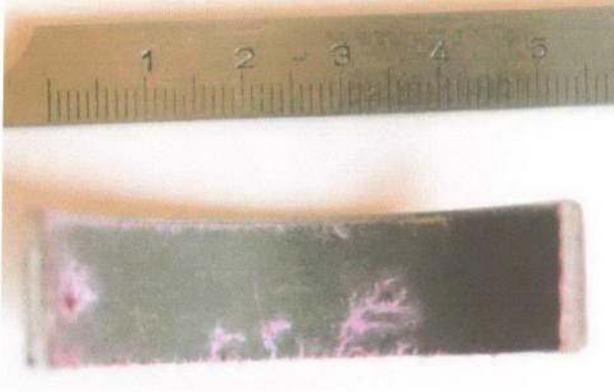
Şekil 111. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları

3.2.3. Genişliği 14 mm Olan Yatakla Yapılan Deneylerden Elde Edilen Bulgular

Aynı II nolu dinamik yük örneği altında yatak genişliği 14 mm alınarak yapılan deneylerde elde edilen yorulma bölgesi, polar yük diyagramı, mil merkezinin yörüngesi Şekil 112’de verilmektedir. Yorulma bölgesinin test yatağından alınmış fotoğrafı ise Şekil 113’de görölmektedir.



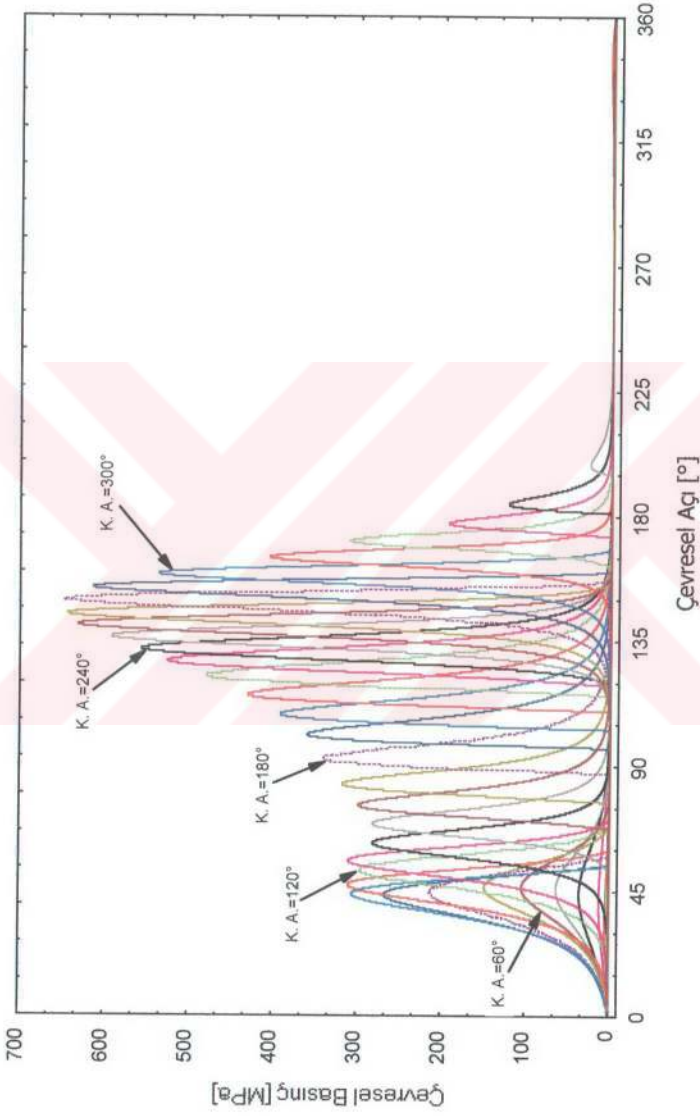
Şekil 112. II nolu dinamik yük altında ve 14 mm genişliğindeki yataкта oluşan mil merkezi yörüngeleri



Şekil 113. II nolu yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatakta oluşan yorulma bölgesi

Deney yatağında yorulma bölgesi yatağın çevresel açısı göz önüne alındığında 125° ile 165° arasında ortaya çıkmaktadır. Burada kılcal çatlaklar yatak orta kısmında başlayıp eksenel ve çevresel yönde ilerleyerek yatak kenarına ulaşmaktadır. Yorulmanın ortaya çıktığı bölge yükün polar diyagramı göz önüne alındığında maksimum yük değerlerinin etki ettiği yatak bölgesi olduğu görülmektedir. Mil merkezinin yörüngesi göz önüne alındığında yorulma bölgesi yağ filminin minimum olduğu konumdan 20° kadar önceki bir bölgede ortaya çıkmaktadır. Deney yatağında yorulma çatlaklarının oluşumu yaklaşık 8 saatlik çalışma süresi (595.200 yük tekrarı) sonunda meydana gelmektedir.

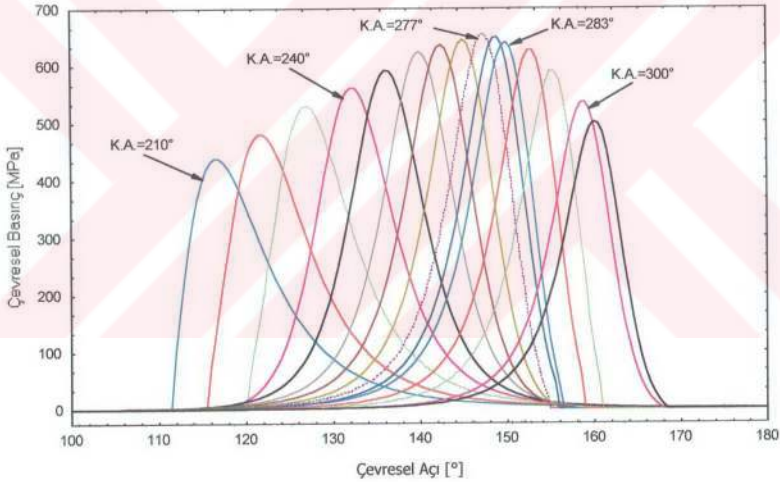
Uygulanan II nolu dinamik yük etkisinde milin her 10° 'lik krank açısında yatakta ortaya çıkan çevresel basınç dağılımları Şekil 114'de verilmektedir. Burada oluşan en büyük basınç dağılımları yatağın çevresel açısı 125° ile 165° arasıma karşılık gelen yorulma bölgesi içerisinde ortaya çıkmaktadır. Yatakta hesaplanan basınç dağılımları içerisinde maksimum basınç değeri 277° 'deki krank açısında 656 MPa olarak ortaya çıkmakta, bu anda yatağa etki eden kuvvet ise 25802 N olmaktadır.



Şekil 114. II nolu dinamik yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları

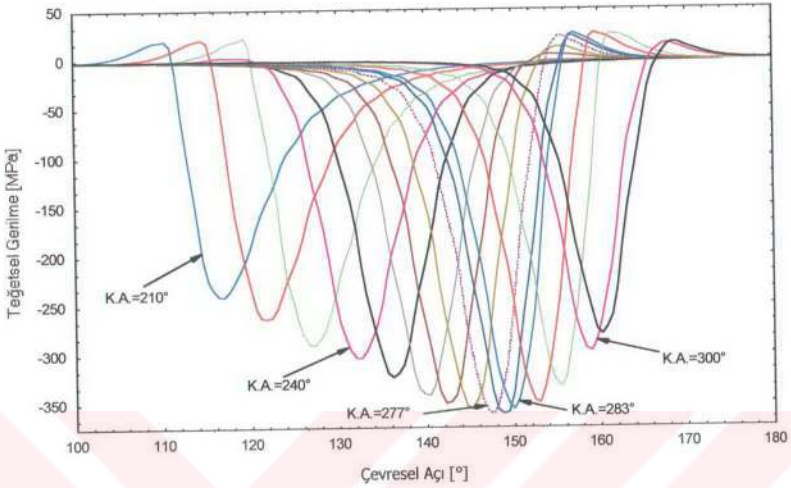
3.2.3.1. Genişliği 14 mm Olan Yatak İçin İki Boyutlu Sayısal özüm Sonuçları

Yatakta II nolu dinamik yük örneği altında ortaya çıkan yorulma bölgesi yatağın çevresel açıyı göz önüne alındığında 125° ile 165° arasında ortaya çıkmaktadır. Yüzey yorulmasının ortaya çıktığı bu bölgeye etki eden çevresel basınç dağılımları Şekil 115’de verildiği gibi göz önüne alınabilir. Bu basınç dağılımları altında yatak yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel ve radyal gerilme dağılımları toplu halde sırasıyla Şekil 116 ve Şekil 117’de verilmektedir. Yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları altında yatağa etki eden en büyük teğetsel çeki gerilmesi 283° ’lik krank açısındaki basınç dağılımı etkisinde 26,2 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu krank açısında yağ filminde oluşan basınç dağılımının maksimum değeri 638 MPa’dır.

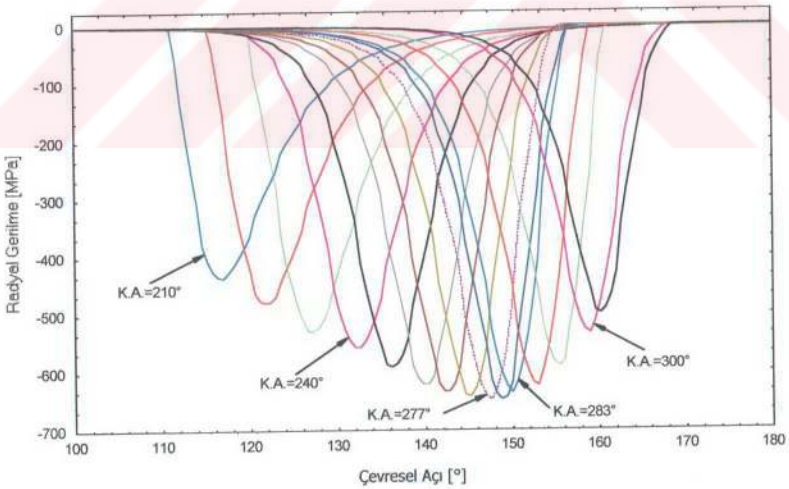


Şekil 115. II nolu yük altında ve 14 mm genişliğindeki yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları

Krank açısının 283° değeriinde yataktaki yağ filminde oluşan basınç dağılımı altında zarf kalınlığı boyunca hesaplanan eş teğetsel gerilme eğrileri dağılımı Ek Şekil 22’de ve radyal gerilme eğrileri dağılımı ise Ek Şekil 23’de verilmektedir. Yağ filmi basınç alanı altında basıncın tepe noktasına karşılık gelen yatak yüzeyinden 0,86 mm zarf derinliğine doğru bası karakterli teğetsel gerilmeler 356 MPa ($0,558 P_{max}$) değerinden



Şekil 116. Şekil 115'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan teğetsel gerilmeler



Şekil 117. Şekil 115'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan radyal gerilmeler

32,6 MPa ($0,051 P_{\max}$) değerine kadar azalırken radyal gerilmeler ise 635,7 MPa ($\approx 1 P_{\max}$) değerinden 600 MPa ($0,94 P_{\max}$) değerine kadar azalmaktadır. Yağ filmindeki basınç alanı dışında kalan zarf yüzeyinden 0,8 mm ($h/s=0,32$) derinliğe kadar olan bölge içerisinde 26,2 MPa'dan ($0,041 P_{\max}$), 17,1 MPa ($0,027 P_{\max}$) değerine kadar değişen çeki karakterli teğetsel gerilmeler söz konusu olurken bu bölgede 27,7 MPa ($0,043 P_{\max}$) değerinden daha az değerde bası karakterli radyal gerilmeler ortaya çıkmaktadır.

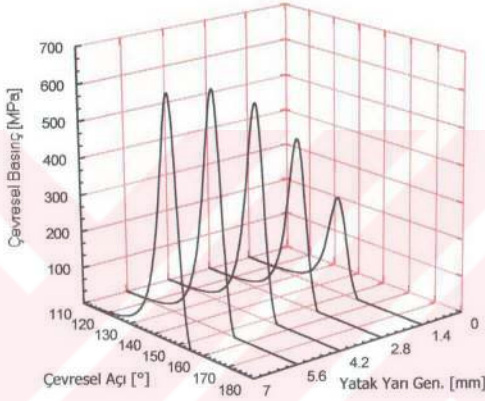
Göz önüne alınan basınç dağılımı altında zarf kalınlığı boyunca ortaya çıkan eş kayma gerilmesi değerleri dağılımı Ek Şekil 24'de verilmektedir. Yağ filminin her iki basınç gradyanı altında, sağ tarafta pozitif değerlikli kayma gerilmesi 81,2 MPa ($0,127 P_{\max}$) maksimum değerinde, sol tarafta ise negatif değerlikli kayma gerilmesi 55,4 MPa ($0,087 P_{\max}$) maksimum değerlikli gerilmeler olarak ortaya çıkmaktadır. Kayma gerilmelerinin maksimum değerleri zarf yüzeyinden yaklaşık 0,76 mm ($h/s=0,304$) derinlikte meydana gelmektedirler.

Yağ filmindeki bu basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan gerilmelerden von Mises hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilme dağılımları Ek Şekil 25'de görülmektedir. Yatak yüzeyindeki eşdeğer gerilmeler göz önüne alındığında en büyük eşdeğer gerilme değeri 269 MPa ($0,422 P_{\max}$) olarak yağ filmi tepe basıncına karşılık gelen noktada ortaya çıkmaktadır. Bu noktanın 0,32 mm altında teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde 388 MPa ($0,608 P_{\max}$) eşdeğer gerilme söz konusu olurken aynı noktanın 1,41 mm ($h/s=0,564$) kadar altında çelik destek tabakası içinde 537 MPa ($0,842 P_{\max}$) olarak zarftaki maksimum eşdeğer gerilme ortaya çıkmaktadır.

Hesaplarda göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Ek Şekil 26-b'de ve bunların eş radyal deformasyon dağılımları ise Ek Şekil 26-c'de verilmektedir. Yatak zarfındaki radyal deformasyon basınç alanı ile uyumlu olarak maksimum çökme değeri 7,96 μm ile tepe basıncına karşılık gelen yatak yüzeyinde ortaya çıkmakta, çevresel olarak gittikçe azalan çökme miktarı basınç alanı dışında zarf yüzeyinde 0,09 μm kadar yükseklik meydana getirmektedir.

3.2.3.2. Genişliği 14 mm Olan Yatak İçin Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Yatak zarfının üç boyutlu çözümünde II nolu dinamik yükün 283° krank açısındaki yağ filminde oluşan çevresel ve enine değişim gösteren basınç dağılımı göz önüne alınmıştır. Bu basınç dağılımının yatak yarı genişliğindeki üç boyutlu değişimi Şekil 118’de verilmektedir. Yatakta enine yöndeki basınç dağılımının parabolik olmasından dolayı hesaplamalar yatak yarı genişliğinde yapılmıştır.



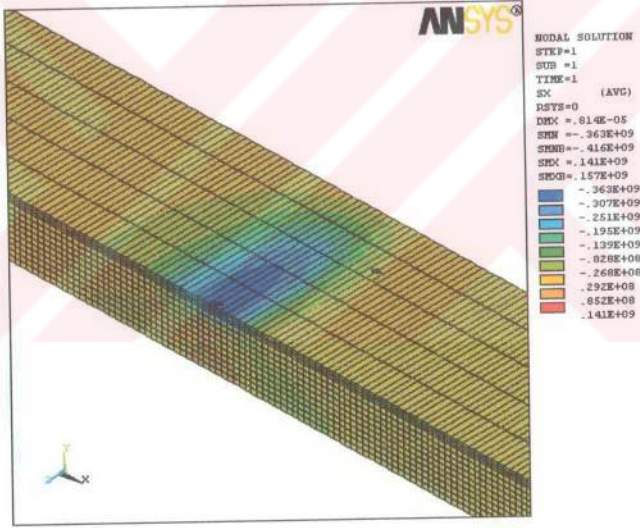
Şekil 118. II nolu yük altında 14 mm genişliğindeki yatakta 283° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{max} = 638$ MPa)

3.2.3.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları

Yatakta göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin zarf yüzeyindeki çevresel ve enine doğrultudaki değişimleri Ek Şekil 27’de görülmektedir. Yağ filmi basınç alanı altında bası karakterli teğetsel gerilmeler yatak ortasında 362,8 MPa’lık ($0,569 P_{max}$) değerle başlayıp yatak genişliği yönünde gittikçe azalarak 8,7 MPa ($0,014 P_{max}$) değerine düşmektedir. Yağ filmindeki basınç alanının dışındaki kısımda teğetsel çeki gerilmeleri yatak ortasında maksimum 21,6 MPa ($0,034 P_{max}$) değerinde başlayıp yatak kenarına doğru azalarak 11,2 MPa ($0,018 P_{max}$) değerine düşmektedir.

Yatak zarfı yüzeyinden 0,32 mm derinlikte teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımı Ek Şekil 28'de verilmektedir. Burada da yağ filmi basınç alanı altında bası karakterli teğetsel gerilmeler yatak ortasında maksimum değeri 246,5 MPa ($0,386 P_{max}$) olarak başlayıp, yatak kenarına doğru gittikçe azalarak 8,6 MPa ($0,013 P_{max}$) değerine düşmektedir. Çeki karakterli teğetsel gerilmelerinde yatak ortasındaki maksimum değeri 30,9 MPa ($0,048 P_{max}$) olup yatak kenarında 50,1 MPa ($0,078 P_{max}$) değerini almaktadır. Zarf yüzeyinden zarf kalınlığı yönünde birleşim yüzeyine doğru, teğetsel çeki gerilmelerinde artış gözlenirken bası karakterli teğetsel gerilmelerinde ise azalma ortaya çıkmaktadır.

Yatak zarfında hesaplanan teğetsel gerilmelerin üç boyutlu bölgesel dağılımı Şekil 119'da verilmektedir.



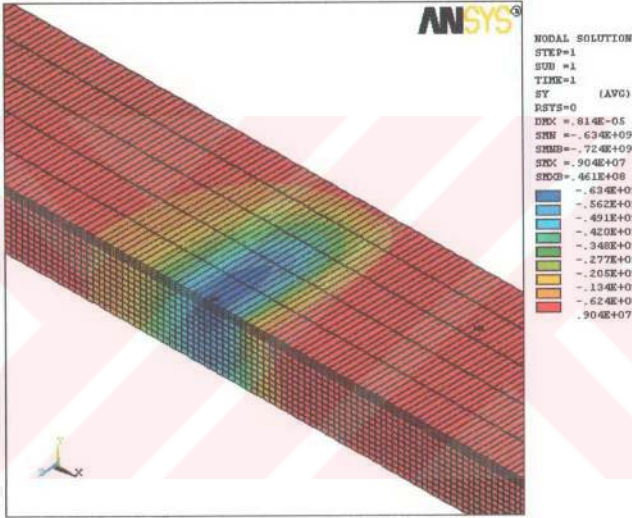
Şekil 119. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilmeler

3.2.3.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları

Göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan radyal gerilme dağılımları

Ek Şekil 29 ve Ek Şekil 30'da görülmektedir. Burada zarf yüzeyinde basınç dağılımına uygun maksimum değeri 633,9 MPa ($\approx 1 P_{\max}$) olan radyal gerilmeler ortaya çıkarken, zarf kalınlığı boyunca azalarak birleşim yüzeyinde 621 MPa ($0,973 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Hem yatak yüzeyinde hem de birleşim yüzeyinde bası karakterli radyal gerilmeler yatak kenarına doğru enine yönde gittikçe azalmaktadır.

Radyal gerilmelerin yatak zarfındaki bölgesel gerilme dağılımı Şekil 120'de verilmektedir.



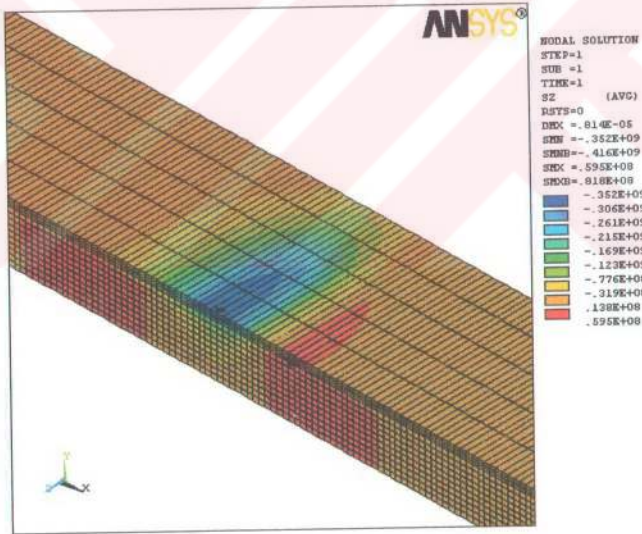
Şekil 120. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları

3.2.3.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları

Yatakta yağ filminde oluşan aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyinde ortaya çıkan eksenel gerilmelerin değişimleri Ek Şekil 31 ve Ek Şekil 32'de görülmektedir. Burada yatak yüzeyinde bası karakterli en büyük eksenel gerilme değeri, yağ film basıncı tepe noktası altında yatak ortasında 352 MPa ($0,552 P_{\max}$) olup, zarf derinliğine doğru gittikçe azalarak

birleşim yüzeyinde 240,6 MPa ($0,377 P_{max}$) değerine düşmektedir. Çeki karakterli eksenel gerilmeler ise basınç alanı dışında yatak ortasında maksimum 20,2 MPa ($0,032 P_{max}$) değerinde başlayıp yatak yüzeyinden birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak 42,9 MPa ($0,067 P_{max}$) değerine kadar yükselmektedir. Yatak zarf yüzeyinden ve birleşim yüzeyinden yatak kenarına doğru enine yönde gidildikçe hem eksenel bası gerilmeleri hem de eksenel çeki gerilmeleri azalmaktadır. Yatak kenarında eksenel bası gerilmesi yatak yüzeyinde 62,9 MPa ($0,099 P_{max}$) değerine, birleşim yüzeyinde ise 33,6 MPa ($0,053 P_{max}$) değerine düşmektedir. Aynı yatak kenarında eksenel çeki gerilmesi yatak yüzeyinde 2,7 MPa ($0,004 P_{max}$) değerine, birleşim yüzeyinde ise 5,5 MPa ($0,0086 P_{max}$) değerine kadar azalmaktadır.

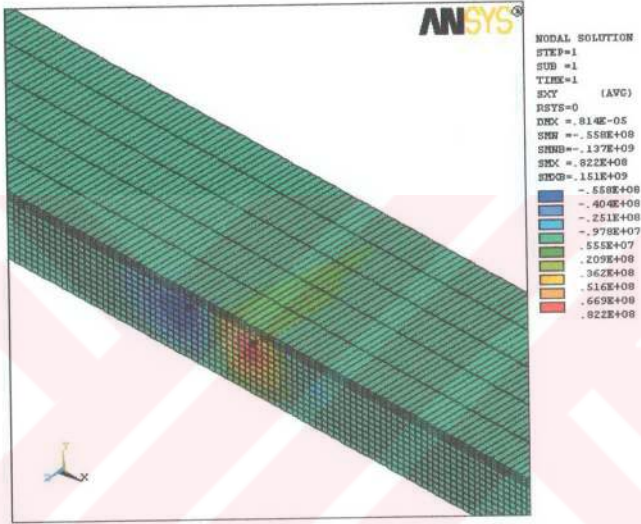
Aynı basınç dağılımı altında yatak zarfında hesaplanan eksenel gerilme değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 121'de görülmektedir.



Şekil 121. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları

3.2.3.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatak zarfının aynı basınç dağılımı altında üç boyutlu sayısal çözümü sonucunda zarfta ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 122'de görülmektedir.



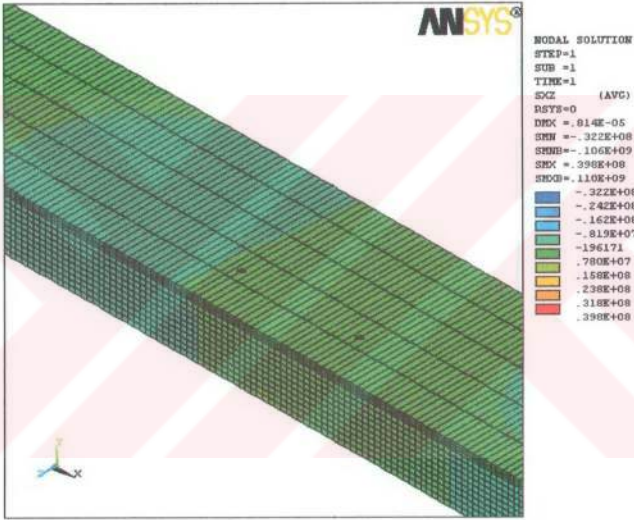
Şekil 122. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları

Yatak zarfında göz önüne alınan basınç dağılımı altında yapılan üç boyutlu çözüm sonucunda yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri dağılımı sırasıyla Ek Şekil 33 ve Ek Şekil 34'de verilmektedir. Burada yatak ortasında büyük basınç gradyanına sahip basınç ayağı altında yatak yüzeyinde maksimum değeri 12,9 MPa (0,02 P_{max}) olan pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi olurken birleşim yüzeyine doğru gidildikçe bu değer 63,9 MPa (0,1 P_{max}) değerine kadar artmaktadır. Diğer basınç ayağının altında oluşan negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi yine yatak ortasında en büyük değerlerini almaktadır. Negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi yatak yüzeyinde 8,2 MPa (0,013 P_{max}) değerinden başlayıp birleşim yüzeyine doğru gittikçe 41,5 MPa

(0,065 P_{max}) değerine kadar yükselmektedir. Hem pozitif hem de negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilme değerleri, yatak ortasından yatak kenarına doğru eksenel doğrultuda gidildikçe azalma göstermektedirler.

3.2.3.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Aynı yağ film basınç dağılımı altında yatak zarfında hesaplanan τ_{xz} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 123'de verilmektedir.



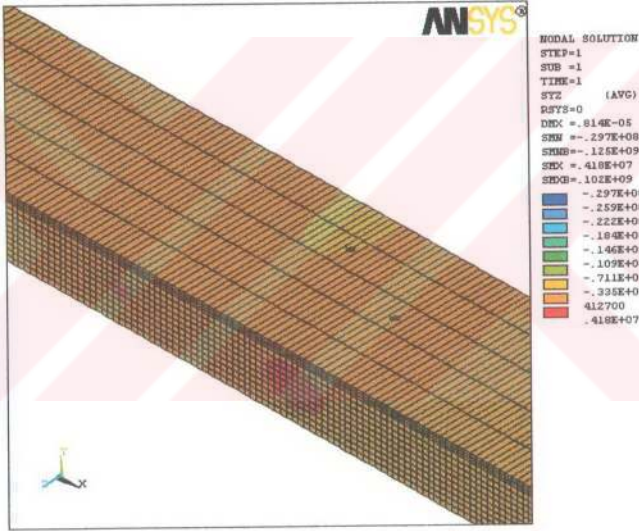
Şekil 123. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları

Yatakta dikkate alınan aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları Ek Şekil 35 ve Ek Şekil 36'da verilmektedir. Burada yatak yüzeyinde en büyük pozitif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmesi 2,7 MPa (0,004 P_{max}) değerinden başlayıp birleşim yüzeyine doğru gidildikçe artarak 11,5 MPa (0,018 P_{max}) değerine ulaşmaktadır. Negatif değerlikli en büyük τ_{xz} kayma gerilmesi de yüzeyde 2,6 MPa (0,004 P_{max}) değerinden

başlayıp birleşim yüzeyinde 9,9 MPa (0,016 P_{max}) değerine kadar artmaktadır. En büyük pozitif ve negatif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmeleri yatak kenarı doğru ortaya çıkmaktadırlar. Enine doğrultuda yatak ortasına doğru gidildikçe pozitif ve negatif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmeleri azalma göstermektedirler.

3.2.3.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

τ_{yz} kayma gerilmelerinin aynı yağ film basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan bölgesel gerilme dağılımları Şekil 124'de verilmektedir.



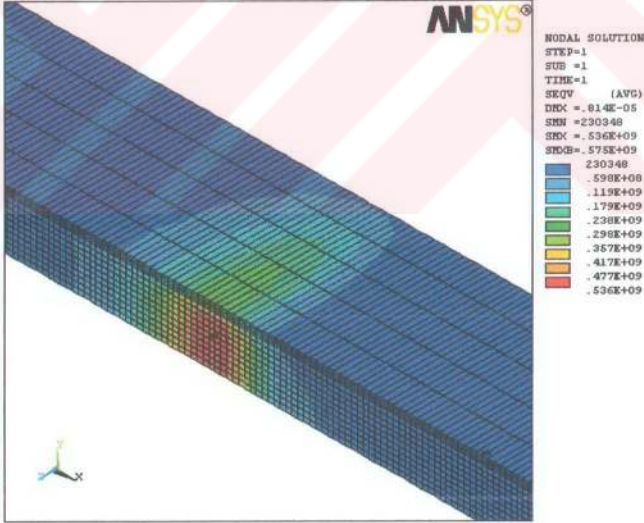
Şekil 124. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları

Yatakta göz önüne alınan yağ film basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm altında ortaya çıkan τ_{yz} kayma gerilmelerinin değişimi sırasıyla Ek Şekil 37 ve Ek Şekil 38'de görülmektedir. Negatif değerlikli τ_{yz} kayma gerilmesi yatak yüzeyinde en büyük değerini 4,9 MPa'la (0,008 P_{max}) yatak kenarına doğru alıp, birleşim yüzeyine doğru gittikçe 25,7 MPa (0,04 P_{max}) değerine kadar artmaktadır. Benzer şekilde

yatak kenarına doğru en büyük değerlerini alan pozitif değerlikli τ_{yz} kayma gerilmesi, yatak yüzeyinde 0,23 MPa (0,0004 P_{max}) değerinden başlayıp birleşim yüzeyinde 1,5 MPa (0,002 P_{max}) değerinde kadar yükselmektedir. Negatif ve pozitif değerlikli τ_{yz} kayma gerilmeleri, enine doğrultuda yatak ortasına doğru gittikçe sayısal değerlerinde azalma olmaktadır.

3.2.3.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları

Yatakta yağ filminde oluşan aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfının üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme dağılımlarının von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanmış eşdeğer gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 125'de görülmektedir. Burada hesaplanan maksimum eşdeğer gerilme, yağ film basıncının maksimum değere eriştiği tepe noktası altında, yatak ortasında, yatak yüzeyinin yaklaşık 1,41 mm ($h/s=0,564$) altında 536,1 MPa (0,84 P_{max}) değerinde ortaya çıkmaktadır.

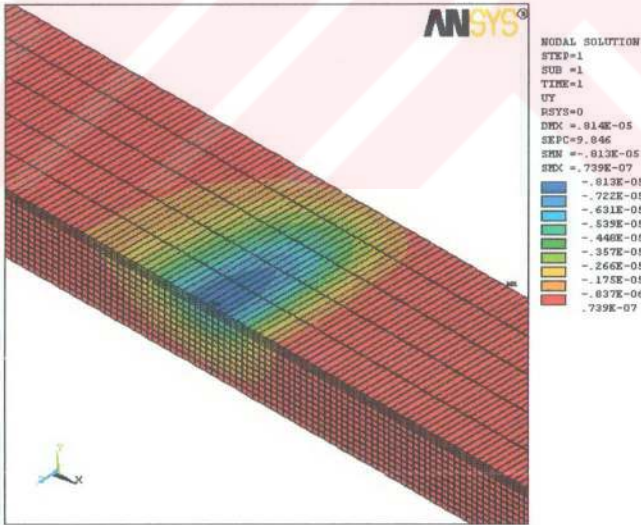


Şekil 125. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları

Von Mises gerilme hipotezine göre yatak yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm altındaki birleşim yüzeyinde hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri Ek Şekil 39 ve Ek Şekil 40'da verilmektedir. Bu yüzeylerde hesaplanan eşdeğer gerilme değerlerinin maksimum değerleri, yatak ortasında ve yağ filminin tepe basıncı altına karşılık gelen noktada elde edilmektedir. Burada yatak zarfı yüzeyinde 276,7 MPa ($0,434 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilme, yatak birleşim yüzeyine doğru gidildikçe artarak 377,5 MPa ($0,592 P_{\max}$) değerine yükselmektedir.

3.2.3.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları

Yatak zarfında hesaplanan radyal deformasyonların bölgesel dağılımları Şekil 126'da verilmektedir. Yatak zarfının göz önüne alınan üç boyutlu basınç dağılımı altında sonlu elemanlar analizinde yatak yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Ek Şekil 41'de görülmektedir. Burada çökme eğrileri maksimum değerini, basınç alanı içinde basıncın tepe noktası altında yatak ortasında 8,13 μm değerinde almakta olup, yatak

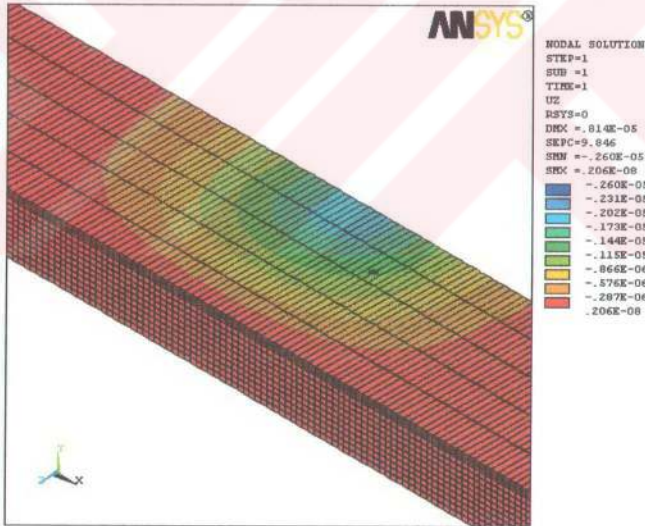


Şekil 126. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları

kenarına doğru enine yönde gittikçe 0,96 μm değerine kadar azalmaktadır. Basınç alanı dışında ise çevresel olarak gittikçe azalan çökme değerleri yatak zarfı yüzeyinde sona ermekte ve bu noktadan sonra 0,074 μm kadar yükselme göstermektedir.

3.2.3.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları

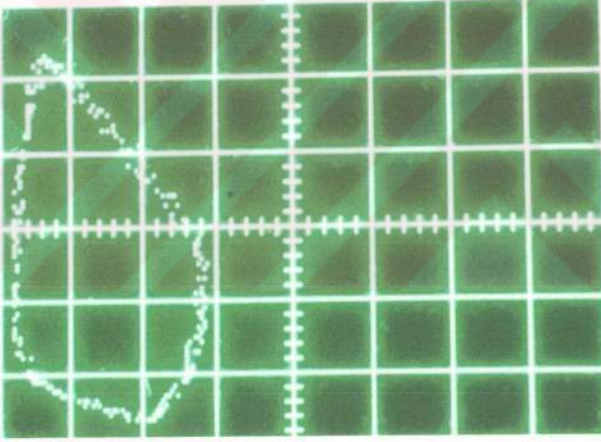
Aynı basınç dağılımı altında hesaplanan eksenel deformasyonların yatak zarfı yüzeyindeki değişimleri Ek Şekil 42'de görülmektedir. Burada en büyük deformasyonlar basınç alanı içinde yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru 1,9 μm olarak hesaplanmıştır. Eksenel deformasyonların yatak zarfındaki bölgesel dağılımları da Şekil 127'de görülmektedir. Yatak zarfında ortaya çıkan en büyük eksenel deformasyon değeri yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru 2,6 μm olarak yatak zarfının alt yüzeyinde oluşmaktadır.



Şekil 127. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları

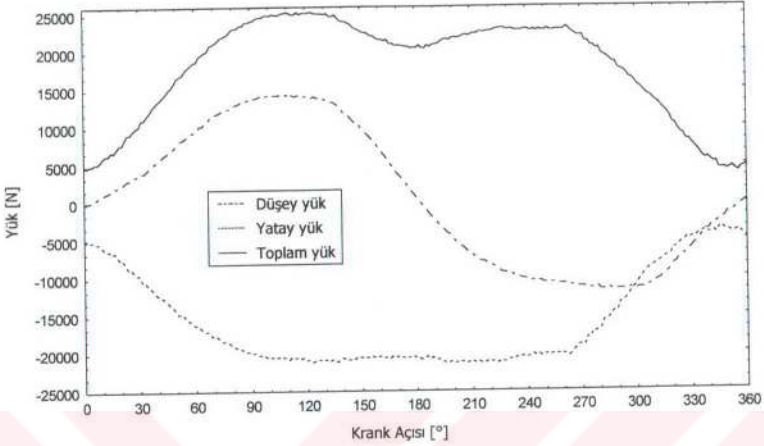
3.3. III Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular

Yüzey yorulması deneylerinde seçilen III nolu dinamik yük örneğinin osiloskoptan alınmış görüntüsünün polar diyagramı Şekil 128'de verilmektedir. Dinamik yükün polar diyagramı incelendiğinde, eksen takımının iki ve üçüncü bölgelerinde yükün değişim gösterecek şekilde belirlendiği görülmektedir. Seçilen yük örneğinin gerek polar diyagramı gerekse Şekil 129'daki grafikte görülen eksenler üzerindeki bileşenleri incelendiğinde düşey eksenin sinüs formulu, yatay eksenin ise genel değişken yük şeklinde etki ettiği ortaya çıkmaktadır. Burada yatağa etki eden maksimum yük değerleri 100° ile 135° 'lik krank açıları arasında olmakta ve en büyük değerini 116° 'deki krank açısında 25301 N olarak almaktadır. Bu dinamik yük örneğindeki deneyler 10 mm genişliğindeki yatakta yapılmıştır.



Şekil 128. III nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı

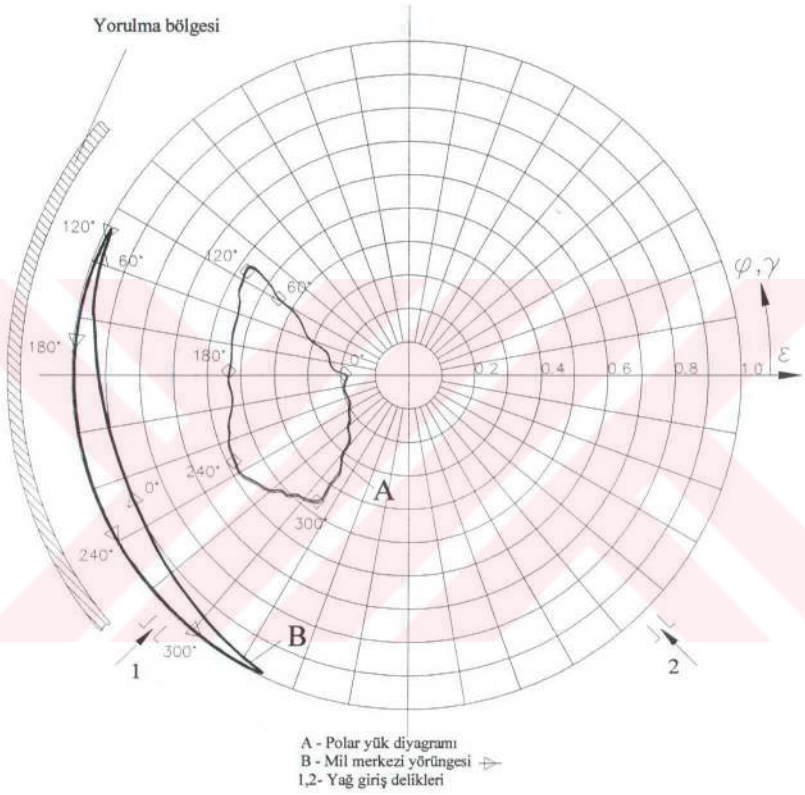
III nolu dinamik yük örneğinde polar yük diyagramı, mil merkezinin yörüngesi ve yorulmanın bölgesel dağılımı Şekil 130'daki gibi ortaya çıkmaktadır. Yorulma bölgesinin deney yatağından alınmış fotoğrafı Şekil 131'de görülmektedir. Burada yatak yüzeyinde ağırlıklı olarak aksenal yönde kılcal çatlaklar oluştuğu, aynı zamanda çevresel yönde de kılcal çatlakların yönlendiği görülmektedir.



Şekil 129. III nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi

Yatakta ortaya çıkan yorulma bölgesi yatağın çevresel açısı göz önüne alındığında 140° ile 220° arasında oluşmaktadır. Yataktaki yorulma bölgesi, seçilen dinamik yükün bütün kuvvetlerinin etki ettiği bir bölge olduğu gibi, mil merkezi yörüngesi göz önüne alındığında da minimum yağ filminin olduğu konumdan daha önceki bölge olarak da ortaya çıkmaktadır. Deney yatağında oluşan yorulma çatlakları yaklaşık 17 saatlik çalışma süresi (1.264.800 yük tekrarı) sonucunda meydana gelmektedir.

Yatağa etki eden dinamik yük altında milin her 10° 'lik krank açısında yatakta ortaya çıkan basınç dağılımları Şekil 132'de verilmektedir. Yatağın yorulma bölgesi göz önüne alındığında yatakta ortaya çıkan maksimum basınç dağılımları bu bölgeye etki etmektedir. Yatakta ortaya çıkan basınç dağılımları içerisinde maksimum basınç değeri 252° 'deki krank açısında 1154 MPa olarak ortaya çıkmakta, bu anda yatağa etki eden kuvvet ise 23051 N olmaktadır.



Şekil 130. III nolu dinamik yük altında yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi

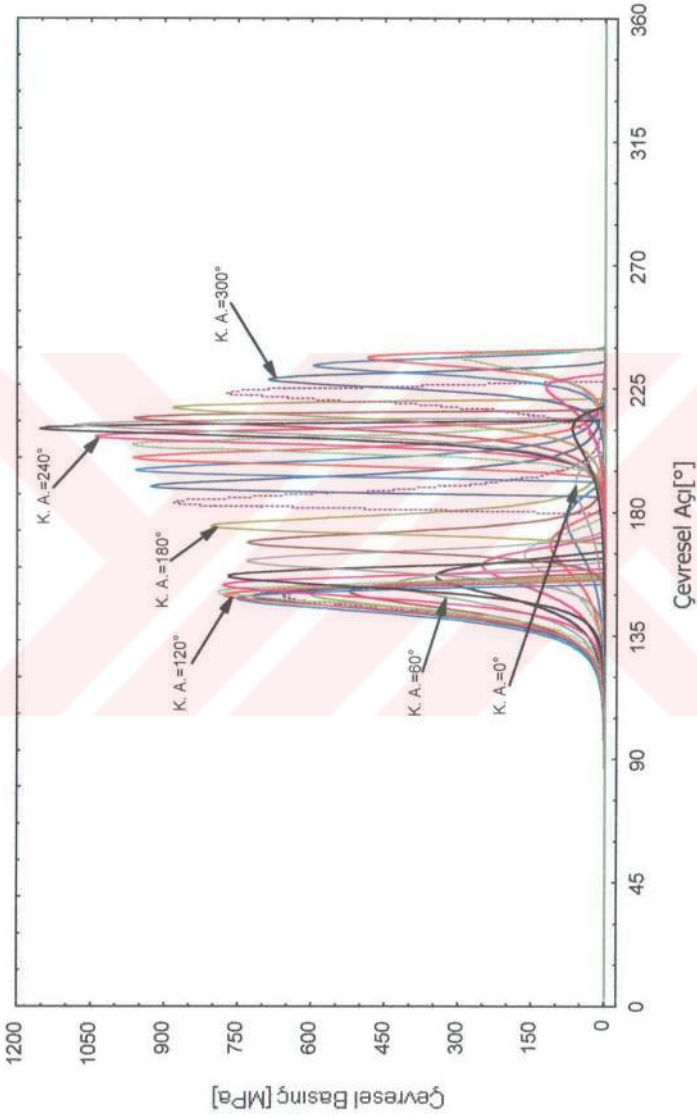


Şekil 131. III nolu yük altında yatakta oluşan yorulma bölgeleri

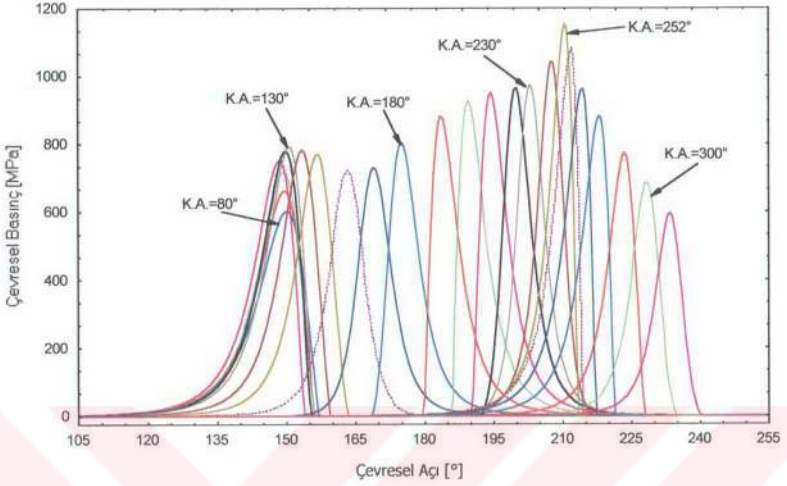
3.3.1. İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Seçilen III nolu dinamik yük örneği altında yatakta oluşan tüm basınç dağılımları her ne kadar yorulma bölgesi içerisinde ise de, bu bölgeye etki eden basınç dağılımları Şekil 133'deki gibi göz önüne alınabilir. Yatağın çevresel açıları 140° ile 220° arasında etkili olan bu basınç dağılımları etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 134'de ve radyal gerilme dağılımları da Şekil 135'de verilmektedir. Yapılan sonlu eleman çözümleri sonucunda, yatağın yorulma bölgesi içerisinde ortaya çıkan maksimum teğetsel çeki gerilmesi değeri $48,7 \text{ MPa}$ olarak 252° 'lik krank açısındaki basınç dağılımı etkisinde oluşmaktadır.

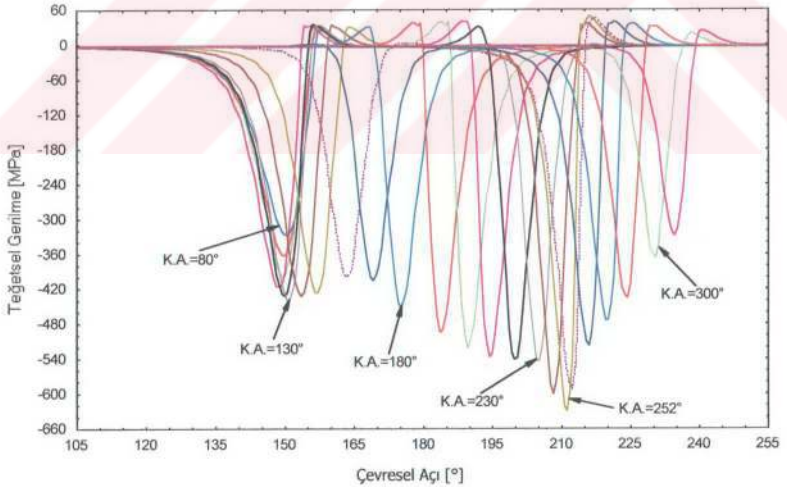
Yatak zarfında zarf kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımları, yatakta en büyük basınç değerini veren 252° krank açısındaki basınç dağılımı göz önüne alınarak incelenmiştir. Ek Şekil 43-a'da görülen bu basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan eş teğetsel gerilme eğrileri de Ek Şekil 43-b'de verilmektedir. Burada teflon-bronz tabakasında basınç alanı altında basıncın tepe değerine karşılık gelen yatak yüzeyinde maksimum bası karakterli teğetsel gerilme $644,8 \text{ MPa}$ ($0,559 P_{\max}$) değerinde olup, yüzeyden $0,32 \text{ mm}$ derinlikte birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak $409,3 \text{ MPa}$ ($0,355 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Yatağa etki eden yağ filmi basınç alanı dışında ise



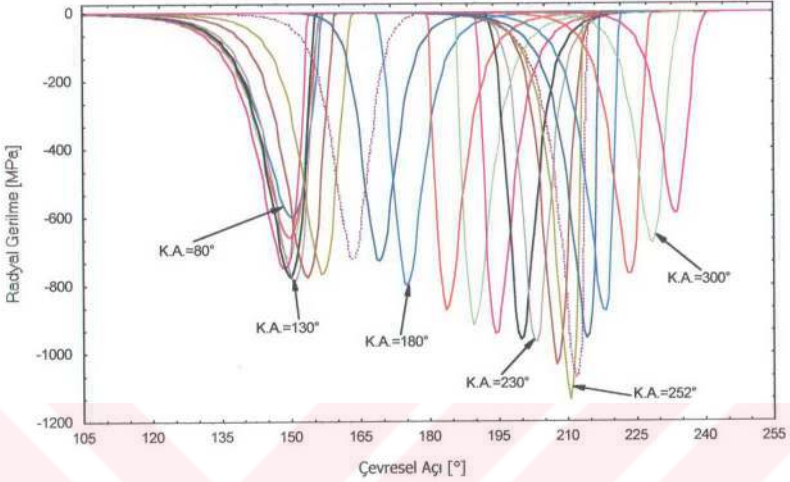
Şekil 132. III nolu dinamik yük altında yatakta 10°'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları



Şekil 133. III nolu yük altında yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları



Şekil 134. Şekil 133'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan teğetsel gerilmeler



Şekil 135. Şekil 133'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgelerinde hesaplanan radyal gerilmeler

yatak zarfı yüzeyinde maksimum 48,7 MPa ($0,042 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkan çeki karakterli teğetsel gerilme, yüzeyden 0,32 mm derinlikteki birleşim yüzeyine doğru inildikçe artarak 83,8 MPa ($0,073 P_{\max}$) değerine yükselmektedir.

Göz önüne alınan aynı basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı kalınlığı boyunca oluşan eş radyal gerilme değerleri dağılımı Ek Şekil 44'de görülmektedir. Burada oluşan en büyük bası karakterli radyal gerilme 1136,7 MPa ($\sim 1 P_{\max}$) değerinde basınç dağılımının maksimum tepe noktasına karşılık gelen yatak yüzeyinde oluşup, yüzeyin 0,32 mm altındaki birleşim yüzeyine doğru gidildikçe azalarak 1091,4 MPa ($0,946 P_{\max}$) değerine düşmektedir.

Yatakta göz önüne alınan yağ filmindeki aynı basınç dağılımı altında yatak zarfında oluşan eş kayma gerilmesi değerleri dağılımı da Ek Şekil 45'de verilmektedir. Kayma gerilmelerinin maksimum değerleri basınç gradyanları altında oluşmaktadır. Pozitif değerlikli kayma gerilmesi yağ film basıncının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında zarf yüzeyinden yaklaşık 0,54 mm ($h/s = 0,216$) derinlikte 214,9 MPa ($0,186 P_{\max}$) maksimum değerinde oluşmaktadır. Diğer basınç ayağı altında oluşan negatif değerlikli

kayma gerilmesi ise yüzeyin yaklaşık 0,76 mm ($h/s = 0,304$) derinliğinde 114,2 MPa ($0,099 P_{max}$) maksimum değerinde ortaya çıkmaktadır.

Yatakta oluşan yağ filmi basınç dağılımı altında ortaya çıkan gerilmelerden hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme dağılımları Ek Şekil 46'da görülmektedir. Burada yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan en büyük eşdeğer gerilme, yağ film basıncının tepe değerine karşılık gelen noktada 445 MPa ($0,386 P_{max}$) olarak hesaplanırken, yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyine doru inildikçe 642 MPa ($0,556 P_{max}$) değerine artmaktadır. Aynı noktanın, yatak yüzeyinin yaklaşık 0,76 mm ($h/s = 0,304$) kadar altında da yatak zarfında hesaplanan maksimum von Mises eşdeğer gerilmesi 880,4 MPa ($0,763 P_{max}$) olarak ortaya çıkmaktadır.

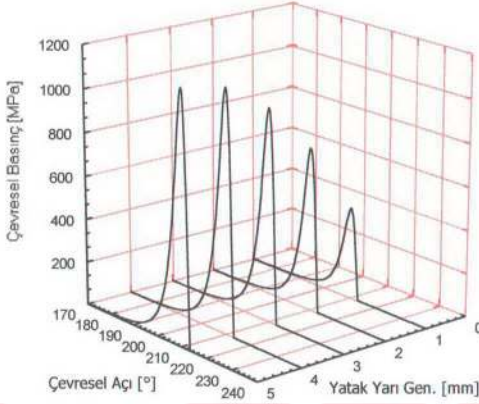
Aynı basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan radyal deformasyonların basınç değişimi ile uyumlu oldukları Ek Şekil 47-b'de görülmektedir. Burada basınç alanı altında, basıncın maksimum olduğu tepe noktasında maksimum çökme değeri 13,2 μm olmaktadır. Yatak yüzeyinde oluşan bu çökme, yağ film basınç alanından sonraki yatak zarfı yüzeyinde hızla azaldıktan sonra zarf yüzeyinde 0,114 μm kadar bir yükselme göstermektedir. Yağ filmi basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında ortaya çıkan eş radyal deformasyon dağılımları da Ek Şekil 47-c'de verilmektedir.

3.3.2. Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Yatak zarfında yapılacak üç boyutlu sonlu eleman çözümlerinde, III nolu dinamik yük örneği altında krank açısının 252°'deki değerinde yağ filminde ortaya çıkan basınç dağılımı dikkate alınacaktır. Krank açısının 252°'sinde oluşan bu basınç dağılımının yatak yarı genişliğindeki üç boyutlu değişimi Şekil 136'da verilmektedir. Diğer üç boyutlu çözümlerde olduğu gibi burada da basınç dağılımının enine yönde parabolik olmasından dolayı hesaplamalar yatak yarı genişliğinde yapılacaktır.

3.3.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları

Yağ filminde oluşan bu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm altında teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin değişimleri sırasıyla Ek Şekil 48 ve Ek Şekil 49'da verilmektedir. Burada yağ filmi basınç alanı dışında oluşan çeki karakterli teğetsel



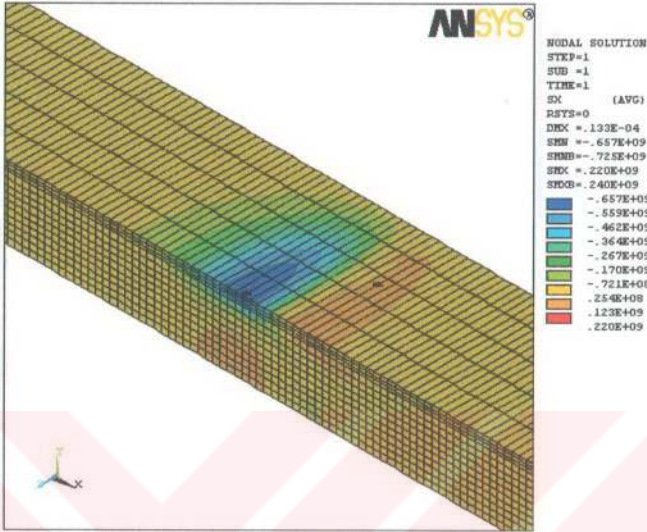
Şekil 136. III nolu yük altında 252° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max}=1154$ MPa)

gerilmeler yatak ortasında yatak zarfı yüzeyinde maksimum 39,7 MPa ($0,034 P_{\max}$) değerinde olurken, birleşim yüzeyine doğru gidildikçe 60,3 MPa ($0,052 P_{\max}$) değerine artmaktadır. Enine yönde ise yatak kenarında zarf yüzeyinde 22,8 MPa ($0,02 P_{\max}$) değerinde olan teğetsel çeki gerilmeleri birleşim yüzeyinde 68,1 MPa ($0,059 P_{\max}$) değerine kadar artmaktadır. Yağ filmi basınç alanı içinde oluşan bası karakterli teğetsel gerilmeler yatak ortasında en büyük değerlerini almaktadırlar. Yatak zarfı yüzeyinde maksimum 656,9 MPa'lık ($0,57 P_{\max}$) değerle başlayan teğetsel bası gerilmeleri birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak 452,5 MPa ($0,392 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Enine yönde ise yatak kenarında zarf yüzeyinde maksimum 22 MPa ($0,019 P_{\max}$) değerinde olan teğetsel bası gerilmeleri, birleşim yüzeyine doğru inildikçe 11,3 MPa ($0,01 P_{\max}$) değerine kadar azalmaktadır.

Yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin zarfındaki üç boyutlu bölgesel dağılımı Şekil 137'de görülmektedir.

3.3.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları

Aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yapılan hesaplamalar sonucunda yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan radyal



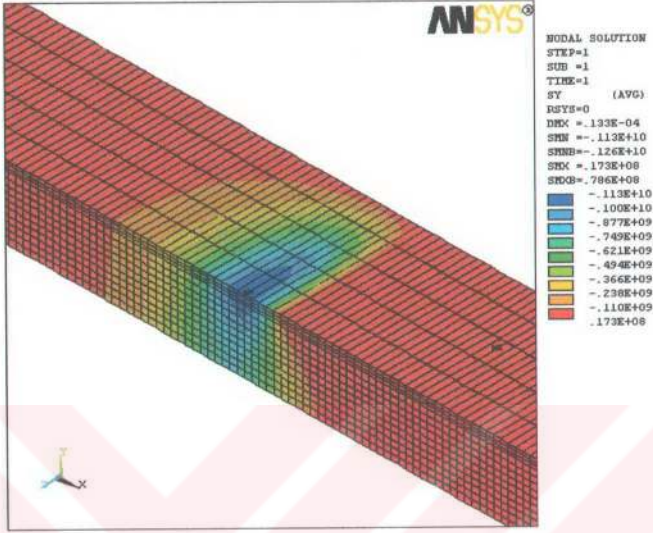
Şekil 137. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilme dağılımları

gerilmeler Ek Şekil 50 ve Ek Şekil 51’de verilmektedir. Basınç dağılımıyla uyumlu olan radyal gerilmeler, basınç alanı içinde en büyük değerlerini almaktadırlar. Yatak ortasında zarf yüzeyinde 1132,4 MPa ($\approx 1 P_{\max}$) maksimum değerli olarak başlayan radyal gerilmeler, birleşim yüzeyinde 1086 MPa ($0,941 P_{\max}$) değerine kadar azalmaktadır. Radyal gerilmeler yatak kenarında, zarf yüzeyinde 24,6 MPa ($0,021 P_{\max}$) değerindeyken, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak 47,8 MPa ($0,041 P_{\max}$) değerine kadar yükselmektedir.

Üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfında hesaplanan radyal gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 138’de görülmektedir.

3.3.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları

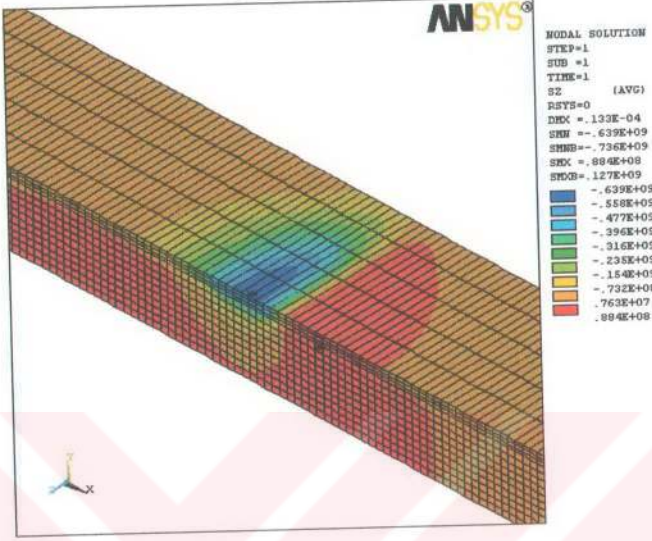
Göz önüne alınan yağ filmindeki basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan eksenel gerilmeler sırasıyla Ek Şekil 52 ve Ek Şekil 53’de verilmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi basınç alanı altında bası karakterli eksenel gerilmeler yatak ortasında en



Şekil 138. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları

büyük değerlerini almaktadırlar. Basınç dağılımının tepe noktası altında zarf yüzeyinde maksimum 638,7 MPa ($0,553 P_{max}$) değerini alan eksenel gerilme, birleşim yüzeyinde 441,3 MPa ($0,382 P_{max}$) değerine kadar azalmaktadır. Enine yönde de azalan eksenel gerilme, yatak kenarında zarf yüzeyinden birleşim yüzeyine doğru 97,6 MPa ($0,085 P_{max}$) değerinden 47,2 MPa ($0,041 P_{max}$) değerine kadar düşmektedir. Burada çeki karakterli en büyük eksenel gerilme, yatak ortasında zarf yüzeyinde 30,1 MPa ($0,026 P_{max}$) değerinden başlayıp, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak 66,1 MPa ($0,057 P_{max}$) değerine kadar yükselmektedir. Eksenel çeki gerilmeleri yatak kenarına doğru gittikçe enine doğrultuda azalırken, yatak kenarında yüzeyden zarf derinliğine doğru gittikçe yükselme göstermektedir. Yatak kenarında zarf yüzeyinde oluşan en büyük eksenel çeki gerilmesi 5,6 MPa ($0,005 P_{max}$) iken, birleşim yüzeyinde 11,1 MPa ($0,01 P_{max}$) değerini almaktadır.

Yağ filmindeki aynı basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfında hesaplanan eksenel gerilme değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 139'da verilmektedir.



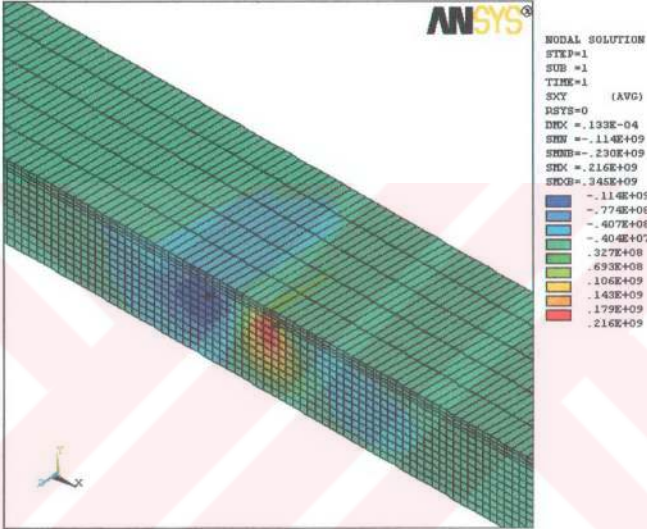
Şekil 139. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları

3.3.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatak zarfına etki eden aynı basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm altındaki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri dağılımı Ek Şekil 54 ve Ek Şekil 55'de görülmektedir. Burada maksimum τ_{xy} kayma gerilmeleri yatak ortasında basınç ayakları altında meydana gelmektedir. Pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi büyük basınç gradyanı altında zarf yüzeyinde maksimum 45,2 MPa (0,039 P_{max}) değerinde başlayıp, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artış göstererek 188,5 MPa (0,163 P_{max}) değerini almaktadır. Diğer basınç ayağının altında oluşan negatif değerlikli en büyük τ_{xy} kayma gerilmesi ise 16,5 MPa (0,014 P_{max}) değerinde başlayıp, birleşim yüzeyinde 84,5 MPa (0,073 P_{max}) değerine kadar artmaktadır. Enine yönde yatak ortasında yatak kenarına doğru gidildikçe hem pozitif değerlikli hem de negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmeleri azalmaktadır. Yatak kenarında zarf yüzeyinde oluşan en büyük pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi 0,7 MPa (0,0006 P_{max}) değerinde olup, birleşim yüzeyinde 13,1 MPa (0,011 P_{max}) değerine artmaktadır. Yatak kenarında oluşan en büyük negatif

değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi 1,5 MPa (0,001 P_{max}) değerinden başlayarak, birleşim yüzeyinde 8,4 MPa (0,007 P_{max}) değerine kadar yükselmektedir.

τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin, göz önüne alınan basınç dağılımı altında yatak zarfında yapılan üç boyutlu sayısal çözüm sonucunda hesaplanan bölgesel dağılımı Şekil 140'da verilmektedir.



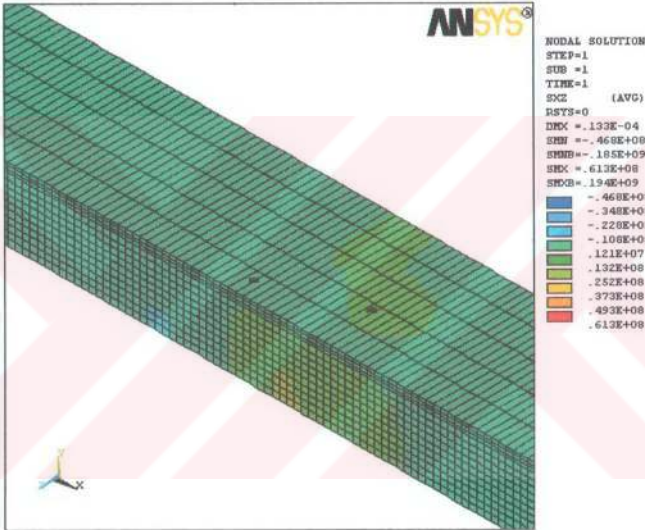
Şekil 140. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları

3.3.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatak zarfında göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımı etkisinde yatak yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları Ek Şekil 56 ve Ek Şekil 57'de görülmektedir. Burada oluşan en büyük negatif ve pozitif değerlikli τ_{xz} kayma gerilme değerleri yatak kenarına doğru ortaya çıkmaktadırlar. Negatif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmesi yatak yüzeyinde maksimum 1,7 MPa (0,0014 P_{max}) değerinde olup, birleşim yüzeyine inildikçe 10,2 MPa (0,009 P_{max})

değerine kadar artmaktadır. Pozitif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmesi ise zarf yüzeyinde 2,6 MPa (0,002 $P_{\max}$) maksimum değerinde başlayarak, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artmakta ve 18,8 MPa (0,016 $P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır. Pozitif ve negatif değerlikli τ_{xz} kayma gerilme değerleri enine yönde yatak ortasına doğru gittikçe azalma göstermektedirler.

Aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfında hesaplanan τ_{xz} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 141’de verilmektedir.



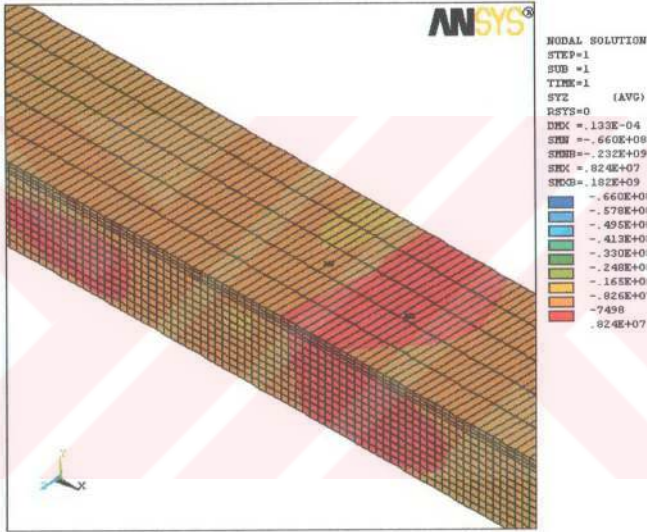
Şekil 141. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları

3.3.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatak zarfının aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yapılan üç boyutlu sonlu elemanlar çözümü sonucunda yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm altında birleşim yüzeyinde hesaplanan τ_{yz} kayma gerilmelerinin değişimi Ek Şekil 58 ve Ek Şekil 59’da görülmektedir. Pozitif değerlikli τ_{yz} kayma gerilmesinin yatak yüzeyindeki maksimum değeri yatak kenarına doğru 0,48 MPa (0,0004 $P_{\max}$) değerinde olup, bu değer birleşim

yüzeyine doğru gittikçe artarak 3,1 MPa (0,003 P_{max}) değerine yükselmektedir. Benzer şekilde negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi de, yatak yüzeyinde yatak kenarına doğru 10,8 MPa (0,009 P_{max}) değerinde maksimum değerini alıp, birleşim yüzeyinde 57,7 MPa (0,05 P_{max}) değerine kadar artmaktadır. Enine yöne yatak ortasına doğru ilerledikçe, pozitif ve negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmelerinin değerleri azalmaktadır.

τ_{yz} kayma gerilmelerinin aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfında bölgesel gerilme dağılımları şeklindeki görüntüsü Şekil 142’de verilmektedir.

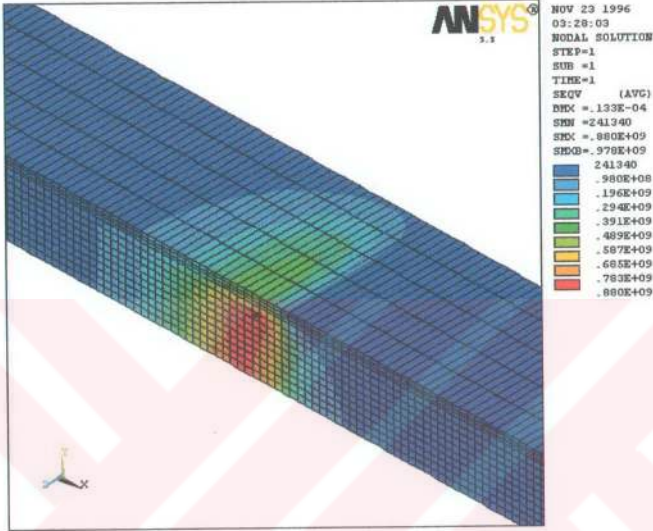


Şekil 142. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları

3.3.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları

Göz önüne alınan yağ filmindeki basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında ortaya çıkan gerilmelerle hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerinin bölgesel dağılımı Şekil 143’de görülmektedir. Burada maksimum eşdeğer gerilme, yağ film basıncının maksimum değere eriştiği tepe noktası altında, yatak ortasında, yatak yüzeyinin yaklaşık

0,76 mm ($h/s= 0,304$) derinliğinde yatak zarfı çelik destek tabakası içerisinde 880,4 MPa ($0,763 P_{max}$) değerinde hesaplanmıştır.



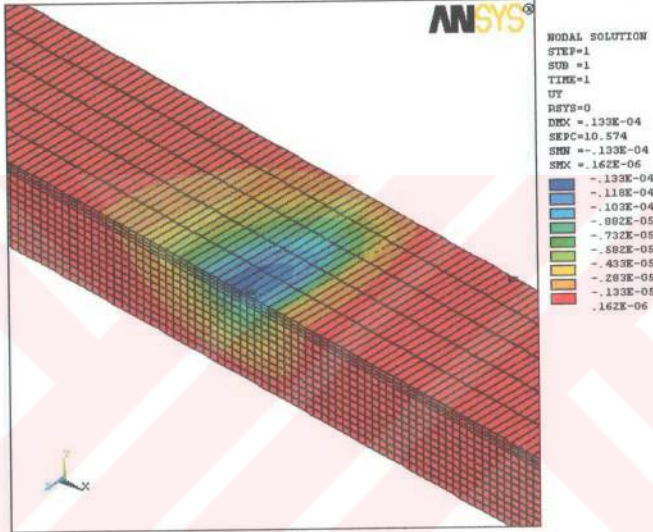
Şekil 143. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları

Yatak zarf yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm altında birleşim yüzeyinde, von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri Ek Şekil 60 ve Ek Şekil 61'de verilmektedir. Burada hesaplanan maksimum eşdeğer gerilme değerleri yatak ortasında yağ filminin tepe basıncı altına karşılık gelen yerde ortaya çıkmaktadırlar. Yatak zarf yüzeyinde bu maksimum değer 484,9 MPa ($0,42 P_{max}$) olarak hesaplanırken, birleşim yüzeyinde 640 MPa ($0,555 P_{max}$) değerine kadar artmaktadır.

3.3.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları

Aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Ek Şekil 62'de görülmektedir. Burada ortaya çıkan maksimum çökme yatak ortasında $13,3 \mu m$ değerinde olup, enine yönde yatak kenarına doğru basınç alanı ile

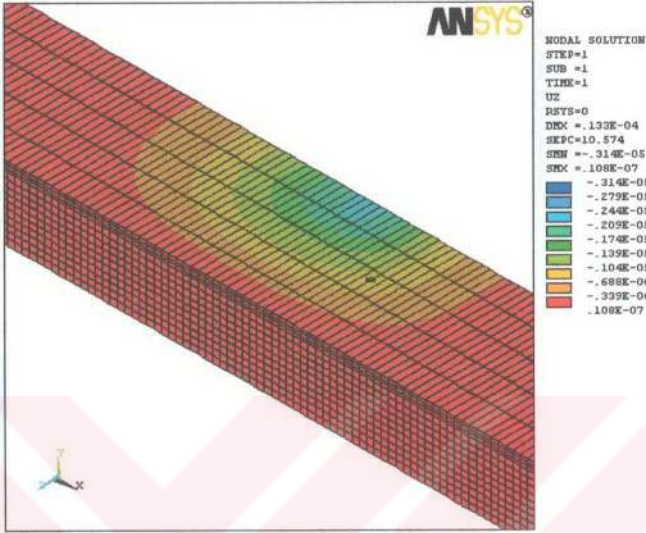
uyumlu olarak gittikçe azalmakta ve $1,95 \mu\text{m}$ değerine kadar düşmektedir. Çevresel olarak, basınç alanı dışında gittikçe azalan çökme miktarları yatak zarfı yüzeyinde sona erip bu noktadan sonra en büyük değeri $0,16 \mu\text{m}$ kadar olan bir yükselme göstermektedir. Radyal deformasyonların yatak zarfında sonlu elemalar yöntemiyle hesaplanan deformasyon bölgeleri şeklinde dağılımları Şekil 144'de verilmektedir.



Şekil 144. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları

3.3.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları

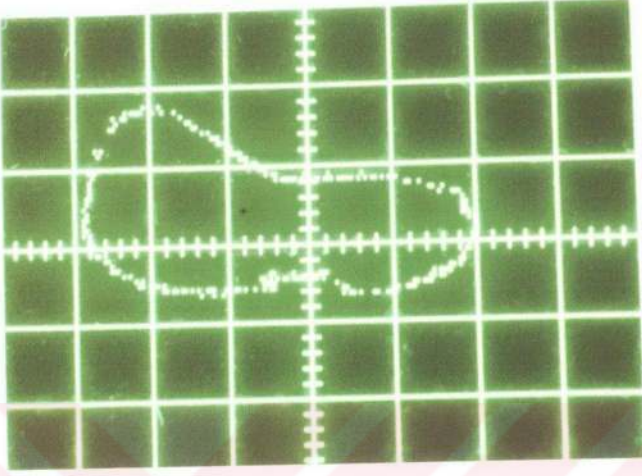
Göz önüne alınan bu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar Ek Şekil 63'de verilmektedir. Burada en büyük deformasyonlar basınç dağılımının maksimum olduğu bölgeye karşılık gelen yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru $2,2 \mu\text{m}$ olarak ortaya çıkmaktadır. Yatak zarfındaki eksenel deformasyonların bölgesel dağılımları da Şekil 145'de görülmektedir. Yatak zarfının tümü dikkate alındığında hesaplanan en büyük eksenel deformasyon yine yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru $3,14 \mu\text{m}$ olarak yatak zarfının alt yüzeyinde ortaya çıkmaktadır.



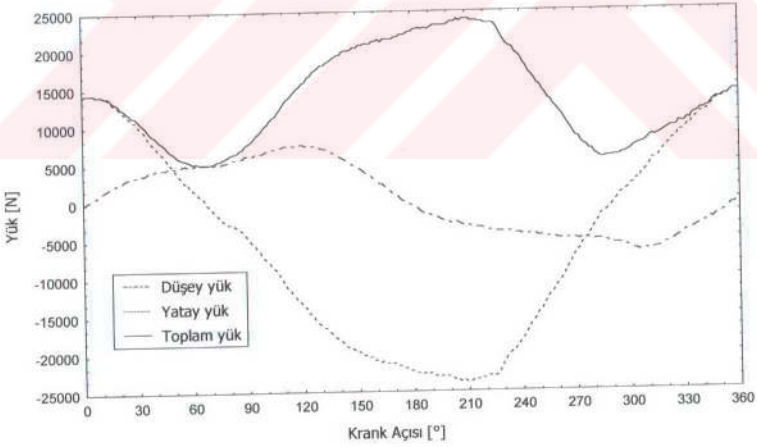
Şekil 145. III nolu yük altında 252°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları

3.4. IV Nolu Dinamik Yükle Elde Edilen Bulgular

Deneylerde seçilen IV nolu dinamik yük örneğinin osiloskoptan alınmış polar yük diyagramı Şekil 146'da verilmektedir. Dinamik yükün düşey ve yatay eksenlerdeki zamana göre değişimini ifade eden her bir krank açısındaki değerleri ile bunların bileşkesi olan toplam yükün bir periyot boyunca değişimi Şekil 147'de görülmektedir. Dinamik yükün her iki eksendeki yük bileşenlerinin sinüs ve cosinüs formulu olduğu ancak bir eksen boyunca daha büyük genlikli dairesel bir polar yük şeklinde etki ettiği görülmektedir. Polar yük diyagramında yatağa etki eden maksimum yük değerleri 177° ile 228° arasındaki krank açılarında olup, en büyük yük değeri 212°'lik krank açısında 23985 N değerindedir. Bu dinamik yük ile yapılan deneyler 10 mm genişliğindeki yataklara uygulandı.

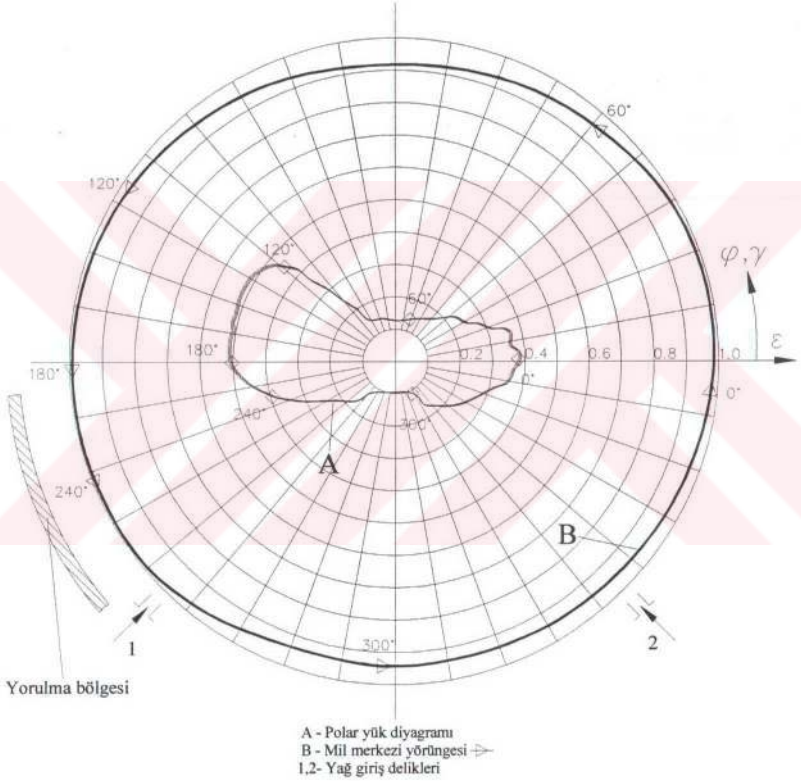


Şekil 146. IV nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı



Şekil 147. IV nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi

Bu polar yük diyagramı altında yataкта ortaya çıkan mil merkezinin yörüngesi ile yorulma bölgesi Şekil 148'de verilmektedir. Deney yatağında yüzey yorulmasının oluştuğu bölgenin fotoğrafı Şekil 149'da görülmektedir.



Şekil 148. IV nolu dinamik yük altında yataкта oluşan mil merkezi yörüngesi



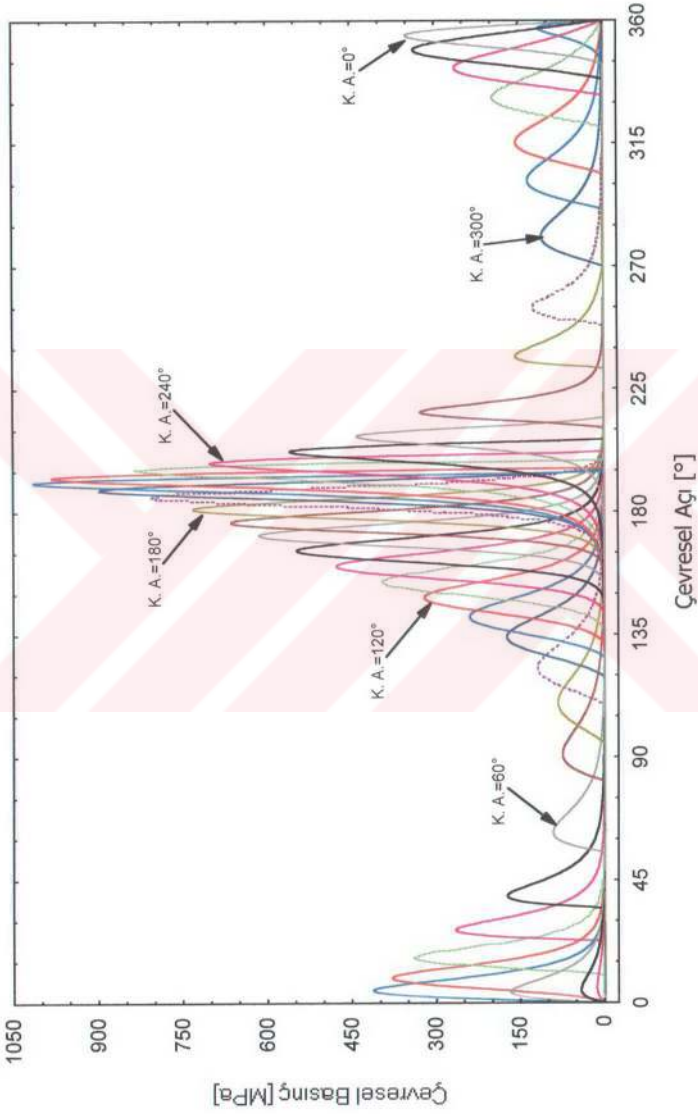
Şekil 149. IV nolu yük altında yatakta oluşan yorulma bölgesi

Yatağın çevresel açısı göz önüne alındığında, deney yatağındaki yorulma bölgesi 185° ile 220° arasında ortaya çıkmaktadır. Burada yorulma çatlağının yatak ortasında başlayıp çevresel yönde ilerleyerek yağ deliğine kadar ulaştığı görülmektedir. Yorulma bölgesi yatağa etki eden maksimum yük değerlerinin maruz kaldığı bölgede meydana gelmektedir. Mil merkezi yörüngesi göz önüne alındığında ise minimum yağ filminin de içinde bulunduğu konumdan daha önceki bir bölgede kılcal çatlaklar ortaya çıkmaktadır. IV nolu dinamik yük örneğinde yatakta meydana gelen yorulma çatlakları yaklaşık 28 saatlik çalışma süresi (2.083.200 yük tekrarı) sonunda meydana gelmektedir.

Yatağa uygulanan bu dinamik yük etkisinde milin her 10° 'lik krank açısında yatakta ortaya çıkan çevresel basınç dağılımları Şekil 150'de verilmektedir. Bu basınç dağılımlarının maksimum değerler gösterdiği bölge ile yorulma bölgesinin uyum içinde olduğu görülmektedir. Burada ortaya çıkan basınç dağılımları içinde maksimum basınç değeri 212° 'deki krank açısında 1014 MPa olmakta ve bu anda yatağa etki eden kuvvette 23985 N değerini almaktadır.

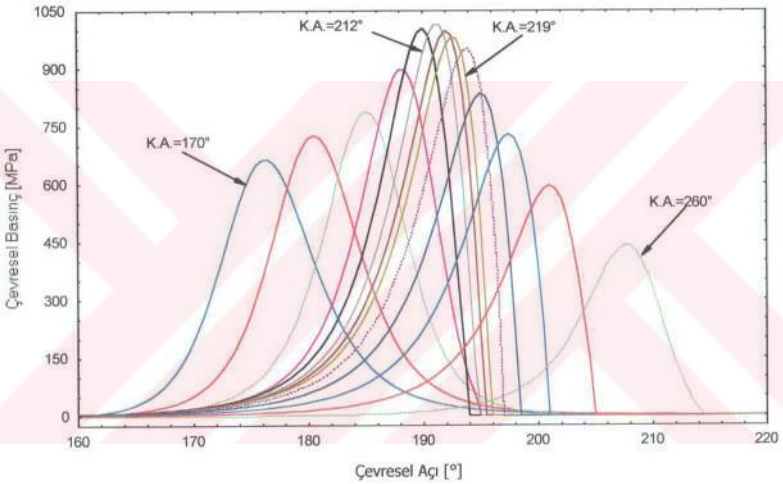
3.4.1. İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Deney yatağına uygulanan IV nolu dinamik yük örneği altında oluşan yorulma bölgesi, yatağın çevresel açıları dikkate alındığında 185° ile 220° arasında ortaya



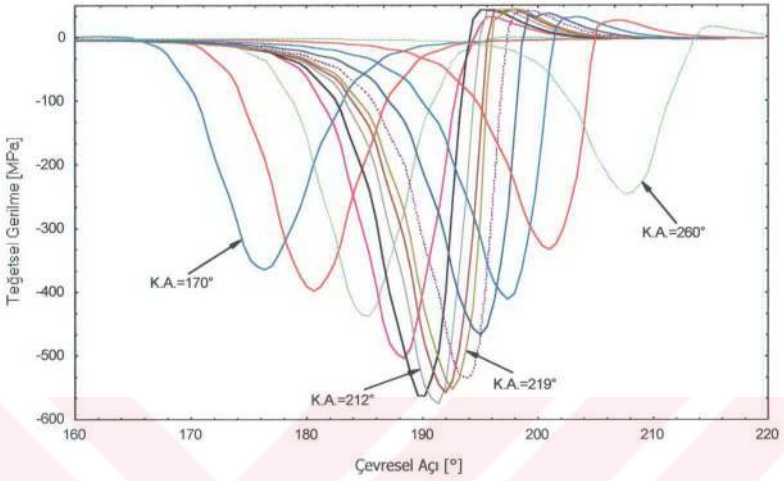
Şekil 150. IV nolu dinamik yük altında yatakta 10° 'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları

çıkılmaktadır. Aynı zamanda deney yatağının ana yüklenme bölgesi olan bu bölgeye etki eden basınç dağılımları Şekil 151'deki gibi göz önüne alınabilir. Bu basınç dağılımları etkisinde yapılan sayısal çözümler sonucunda yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 152'de ve radyal gerilme dağılımları da Şekil 153'de verilmektedir. Yapılan bu sonlu eleman çözümleri sonunda yatağın yorulma bölgesinde ortaya çıkan maksimum teğetsel çeki gerilmesi 219° 'lik krank açısındaki basınç dağılımı etkisinde 43,9 MPa olarak elde edilmiştir. Bu krank açısında yağ filminde oluşan basınç dağılımının maksimum değeri 982 MPa'dır.

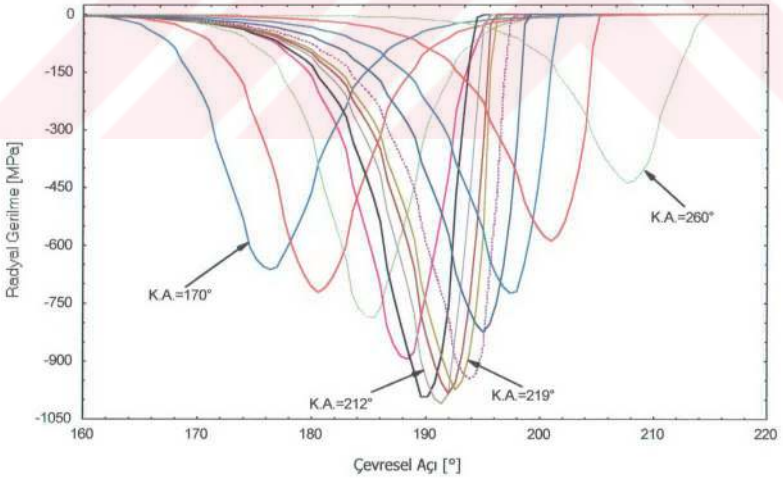


Şekil 151. IV nolu yük altında yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları

Yatak zarfında zarf kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımları, 219° 'deki krank açısında oluşan çevresel basınç dağılımının etkisinde incelenmiştir. Bu basınç dağılımı (Ek Şekil 64-a) altında yatak zarfında ortaya çıkan eş teğetsel gerilme değerlerinin dağılımı Ek Şekil 64-b'de görülmektedir. Burada teflon-bronz yatak tabakasında, basınç alanı altında kalan zarf yüzeyinde yağ film basıncının tepe değerine karşılık gelen noktada 552,2 MPa ($0,562 P_{\max}$) değerinde maksimum teğetsel bası gerilmesi oluşurken, aynı noktanın zarf yüzeyinin 0,32 mm altında teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyindeki değeri 352,1 MPa'a ($0,36 P_{\max}$) düşmektedir. Yağ filmindeki basınç



Şekil 152. Şekil 151'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan teğetsel gerilmeler



Şekil 153. Şekil 151'deki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan radyal gerilmeler

alanının bittiği yerden itibaren zarf yüzeyinde hesaplanan maksimum teğetsel çeki gerilmesi 43,9 MPa ($0,045 P_{max}$) değerinde iken, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak 76,3 MPa ($0,078 P_{max}$) değerine yükselmektedir.

Göz önüne alınan aynı basınç alanı etkisi altında yatak zarfı kalınlığı boyunca oluşan eş radyal gerilme değerlerinin dağılımı Ek Şekil 65'de verilmektedir. Burada basınç dağılımının maksimum tepe noktası altına karşılık gelen yatak yüzeyinde bası karakterli radyal gerilme maksimum 973,8 MPa ($\cong 1 P_{max}$) değerini alırken, birleşim yüzeyine doğru zarf derinliği boyunca gittikçe azalarak 945,6 MPa ($0,963 P_{max}$) değerine düşmektedir.

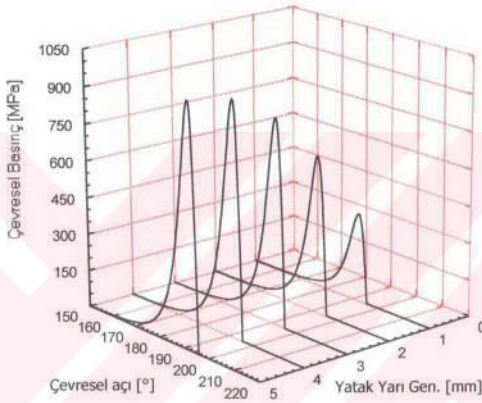
Yağ filminde oluşan aynı basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında meydana gelen eş kayma gerilmesi değerlerinin dağılımı Ek Şekil 66'da verilmektedir. Pozitif değerlikli kayma gerilmesi, yağ film basıncının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında, zarf yüzeyinin yaklaşık 0,54 mm ($h/s = 0,216$) altında, maksimum 189,6 MPa ($0,193 P_{max}$) değerinde oluşmaktadır. Negatif değerlikli kayma gerilmesi ise daha düşük eğime sahip basınç gradyanı altında, 86,5 MPa ($0,088 P_{max}$) maksimum değerinde, zarf yüzeyinin yaklaşık 0,76 mm ($h/s = 0,304$) altında ortaya çıkmaktadır.

Yatak zarfında göz önüne alınan yağ film basınç dağılımı altında ortaya çıkan gerilmeler, von Mises hipotezine göre hesaplanarak, elde edilen eşdeğer gerilme dağılımları Ek Şekil 67'de verilmiştir. Burada yağ filmi basıncının tepe değerine karşılık gelen noktalarda en büyük eşdeğer gerilme değerleri hesaplanmaktadır. Yatak zarfı yüzeyinde 396 MPa ($0,403 P_{max}$) olarak hesaplanan eşdeğer gerilme, birleşim yüzeyinde 571 MPa ($0,581 P_{max}$) değerine artmaktadır. Von Mises eşdeğer gerilmeleri zarf yüzeyinden yaklaşık 0,87 mm ($h/s = 0,348$) derinlikte 791 MPa ($0,805 P_{max}$) olarak maksimum değerini almaktadır.

Aynı yağ filmi basınç dağılımı (Ek Şekil 68-a) altında yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal deformasyonlar Ek Şekil 68-b'de görülmektedir. Bu basınç alanı altında en büyük çökme değeri, 11,7 μm olarak basıncın maksimum olduğu tepe değerinin altındaki noktada ortaya çıkmaktadır. Basınç alanı ile uyumlu bir değişim gösteren radyal deformasyon dağılımı, yağ film basınç alanından sonra yatak zarfı yüzeyinde hızla azaldıktan sonra zarf yüzeyinden 0,11 μm kadar bir yükselme göstermektedir. Yatak zarfında ortaya çıkan eş radyal deformasyon dağılımları da Ek Şekil 68-c'de verilmektedir.

3.4.2. Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Buradaki üç boyutlu sonlu eleman çözümlerinde, seçilen IV nolu dinamik yük örneği altında 219° 'deki krank açısı değerinde yağ filminde ortaya çıkan üç boyutlu basınç dağılımı göz önüne alınacaktır. Bu basınç dağılımının, enine yöne parabolik değişim göstermesinden dolayı, yatak yarı genişliğinde yapılan sayısal çözümlerde kullanılan üç boyutlu değişimi Şekil 154'de verilmektedir.



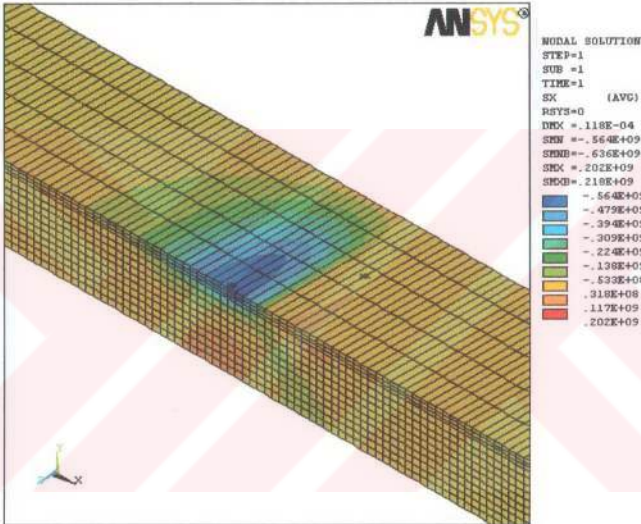
Şekil 154. IV nolu yük altında 219° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max}=982$ MPa)

3.4.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları

Yatak zarfında yağ filminde oluşan bu basınç dağılımı altında, zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin değişimleri Ek Şekil 69 ve Ek Şekil 70'de verilmektedir. Burada yağ film basınç alanı altında ortaya çıkan teğetsel bası gerilmeleri, basıncın tepe değeri altında yatak ortasında zarf yüzeyinde maksimum 564 MPa ($0,574 P_{\max}$) değerini alarak birleşim yüzeyine doğru azalıp 393,5 MPa ($0,4 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Teğetsel çeki gerilmeleri ise basınç alanı dışında yatak ortasında zarf yüzeyinde 35,5 MPa ($0,036 P_{\max}$) değerinde başlayıp, birleşim yüzeyine doğru artarak 55 MPa ($0,056 P_{\max}$) değerini almaktadır. Bası karakterli teğetsel gerilmeler, enine yönde

yatak kenarına doğru gittikçe azalmaktadır. Yatak kenarında zarf yüzeyinde 16,5 MPa ($0,017 P_{\max}$) olan en büyük teğetsel bası gerilmesi, birleşim yüzeyine doğru da azalarak 11 MPa ($0,011 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Çeki karakterli teğetsel gerilmeler ise yatak kenarında zarf yüzeyinde maksimum 20,6 MPa ($0,021 P_{\max}$) değerinde olup, birleşim yüzeyine doğru artarak 66,4 MPa ($0,068 P_{\max}$) değerine ulaşmaktadır.

Sonlu elemanlar çözümü sonunda yatak zarfında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin üç boyutlu bölgesel dağılımı Şekil 155’de görülmektedir.



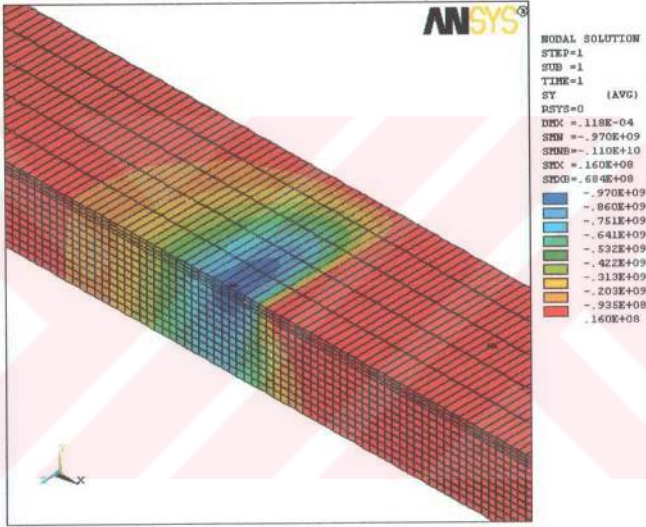
Şekil 155. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilme dağılımları

3.4.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları

Yatak zarfına etki eden aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan radyal gerilmelerin dağılımı Ek Şekil 71 ve Ek Şekil 72’de verilmektedir. Burada basınç dağılımına uygun bası karakterli gerilmeler şeklinde elde edilen radyal gerilmeler, basınç alanı içinde ve yatak ortasında basıncın tepe değeri altında en büyük değerlerini almaktadır. Yatak zarfı

yüzeyinde maksimum 970 MPa ($\cong 1 P_{max}$) değerini alan radyal gerilme, birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak 940,9 MPa ($0,958 P_{max}$) değerine düşmektedir. Radyal gerilmelerin değerleri, enine yönde yatak kenarına doğru ilerledikçe azalmaktadır. Yatak kenarında zarf yüzeyinde 21,7 MPa ($0,022 P_{max}$) değerinde olan radyal gerilme, birleşim yüzeyinde ise 41,9 MPa ($0,043 P_{max}$) değerini almaktadır.

Radyal gerilmelerin göz önüne alınan üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan bölgesel dağılımı Şekil 156'da görülmektedir.



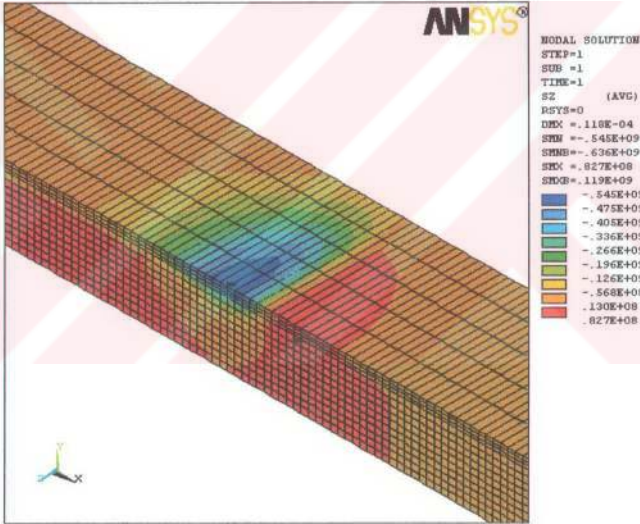
Şekil 156. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları

3.4.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları

Yatak zarfında aynı yağ filmi basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan radyal gerilmelerin dağılımı Ek Şekil 73 ve Ek Şekil 74'de verilmektedir. Burada basınç alanı dışında ve yatak ortasında çeki karakterli eksenel gerilme maksimum 27,8 MPa ($0,028 P_{max}$) değerinde başlayıp, birleşim yüzeyine doğru artarak 61 MPa ($0,062 P_{max}$) değerini almaktadır. Basınç alanı içinde ise en büyük eksenel bası gerilmeleri, yatak

ortasında basıncın tepe değeri altında maksimum 545 MPa ($0,555 P_{max}$) değerinde olup, birleşim yüzeyine doğru azalarak 374,8 MPa ($0,382 P_{max}$) değerine düşmektedir. Hem çeki hem de bası karakterli eksenel gerilme değerleri, enine yönde yatak kenarına doğru ilerledikçe azalmaktadırlar. Yatak kenarında zarf yüzeyinde ortaya çıkan en büyük eksenel çeki gerilmesi değeri 4,9 MPa ($0,005 P_{max}$) olup, birleşim yüzeyinde 9,7 MPa ($0,01 P_{max}$) değerine artmaktadır. Yatak kenarında oluşan eksenel bası gerilmesi, zarf yüzeyinde 84,3 MPa ($0,086 P_{max}$) değerindeyken, birleşim yüzeyinde 39,7 MPa ($0,04 P_{max}$) değerine kadar azalmaktadır.

Yağ filmindeki aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfında oluşan eksenel gerilme değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 157'de görülmektedir.



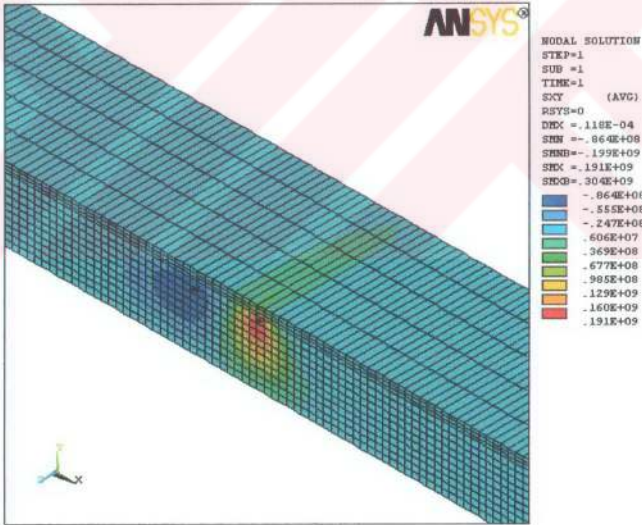
Şekil 157. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel gerilme dağılımları

3.4.2.4. Yatakta Hesaplanan τ_{xy} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Göz önüne alına üç boyutlu basınç dağılımı altında zarfın yapılan sonlu eleman çözümü sonunda yüzeyde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya

çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri dağılımı sırasıyla Ek Şekil 75 ve Ek Şekil 76'da verilmektedir. Maksimum pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi, yatak ortasında büyük basınç gradyanı altında zarf yüzeyinde 39,5 MPa (0,04 P_{max}) değerinde başlayarak, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artmakta ve 167,4 MPa (0,17 P_{max}) değerine kadar yükselmektedir. Negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilme ise yatak ortasında diğer basınç ayağı altında zarf yüzeyinde maksimum 12,3 MPa (0,013 P_{max}) değerinde olup, birleşim yüzeyine doğru artarak 63 MPa (0,064 P_{max}) değerine kadar ulaşmaktadır. Hem pozitif hem de negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi değerleri teflon-bronz tabakası kalınlığı boyunca artmaktadır. Fakat enine yönde yatak kenarına doğru gidildikçe, her iki τ_{xy} kayma gerilmesi değerleri büyük bir azalma göstermektedirler.

Yatak zarfına etki eden basınç dağılımı altında zarfın yapılan üç boyutlu sayısal çözüm sonunda zarfın ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 158'de görülmektedir.

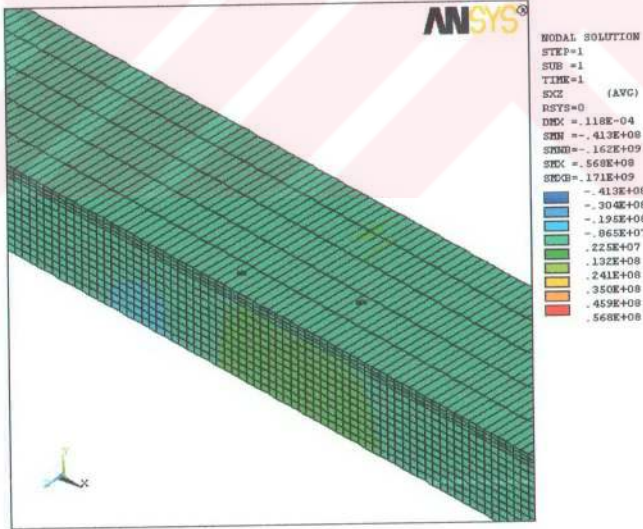


Şekil 158. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları

3.4.2.5. Yatakta Hesaplanan τ_{xz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatakta aynı üç boyutlu yağ filmi basınç dağılımı altında zarf yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları da Ek Şekil 77 ve Ek Şekil 78'de verilmektedir. Burada pozitif ve negatif değerlikli τ_{xz} kayma gerilme değerleri yatak ortasında en düşük değerde oluşmakta ve yatak kenarına doğru ilerledikçe maksimum değerlerini almaktadırlar. Yatak zarfı yüzeyinde yatak kenarına doğru oluşan en büyük negatif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmesi 1,8 MPa (0,002 P_{max}) değerinde olup, birleşim yüzeyine doğru artarak 8,6 MPa (0,009 P_{max}) değerine kadar yükselmektedir. Pozitif değerlikli τ_{xz} kayma gerilmesi ise yatak kenarında zarf yüzeyinde maksimum 2,7 MPa (0,003 P_{max}) değerinde başlayıp, birleşim yüzeyine doğru gittikçe 16,8 MPa (0,017 P_{max}) değerine kadar artmaktadır.

Üç boyutlu yağ film basınç dağılımı altında yatak zarfında sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan τ_{xz} kayma gerilmesi değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 159'da görülmektedir.

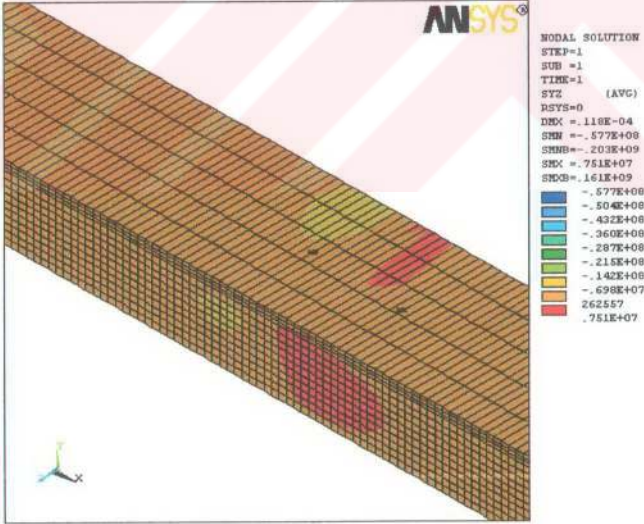


Şekil 159. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xz} kayma gerilmesi dağılımları

3.4.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Aynı üç boyutlu yağ film basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{yz} kayma gerilmelerinin değişimi Ek Şekil 79 ve Ek Şekil 80'de verilmektedir. Pozitif değerlikli τ_{zy} kayma gerilmesi, zarf yüzeyinde yatak kenarına doğru 0,4 MPa (0,0004 P_{max}) değerinde ortaya çıkıp, birleşim yüzeyine doğru artarak 2,9 MPa (0,003 P_{max}) maksimum değerine ulaşmaktadır. Negatif değerlikli τ_{zy} kayma gerilmesi de zarf yüzeyinde yatak kenarına doğru 9,2 MPa (0,01 P_{max}) değerinde ortaya çıkıp, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak maksimum 50 MPa (0,051 P_{max}) değerine kadar yükselmektedir. τ_{zy} kayma gerilmeleri de yatak ortasına doğru enine yönde ilerledikçe azalmakta ve yatak ortasında en düşük değerlerini almaktadır.

Yatakta yağ filmi basınç dağılımı altında zarfta sayısal çözümle hesaplanan τ_{yz} kayma gerilmelerinin bölgesel gerilme dağılımları Şekil 160'da görülmektedir.

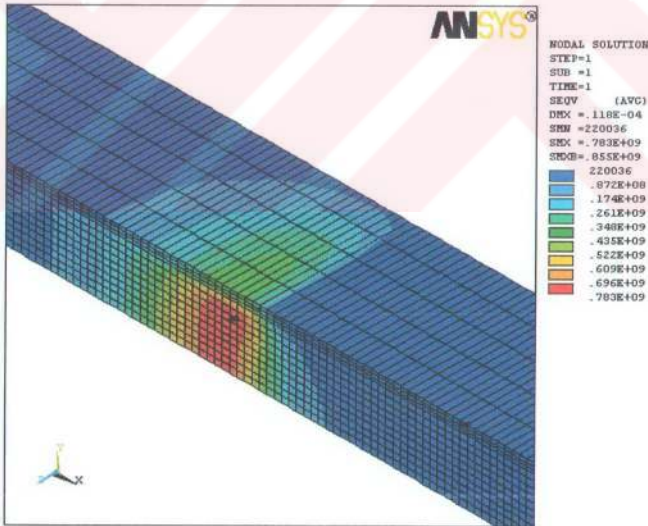


Şekil 160. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları

3.4.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları

Üç boyutlu yağ filmi basınç dağılımı altında sonlu elemanlar analiziyle elde edilen gerilme değerlerinden, von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanmış eşdeğer gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 161'de görülmektedir. Burada yağ film basıncının maksimum değere eriştiği tepe noktası altında, yatak ortasında, yatak yüzeyinin yaklaşık 0,98 mm ($h/s = 0,392$) altında çelik destek tabakası içinde 783,1 MPa ($0,797 P_{\max}$) değerinde maksimum eşdeğer gerilme ortaya çıkmaktadır.

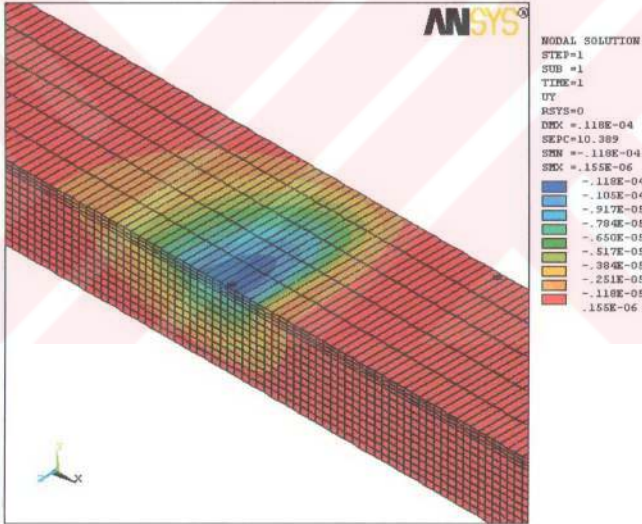
Bu gerilme hipotezine göre yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki yüzeyde hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri de Ek Şekil 81 ve Ek Şekil 82'de verilmektedir. Yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan maksimum eşdeğer gerilme değeri, yatak ortasında yağ filminin tepe basıncı altına karşılık gelen yerde 415,9 MPa ($0,424 P_{\max}$) olmaktadır. Birleşim yüzeyine doğru gittikçe artan von Mises eşdeğer gerilme değerleri burada 557,1 MPa ($0,567 P_{\max}$) değerini almaktadır.



Şekil 161. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları

3.4.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları

Göz önüne alınan üç boyutlu yağ film basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Ek Şekil 83'de görülmektedir. Yatak yüzeyinde ortaya çıkan maksimum çökme değeri, yatak ortasında basıncın tepe değeri altında $11,8 \mu\text{m}$ 'dir. Yatağa etki eden üç boyutlu basınç dağılımı ile uyumlu olarak yatak kenarına doğru enine yönde gittikçe azalan çökme değeri $1,79 \mu\text{m}$ değerine kadar düşmektedir. Basınç alanı dışında ise çevresel olarak gittikçe azalan çökme miktarları yatak zarfı yüzeyinde sona erip bu noktadan sonra $0,15 \mu\text{m}$ kadar yükselme göstermektedir. Yatak zarfında deformasyon bölgeleri şeklinde hesaplanan radyal deformasyonların dağılımları Şekil 162'de verilmektedir.

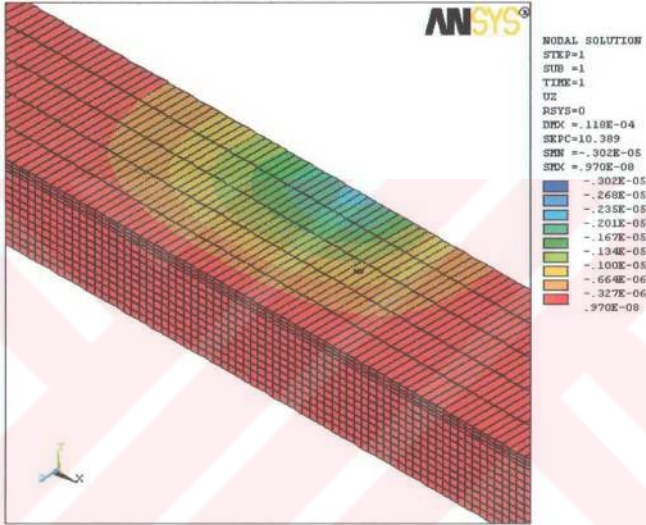


Şekil 162. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları

3.4.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları

Aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar Ek Şekil 84'de görülmektedir. Yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan en büyük

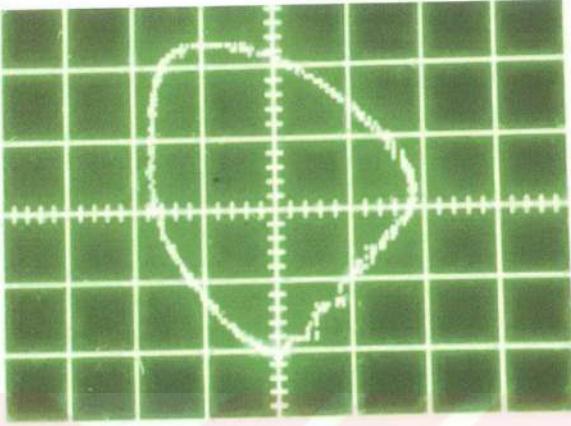
deformasyonlar, basınç alanı içinde yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru 2,1 μm değerinde ortaya çıkmaktadır. Bu basınç dağılımı altında yatak zarfında hesaplanan eksenel deformasyonların bölgesel dağılımları Şekil 163’de verilmektedir. Burada ortaya çıkan en büyük eksenel deformasyon, yatak zarfının alt yüzeyinde, yatak kenarında, yatak zarfından dışarıya doğru 3,02 μm değerinde hesaplandı.



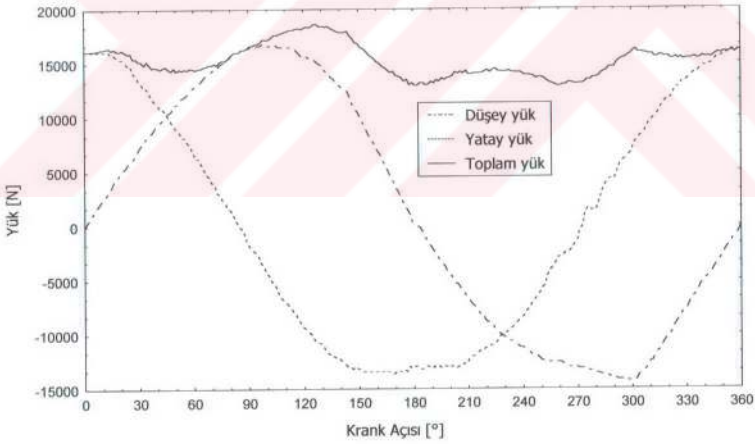
Şekil 163. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları

3.5. V Nolu Dinamik Yükte Elde Edilen Bulgular

Dinamik yük örneği olarak seçilen V nolu yükün osiloskoptan alınmış polar diyagramı Şekil 164’de görülmektedir. Polar yükün düşey ve yatay eksenlerdeki krank açısına göre değişimleriyle, bunların bileşkesi olan toplam yükün aynı periyod içindeki değişimi Şekil 165’de verilmektedir. Burada deney yatağına etki eden maksimum yük değerleri 110° ile 138°’lik krank açıları arasında olup, en büyük değerini 125°’lik krank açısında 18618 N olarak almaktadır. Bu dinamik yük örneği 10 mm genişliğindeki yatağa uygulanmıştır.

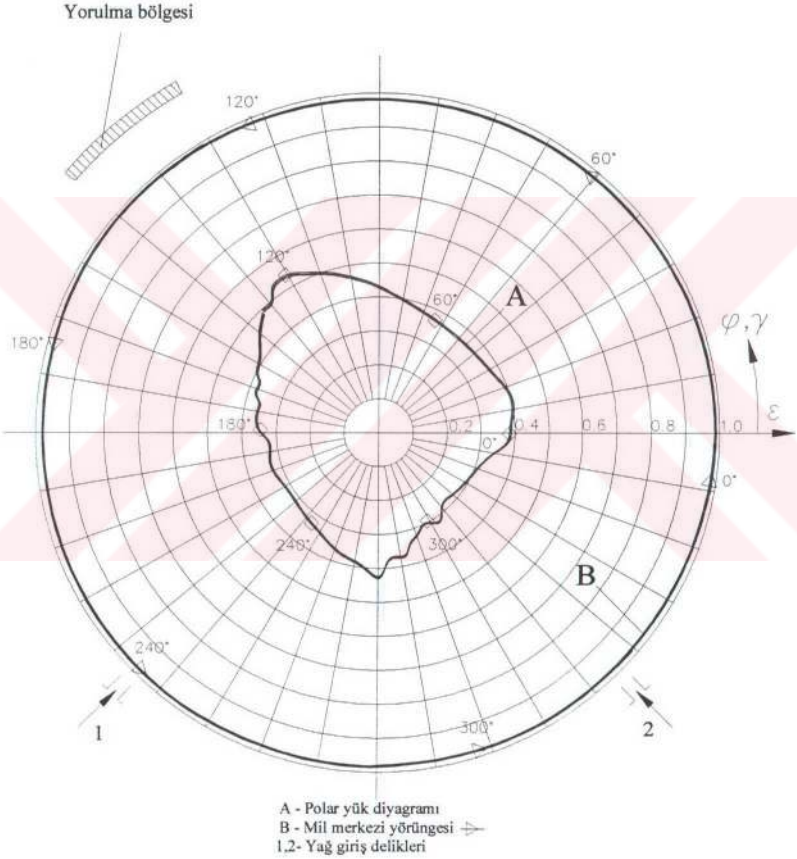


Şekil 164. V nolu deney için yatağa uygulanan dinamik yükün polar diyagramı



Şekil 165. V nolu dinamik yükün düşey ve yatay bileşenleri ve toplam yükün krank açısıyla değişimi

Yapılan deneyler sonunda yatak yüzeyinde oluşan yorulma bölgesi, dinamik yükün polar diyagramı ve mil merkezinin yörüngesi Şekil 166'da verilmektedir. Deney yatağında yorulmasının olduğu bölgeden alınmış yorulma çatlaklarını gösteren fotoğraf Şekil 167'de görülmektedir.



Şekil 166. V nolu dinamik yük altında yatakta oluşan mil merkezi yörüngesi



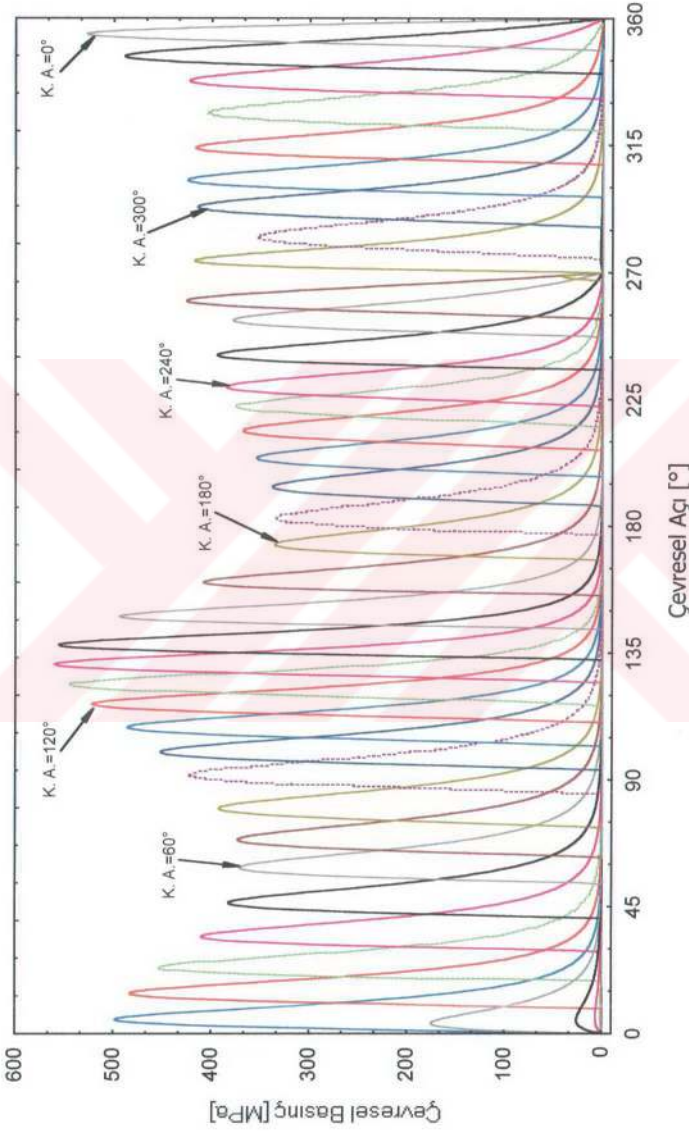
Şekil 167. V nolu yük altında yatakta oluşan yorulma bölgesi

Deney yatağında kılcal çatlakların oluştuğu yorulma bölgesi, yatağın çevresel açısı göz önüne alındığında 120° ile 140° arasında ortaya çıkmaktadır. Bu bölge, yatağa uygulanan yükün maksimum değerler aldığı bölge olup, yağ filminin minimum olduğu konumdan 10° kadar önceki bölgede oluşmaktadır. Yorulma çatlaklarının yatak ortasında başlayıp enine yönde ilerleyerek yatak kenarına ulaştıkları görülmektedir. Bu dinamik yük etkisinde yapılan deneylerde yatak yüzeyinde oluşan yorulma çatlakları, yaklaşık 95 saatlik çalışma süresi (7.068.000 yük tekrarı) sonunda ortaya çıkmaktadır.

Seçilen V nolu dinamik yük etkisinde milin her 10° 'lik krank açısında yatakta ortaya çıkan çevresel basınç dağılımları Şekil 168'de görülmektedir. Burada oluşan en büyük basınç dağılımları yatakta yorulmanın oluştuğu bölge içerisinde bulunmaktadır. Bu basınç dağılımları içerisinde krank açısının 144° 'deki konumunda ortaya çıkan basınç dağılımı 571,3 MPa maksimum değeriyle en büyük çevresel basınç dağılımını oluşturmaktadır. Bu anda yatağa etki eden kuvvet 17958 N değerindedir.

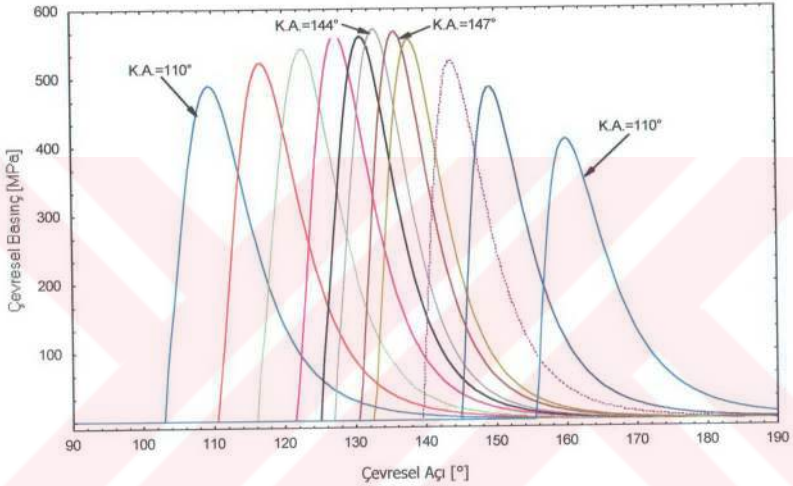
3.5.1. İki Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Göz önüne alınan V nolu dinamik yük örneği altında deney yatağında ortaya çıkan yorulma bölgesi yatağın çevresel açıları 120° ile 140° arasında olmaktadır. Bu bölge aynı zamanda yatağın ana yüklenme bölgesi olup, buraya etki eden basınç dağılımları



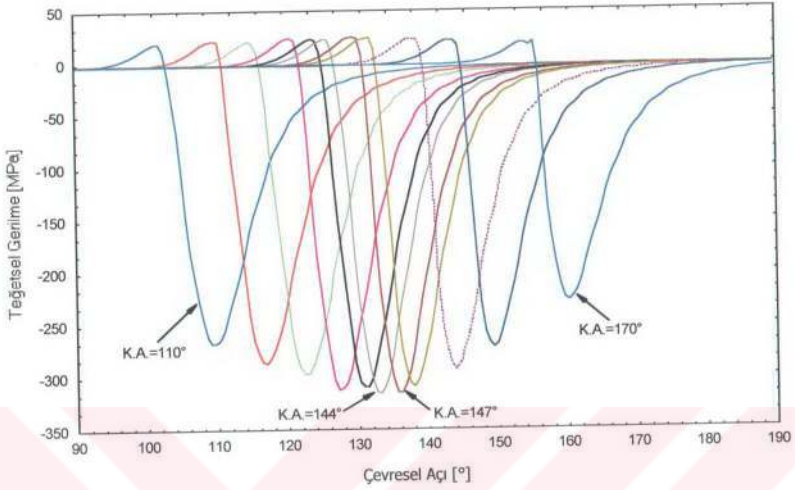
Şekil 168. V nolu dinamik yük altında yatakta 10° 'lik krank açılarında oluşan çevresel basınç dağılımları

Şekil 169'daki görüldüğü gibi alınabilir. Bu basınç dağılımları etkisinde yapılan sonlu elemanlar analiziyle yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel gerilme dağılımları Şekil 170 ve radyal gerilme dağılımları da Şekil 171'de verilmektedir. Yatağın yorulma bölgesinde zarf yüzeyinde oluşan teğetsel çeki gerilmelerinin maksimum değeri 147° 'lik krank açısındaki basınç dağılımı etkisinde 24,7 MPa olarak ortaya çıkmaktadır. Bu krank açısında yağ filminde oluşan basınç dağılımının maksimum değeri 567 MPa'dır.

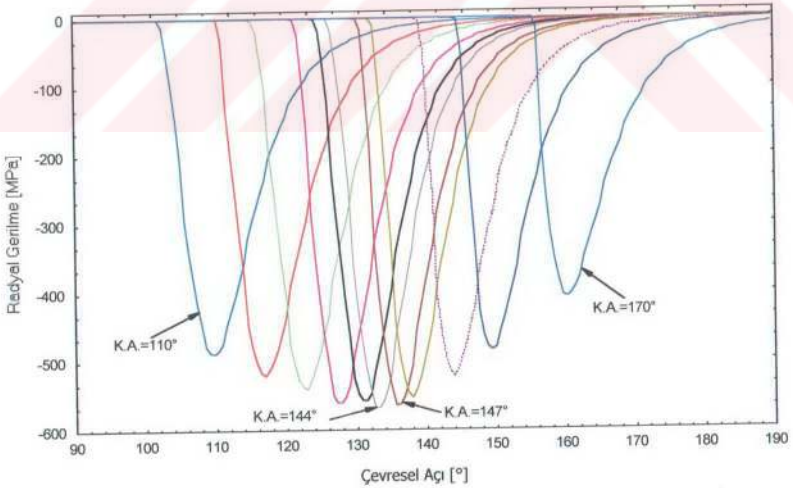


Şekil 169. V nolu yük altında yatağın yorulma bölgesine etki eden basınç dağılımları

Krank açısının 147° 'sinde yağ filminde oluşan çevresel basınç dağılımı (Ek Şekil 85-a) etkisinde yatak zarfında zarf kalınlığı boyunca ortaya çıkan eş teğetsel gerilme değerlerinin dağılımları Ek Şekil 85-b'de görülmektedir. Grafikten de görüleceği üzere yatak zarfında oluşan en büyük teğetsel bası gerilmeleri basınç alanı altında ortaya çıkmaktadır. Teflon-bronz tabakasında, basıncın tepe değeri altında maksimum 314,7 MPa ($0,555 P_{\max}$) değerinde ortaya çıkan bası karakterli teğetsel gerilme, zarf yüzeyinin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak 195,8 MPa ($0,345 P_{\max}$) değerine düşmektedir. Yağ filminde oluşan basınç alanının bittiği yerden itibaren zarf yüzeyinde maksimum değeri 24,7 MPa ($0,044 P_{\max}$) olan çeki karakterli teğetsel gerilmeler



Şekil 170. Şekil 169'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan teğetsel gerilmeler



Şekil 171. Şekil 169'daki basınç dağılımları altında yatak zarfı yüzeyinde yorulma bölgesinde hesaplanan radyal gerilmeler

oluşurken, yüzeyin 0,32 mm altındaki birleşim yüzeyine doğru gittikçe artan bu gerilmeler 43 MPa ($0,076 P_{max}$) değerine kadar yükselmektedir.

Yağ filminde oluşan aynı basınç dağılımı etkisi altında yatak zarfı kalınlığı boyunca oluşan eş radyal gerilme değerleri dağılımı da Ek Şekil 86'da verilmektedir. Basınç dağılımının tepe değerine karşılık gelen yatak yüzeyinde en büyük bası karakterli radyal gerilme 563,9 MPa ($\approx 1 P_{max}$) değerinde ortaya çıkarken, yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyine doğru inerken azalarak 552,6 MPa ($0,975 P_{max}$) değerine kadar düşmektedir.

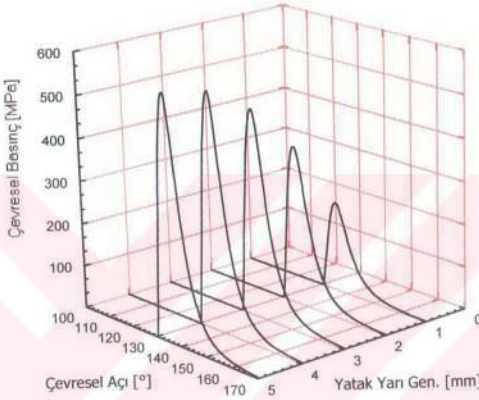
Yatakta aynı yağ filmi basınç dağılımı etkisinde zarfta oluşan eş kayma gerilmesi değerleri Ek Şekil 87'de verilmektedir. Yatak zarfında oluşan en büyük kayma gerilmesi değeri, yağ film basıncının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında, maksimum 85,6 MPa ($0,151 P_{max}$) değerinde negatif değerlikli olarak, zarf yüzeyinin yaklaşık 0,76 mm ($h/s = 0,304$) derinliğinde ortaya çıkmaktadır. Daha düşük eğime sahip olan basınç gradyanı altında ise maksimum değeri 40,9 MPa ($0,072 P_{max}$) olan pozitif değerlikli kayma gerilmesi, zarf yüzeyinin yaklaşık 0,98 mm ($h/s = 0,392$) altında meydana gelmektedir.

Göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımı etkisinde yatak zarfında ortaya çıkan gerilmeler, von Mises hipotezine göre hesaplanarak, eşdeğer gerilme dağılımları elde edildi. Bu eşdeğer gerilme dağılımları Ek Şekil 88'de verilmektedir. Burada zarf yüzeyinde hesaplanan en büyük eşdeğer gerilme, yağ filmi basıncının tepe değerine karşılık gelen noktada 244 MPa ($0,43 P_{max}$) değerinde olmaktadır. Zarf yüzeyinin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ise 352 MPa ($0,621 P_{max}$) değerinde hesaplanmıştır. Yatak zarfı kalınlığı boyunca ortaya çıkan maksimum von Mises eşdeğer gerilmesi ise yatak yüzeyinin yaklaşık 1,41 mm ($h/s = 0,564$) kadar altında, 487 MPa ($0,859 P_{max}$) değerinde elde edilmiştir.

Yatak zarfında göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımı altında, basınç değişimiyle uyumlu olarak ortaya çıkan radyal deformasyonların yatak zarfı yüzeyindeki dağılımı Ek Şekil 89-b'de görülmektedir. Burada basınç alanı altında, maksimum tepe basıncı altında, 7,17 μm olarak en büyük çökme değeri oluşmaktadır. Yağ film basınç alanından sonraki yatak zarfı yüzeyinde ise çökme miktarı hızla azaldıktan sonra zarf yüzeyinden 0,09 μm kadar bir yükselme göstermektedir. Aynı çevresel basınç dağılımı etkisinde, yatak zarfında ortaya çıkan eş radyal deformasyon dağılımları Ek Şekil 89-c'de verilmektedir.

3.5.2. Üç Boyutlu Sayısal Çözüm Sonuçları

Yatak zarfının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle çözümünde, V nolu dinamik yük örneği altında, 147° krank açısında yağ filminde ortaya çıkan üç boyutlu basınç dağılımı dikkate alınacaktır. Şekil 172'de görüldüğü gibi, bu basınç dağılımının parabolik olmasından dolayı yatak yarı zarfında hesaplamalar yapılacaktır.



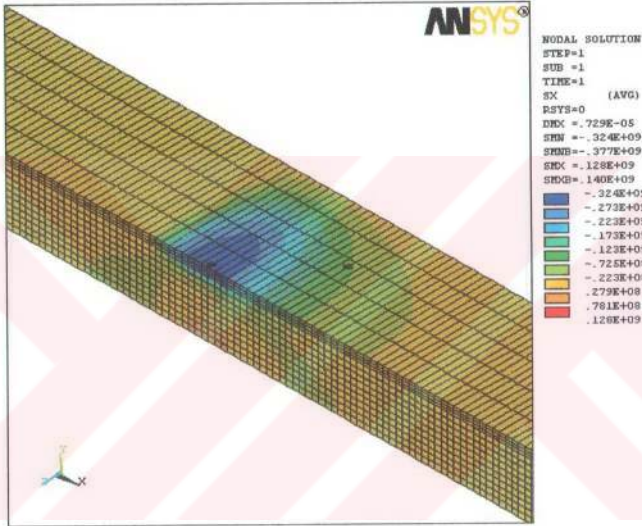
Şekil 172. V nolu yük altında 147° krank açısında oluşan üç boyutlu basınç dağılımı ($P_{\max}=567$ MPa)

3.5.2.1. Yatakta Hesaplanan Teğetsel Gerilme Dağılımları

Yatak zarfında etkili olan bu basınç dağılımı altında ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin zarf yüzeyindeki ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyindeki değişimleri Ek Şekil 90 ve Ek Şekil 91'de verilmektedir. Bası karakterli teğetsel gerilmeler, yatak yüzeyinde, yağ film basınç alanı altında, yatak ortasındaki maksimum tepe basıncının altında 323,5 MPa'lık ($0,571 P_{\max}$) maksimum değerle başlayıp, birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalarak 226 MPa ($0,4 P_{\max}$) değerine kadar düşmektedir. Çeki karakterli teğetsel gerilmeler ise, yağ filmi basınç alanı dışında, zarf yüzeyinde maksimum 20,2 MPa ($0,036 P_{\max}$) değeriyle başlayarak, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak 31,9 MPa ($0,056 P_{\max}$) değerini almaktadır. Teğetsel bası gerilmeleri yatak kenarında, zarf yüzeyinde 6,6 MPa ($0,011 P_{\max}$) değerinde olup, birleşim

yüzeyine doğru inildikçe 7,6 MPa ($0,013 P_{max}$) değerine artmaktadır. Benzer şekil teğetsel çeki gerilmeleride, yatak kenarında zarf yüzeyinde, 11 MPa ($0,019 P_{max}$) değerinden başlayarak, birleşim yüzeyine doğru artarak 45,6 MPa ($0,08 P_{max}$) değerine kadar yükselmektedir.

Yatak zarfında aynı üç boyutlu basınç dağılımı etkisinde, ortaya çıkan teğetsel gerilmelerin yatak zarfındaki üç boyutlu bölgesel dağılımı Şekil 173'de görülmektedir.



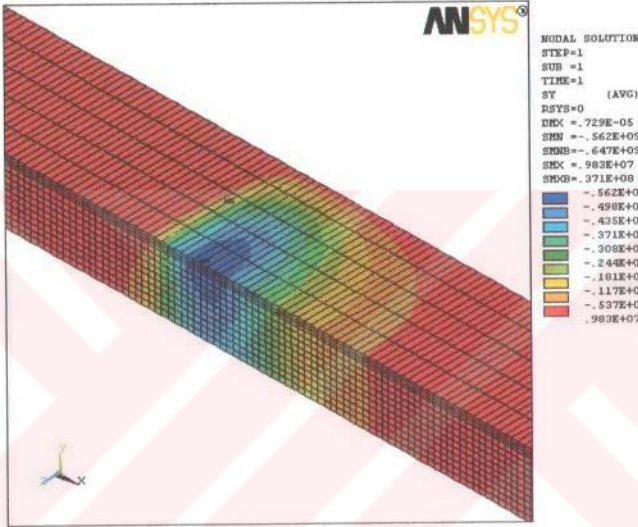
Şekil 173. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen teğetsel gerilme dağılımları

3.5.2.2. Yatakta Hesaplanan Radyal Gerilme Dağılımları

Göz önüne alınan üç boyutlu basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler sırasıyla Ek Şekil 92 ve Ek Şekil 93'de verilmektedir. Yatak zarfı yüzeyinde yatak ortasında maksimum tepe basıncı altında, 561,7 MPa'lık ($\cong 1 P_{max}$) maksimum değerle başlayan radyal gerilme, birleşim yüzeyine doğru inildikçe azalarak 552,1 MPa ($0,974 P_{max}$) değerini almaktadır. Radyal gerilmeler eksen yönünde yatak kenarına doğru azalma

göstermektedirler. Yatak kenarında zarf yüzeyinde 12,8 MPa ($0,023 P_{max}$) değerinde olan radyal gerilme, birleşim yüzeyine doğru gittikçe artarak 25 MPa ($0,044 P_{max}$) değerine kadar yükselmektedir.

Yatak zarfında üç boyutlu basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfında ortaya çıkan radyal gerilmelerin bölgesel dağılımı Şekil 174'de görülmektedir.



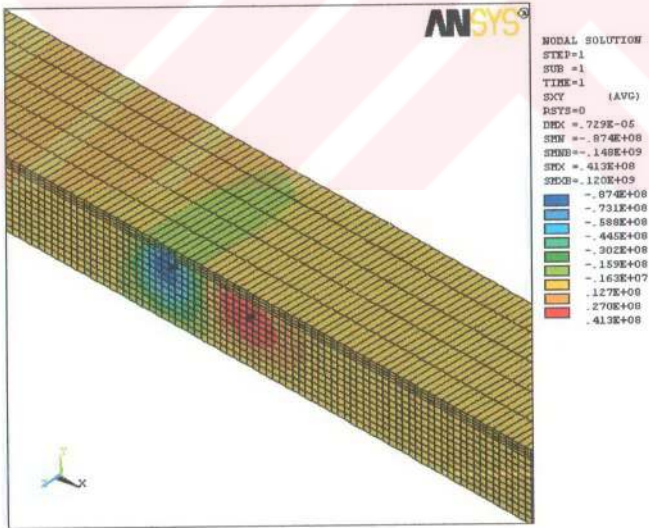
Şekil 174. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal gerilme dağılımları

3.5.2.3. Yatakta Hesaplanan Eksenel Gerilme Dağılımları

Yağ filminde göz önüne alınan aynı basınç dağılımı altında üç boyutlu yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğinde birleşim yüzeyinde ortaya çıkan eksenel gerilmeler Ek Şekil 94 ve Ek Şekil 95'de verilmektedir. Burada yatak ortasında, en büyük tepe basıncı değeri altında, zarf yüzeyinde 311,6 MPa ($0,55 P_{max}$) maksimum eksenel basınç gerilmesi oluşurken, zarf kalınlığı boyunca birleşim yüzeyine doğru gittikçe 203,1 MPa ($0,358 P_{max}$) değerine kadar düşmektedir. Çeki karakterli eksenel gerilme ise yatak ortasında basınç alanı dışında zarf yüzeyinde, maksimum 16,9 MPa ($0,03 P_{max}$) değerinde

çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri dağılımı Ek Şekil 96 ve Ek Şekil 97'de verilmektedir. En büyük kayma gerilmesi değerleri basıncın ani düşüş gösterdiği basın ayağı altında, negatif değerlikli olarak meydana gelmektedir. Yatak ortasında, zarf yüzeyinde oluşan negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi 14,7 MPa ($0,026 P_{max}$) değerinde ortaya çıkarak, birleşim yüzeyine doğru inildikçe 71,3 MPa ($0,126 P_{max}$) değerine kadar artmaktadır. Yatak yüzeyinde ortaya çıkan pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi ise yatak ortasında 5,7 MPa ($0,01 P_{max}$) değerinden başlayıp, zarf kalınlığı boyunca artarak, birleşim yüzeyinde 29 MPa ($0,051 P_{max}$) değerine ulaşmaktadır. τ_{xy} kayma gerilme değerleri, enine yönde yatak kenarına doğru gidildikçe azalma göstermektedirler. Yatak kenarında, zarf yüzeyinde oluşan en büyük negatif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi, 0,44 MPa ($0,0008 P_{max}$) değerinde olurken, birleşim yüzeyinde de 4,13 MPa ($0,007 P_{max}$) değerini almaktadır. Pozitif değerlikli τ_{xy} kayma gerilmesi ise, yatak kenarında zarf yüzeyinde, 0,49 MPa ($0,0009 P_{max}$) değeriyle başlayıp, birleşim yüzeyinde 3,4 MPa ($0,006 P_{max}$) değerine kadar artmaktadır.

τ_{xy} kayma gerilmelerinin üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak zarfında ortaya çıkan değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 176'da görülmektedir.

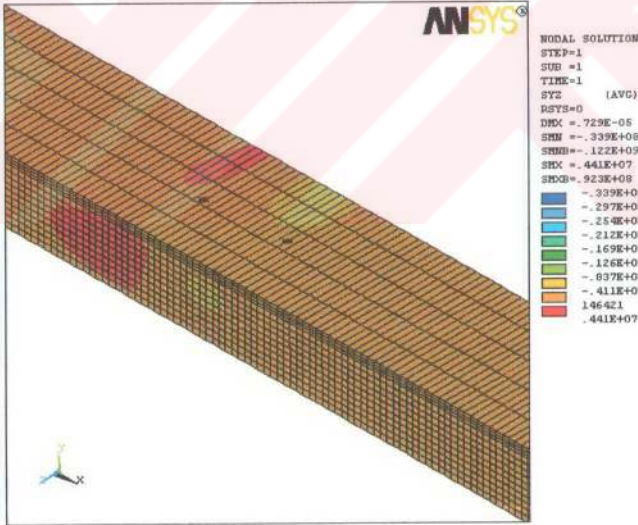


Şekil 176. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları

3.5.2.6. Yatakta Hesaplanan τ_{yz} Kayma Gerilmesi Dağılımları

Yatak zarfına etki eden aynı üç boyutlu yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfı yüzeyinde ve yüzeyin 0,32 mm derinliğindeki birleşim yüzeyinde ortaya çıkan τ_{yz} kayma gerilmelerinin değişimi sırasıyla Ek Şekil 100 ve Ek Şekil 101’de verilmektedir. Üç boyutlu yatak zarfında oluşan τ_{zy} kayma gerilmeleri, maksimum değerlerini yatak yarı yüzeyi ortasına doğru almakta ve yatak ortasına doğru ilerledikçe de, değerlerinde azalma olmaktadır. Burada zarf yüzeyinde meydana gelen pozitif değerlikli maksimum τ_{yz} kayma gerilmesi 0,21 MPa (0,0004 P_{max}) değerinde başlayıp, birleşim yüzeyine doğru artarak 1,6 MPa (0,003 P_{max}) değerine ulaşmaktadır. Negatif değerlikli maksimum τ_{yz} kayma gerilmesi ise, zarf yüzeyinde 5,3 MPa (0,01 P_{max}) değerinde olup, birleşim yüzeyine doğru artarak 29 MPa (0,051 P_{max}) değerine kadar yükselmektedir.

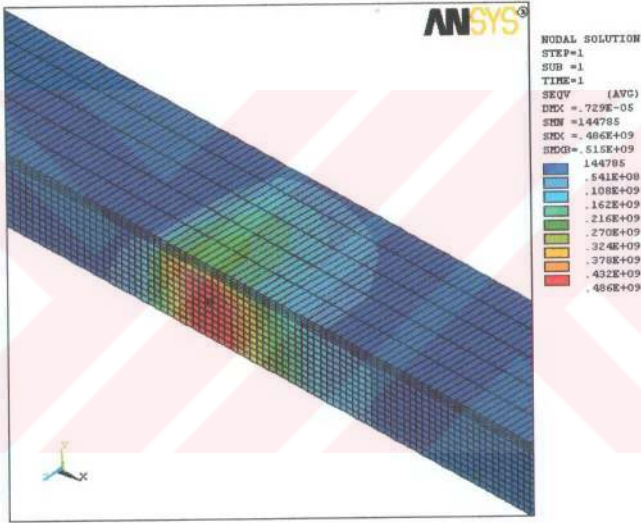
Aynı yağ filmi basınç dağılımı altında yatak zarfında τ_{yz} kayma gerilmelerinin bölgesel gerilme dağılımları Şekil 178’de görülmektedir.



Şekil 178. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen τ_{yz} kayma gerilmesi dağılımları

3.5.2.7. Yatakta Hesaplanan von Mises Eşdeğer Gerilme Dağılımları

Yatak zarfının göz önüne alınan basınç dağılımı etkisinde, üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen gerilme dağılımlarından von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanmış eşdeğer gerilme değerlerinin bölgesel dağılımı Şekil 179'da verilmektedir. Burada hesaplanan maksimum eşdeğer gerilme, yağ film basıncının maksimum değere eriştiği tepe noktası altında, yatak ortasında, yatak yüzeyinin yaklaşık 1,41 mm ($h/s=0,564$) altında, 486 MPa ($0,857 P_{max}$) değerinde ortaya çıkmaktadır.



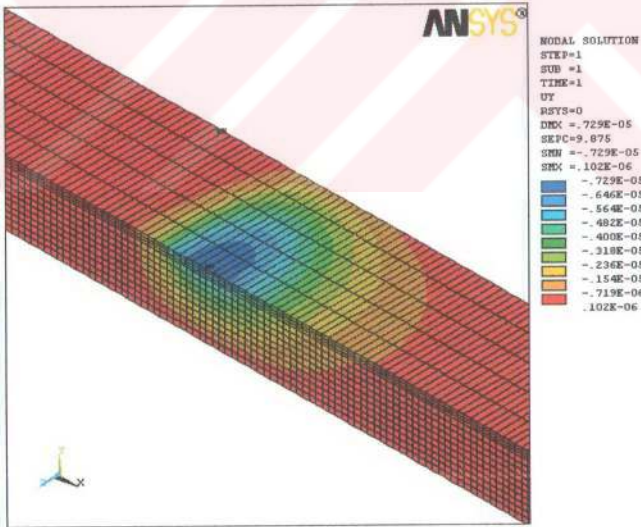
Şekil 179. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında hesaplanan von Mises eşdeğer gerilmelerin dağılımları

Von Mises gerilme hipotezine göre yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş dağılım eğrileri Ek Şekil 102'de verilmektedir. Burada yatak ortasında yağ filminin tepe basıncı altına karşılık gelen yerde, maksimum eşdeğer gerilme 250,1 MPa ($0,441 P_{max}$) değerinde hesaplanmıştır. Yatak yüzeyinin 0,32 mm altındaki teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyindeki tabakada von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilmelerin eş gerilme dağılım eğrileri de

Ek Şekil 103'de verilmektedir. Bu yüzeyde ortaya çıkan maksimum eş gerilme, yine yatak ortasında yağ filminin tepe basıncı altına karşılık gelen yerde 343,1 MPa ($0,605 P_{max}$) değerinde olmaktadır.

3.5.2.8. Yatakta Hesaplanan Radyal Deformasyon Dağılımları

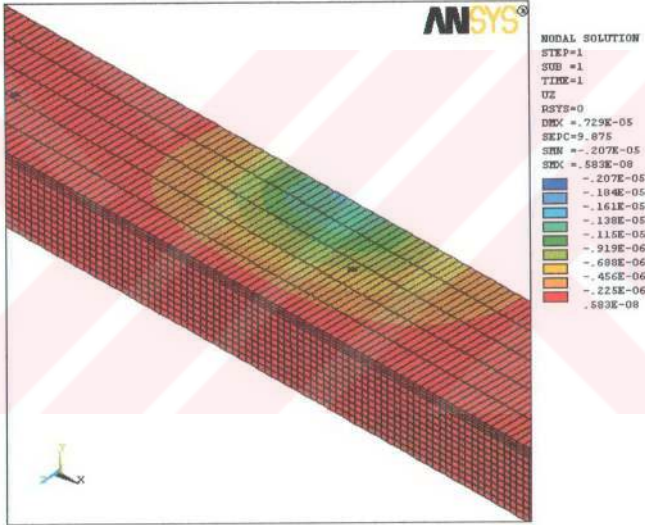
Aynı üç boyutlu basınç dağılımı altında yatak yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar Ek Şekil 104'de görülmektedir. Burada ortaya çıkan çökmeler, basınç alanı ile hem çevresel hem de enine yönde uyumlu olmaktadır. Zarf yüzeyinde, yatak ortasında maksimum 7,3 μm değerini alan radyal deformasyon, yatak kenarına doğru enine yönde gittikçe 1,14 μm değerine kadar azalmaktadır. Basınç alanı dışında ise çevresel olarak gittikçe azalan çökme miktarları yatak zarfı yüzeyinde sona erip bu noktadan sonra 0,1 μm kadar yükselme göstermektedir. Yatak zarfının sonlu elemanlar çözümü sonunda ortaya çıkan radyal deformasyonların yatak zarfındaki deformasyon bölgeleri şeklindeki dağılımları Şekil 180'de verilmektedir.



Şekil 180. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen radyal deformasyon dağılımları

3.5.2.9. Yatakta Hesaplanan Eksenel Deformasyon Dağılımları

Yatak zarfının bu üç boyutlu basınç dağılımı etkisinde, zarf yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar Ek Şekil 105'de görülmektedir. Burada oluşan en büyük eksenel deformasyonlar basınç alanı içinde, yatak kenarında, yatak zarfından dışarıya doğru $1,4 \mu\text{m}$ değerinde olmaktadır. Eksenel deformasyonların yatak zarfındaki bölgesel dağılımları da Şekil 181'de görülmektedir. Yatak zarfında ortaya çıkan en büyük eksenel deformasyon yatak kenarında yatak zarfından dışarıya doğru $2,07 \mu\text{m}$ olarak yatak zarfının alt yüzeyinde ortaya çıkmaktadır.



Şekil 181. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfında meydana gelen eksenel deformasyon dağılımları

4. İRDELEME

Yapılan bu çalışmada, göz önüne alınan bir dinamik yük örneği altında yataklama alanının değiştirilmesiyle yatakta ortaya çıkan yorulma bölgeleri incelendiğinde, her bir deneyde ana yük bölgesinde yorulma çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir. Daha önceden de belirtildiği gibi yüzey yorulmasında en önemli etken yağ filminde oluşan basınçtır. Yatakta meydana gelen en büyük basınç değerleri bu ana yük bölgesinde oluşmaktadır. Bu nedenle yorulmanın yatak yüzeyindeki ana yük bölgesinde olması beklenen bir olaydır. Bu konu ile ilgili olarak daha önce yapılan çalışmalarda da [12,74], yatak yüzeyinde oluşan yorulma çatlaklarının ana yük bölgesinde olduğu belirtilmiştir. Deneye tabi tutulan yataklarda ortaya çıkan mil yörüngeleri göz önüne alındığında yorulma bölgeleri, minimum film kalınlığından 15° - 25° kadar daha önceki bir konumunda oluşmaktadır. Buna benzer olarak Bıyıklıoğlu [32,75], dinamik yük altında çalışan beyaz metal alaşımlı yataklarda yaptığı çalışmalarda, yorulma bölgelerinin minimum film kalınlığından 10° - 25° kadar daha önceki bir konumda oluştuğunu belirlemiştir. Bu durum başka araştırmacılar [3,62,76] tarafından da benzer şekilde tespit edilmiştir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda sabit yataklama alanı göz önüne alınarak, değişik dinamik yükler altında yapılan deneylerde ortaya çıkan yorulma bölgelerinin de yine ana yük bölgesinde olduğu belirlenmiştir. Burada da mil merkezinin yörüngesi göz önüne alındığında yorulma çatlaklarının oluşum bölgesi, dinamik yük formuna da bağlı olmak üzere, minimum film kalınlığının oluştuğu bölgede veya minimum film kalınlığının oluştuğu noktadan 10° kadar önceki bir bölgede de bulunabilmektedir. Yataklama alanı sabit olarak alınıp, değişik dinamik yük örneklerinde yatağa etki eden maksimum genlikli kuvvetteki ortalama yüzey basıncı göz önüne alındığında, ortalama basınçta %13,2'lik bir azalış yorulma ömründe 17 kat artışa, ortalama basınçta %20'lik bir azalış da yorulma ömründe 28 kat artışa, ortalama basınçta %54'lük bir azalış ise de yorulma ömründe 95 kat artışa neden olmaktadır. Bu da şunu göstermektedir, yatağa uygulanan yük (dolayısıyla oluşan basınç değerleri) azaldığında yorulma ömrü artmaktadır. Bu eğilim de, genel olarak makina elemanlarında ortaya çıkan yorulma karakteristiğine uygun bir değişim vermektedir. Nitekim bu durum diğer araştırmacılar [11,32,74,75] tarafından da belirlenmiştir.

Bu çalışmada, aynı dinamik yük örneğinde, aynı çalışma şartları altında, yataklama alanının (12X47,7)'ye göre %16,7'lik bir artışında yorulma ömründe 4 kat, (10X47,7)'ye göre %40'lık bir artışında da 8 kat yorulma ömrü artışı ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, hesaplanan yağ film basınçlarının maksimum değerleri açısından ele alındığında yataklama alanındaki %16,7'lik bir artış maksimum basınçta %24'lük bir azalış ortaya çıkarırken, yataklama alanındaki %40'lık bir artış maksimum basınçta %46,72'lik bir azalış ortaya çıkarmaktadır. Aynı dinamik yük altında yataklama alanının (yatak çapı sabit alınıp, yatak genişliği 10 mm, 12 mm ve 14 mm olarak değiştirilerek) arttırılmasıyla, yağ filminde ortaya çıkan maksimum basınç değerleri azalmakta, buna karşılık yorulma ömrü artmaktadır. Bu durumun daha önceki çalışmalarda [11,32,75] ortaya konulan sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan yataklarda yüzey yorulmasında en büyük etkiye yağ film basıncının sahip olduğu diğer araştırmacılar [17-19,23,74] tarafından da tespit edilmiştir.

Yatak zarflarının iki boyutlu sonlu elemanlarla analizinde, yağ filminde ortaya çıkan basınç dağılımları (Şekil 38) etkisinde, yatak yüzeyinde radyal gerilmeler (Şekil 40) basınç dağılımına uygun ve bası karakterli olarak ortaya çıkmakta, teğetsel gerilmeler (Şekil 39) ise, yağ filmi basınç dağılımının gradyanı büyük ayağın altında çeki karakterli gerilme değerleri, basınç alanı içerisinde ise bası karakterli gerilmeler olarak oluşmaktadır. Çeki karakterli teğetsel gerilmelerin büyüklüğü, yağ filmi basınç dağılımının maksimum değerinden daha çok basınç gradyanının eğik veya dik oluşuyla değişmektedir. Basınç gradyanı daha dik olan basınç dağılımında daha büyük teğetsel çeki gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Yağ film basınç dağılımında, basınç ayağının yatak yüzeyi boyunca çevresel olarak gittikçe azalan değerde olması halinde çeki karakterli teğetsel gerilme ortaya çıkmamaktadır. Diğer araştırmacılar [18,20-23,30] tarafından yatak zarfları üzerinde yapılan iki boyutlu sayısal çözümlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Her bir dinamik yükleme durumunda yatak zarfında ortaya çıkan yorulma bölgeleri göz önüne alındığında, yükün bir periyodu boyunca bu bölgeye etki eden teğetsel gerilmeler incelendiğinde, birbirini takip eden her bir krank açısında ortaya çıkan yağ film basınç dağılımlarının, ard arda çeki ve bası karakterli olarak değişen gerilmeler şeklinde yorulma bölgesine etki ettiği görülmektedir (Şekil 39). Bu nedenle çeki ve bası karakterli değişken teğetsel gerilmelerin yüzey yorulması üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Nitekim söz konusu bu durum diğer araştırmacılar [9,19,20,22,23,28,77] tarafından da belirlenmiştir.

Yatakta ortaya çıkan üç boyutlu, yani çevresel ve enine doğrultulardaki basınç dağılımı altında, yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan teğetsel gerilmeler, basınç alanı altında bası karakterli ve yatak ortasında maksimum değerine ulaşarak yatak kenarlarına doğru gittikçe azalan bir değişim göstermektedir. Yağ film basıncının dik gradyana sahip ayağın altında çeki karakterli teğetsel gerilmeler yine yatak ortasında maksimum değerde olup yatak kenarlarına doğru gittikçe azalma göstermektedirler. Basınç alanının dışında çevresel yönde çeki karakterli teğetsel gerilmeler gittikçe azalarak sıfır değerine düşmektedir. Daha önceki çalışmalarda da [18-20,22,23,30] benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yağ filmi basınç alanı altında, yatak zarfı kalınlığı boyunca hesaplanan teğetsel bası gerilmelerinin değerleri, zarf yüzeyinden teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalmaktadır. Teğetsel bası gerilmeleri, aynı zamanda enine yönde yatak kenarına doğru da azalma göstermektedirler. Yağ film basınç alanının bittiği yerden itibaren ortaya çıkan teğetsel çeki gerilmeleri teflon-bronz tabakasının zarf yüzeyinde aldığı değerden tabaka kalınlığı boyunca bir miktar azalma gösterip, daha sonra tabakanın bittiği teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde maksimum değerini almaktadır. Gerek zarf yüzeyinde gerekse birleşim yüzeyinde yatak ortasında, teğetsel çeki gerilmeleri en büyük değerlerini alırken, yatak kenarına doğru azalış göstermektedirler. Hacıfazlıoğlu'da [20-22], yaptığı çalışmalarda benzer sonuçları bulmuştur. Göz önüne alınan yağ film basıncının maksimum değerine teğetsel çeki gerilmelerinin yatak ortasındaki maksimum değerleri oranlandığında, zarf yüzeyinde $\frac{\sigma_{x \max}}{P_{\max}} = 0,03...0,036$ aralığında

değişirken, teflon-bronz tabakası çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde bu oran $\frac{\sigma_{x \max}}{P_{\max}} = 0,048...0,056$ değerlerini almaktadır. Teflon-bronz tabakasına etki eden teğetsel çeki gerilmeleri göz önüne alındığında, birleşim yüzeyinde oluşan gerilmeler daha büyük olduğundan yorulma olayının başlaması açısından en kritik kesit olarak birleşim yüzeyi göz önüne alınabilir. Nitekim Martin ve arkadaşları [30] da, yaptıkları çalışmalarda yatak alaşımındaki çeki karakterli en büyük gerilmelerin, alaşım yatak zarfı ortak yüzeyinde ortaya çıkabileceğini ve ilk yorulma çatlaklarının bu noktalarda başlayabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Üç boyutlu olarak göz önüne alınan yatak zarfına etki eden basınç dağılımı altında ortaya çıkan radyal gerilmeler, diğer araştırmacıların da [10,20] belirlediği gibi, zarf yüzeyinde bası gerilmesi olarak yağ film basıncı değerinde olup, basıncın tepe noktasına karşılık gelen zarf yüzeyinde maksimum olmakta ve zarf kalınlığı boyunca ve enine

doğrultuda gittikçe azalma göstermektedir. Yatak zarfına etki eden yağ film basıncının maksimum değerine radyal gerilme değeri oranlandığında, bası gerilmesi olarak bu oran, zarf yüzeyinde $\frac{\sigma_{y \max}}{P_{\max}} \cong 1$, birleşim yüzeyinde ise de ise $\frac{\sigma_{y \max}}{P_{\max}} = 0,94...0,974$ aralığında değişmektedir.

Her bir dinamik yük örneği için göz önüne alınan basınç dağılımı altında kalan yatak zarfında, teflon-bronz tabakası yüzeyinde bası karakterli eksenel gerilmeler, tabaka kalınlığı boyunca birleşim yüzeyine doğru gittikçe azalmaktadır. Bu durum diğer araştırmacılar [20-22] tarafından da benzer şekilde tespit edilmiştir. Yağ filmi basınç alanının bittiği yerden itibaren ortaya çıkan çeki karakterli eksenel gerilmeler, teflon-bronz tabakası kalınlığı boyunca önce az bir azalma gösterip, daha sonra artarak birleşim yüzeyinde maksimum değerine erişmektedir. Burada ortaya çıkan çeki karakterli eksenel gerilmelerin yağ filminin maksimum basınç değerine oranı göz önüne alındığında, bu oran tabaka yüzeyinde $\frac{\sigma_{z \max}}{P_{\max}} = 0,026...0,031$ aralığında değişirken, birleşim yüzeyinde ise $\frac{\sigma_{z \max}}{P_{\max}} = 0,057...0,067$ aralığında değişmektedir. Bu durum birleşim yüzeyinin gerilmeler açısından daha kritik olduğunu ve dolayısıyla yorulmanın bu bölgede oluşacağını göstermektedir.

Burada yapılan hesaplamalar sonucunda, bir yatak zarfına etki eden aynı basınç dağılımı altında, teflon-bronz tabakası yüzeyinde ortaya çıkan çeki karakterli teğetsel ve eksenel gerilmeler birlikte incelendiğinde, teğetsel gerilmelerin eksenel gerilmelerden biraz daha büyük olarak ortaya çıktığı ve teğetsel gerilmelerin eksenel gerilmelere oranı $\frac{\sigma_{x \max}}{\sigma_{z \max}} = 1...1,32$ aralığında değiştiği görülmektedir. Teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde ise tabaka yüzeyinden daha büyük çeki karakterli teğetsel ve eksenel gerilmeler ortaya çıkmaktadır. Burada eksenel gerilmeler teğetsel gerilmelerden daha büyük değerler almakta olup, bunların oranı, $\frac{\sigma_{z \max}}{\sigma_{x \max}} = 1,1...1,39$ aralığında

değişmektedir. Teflon-bronz tabakasının gerek yüzeyinde gerekse birleşim yüzeyinde ortaya çıkan çeki karakterli eksenel gerilmelerin, teğetsel gerilmelere yakın ve bazı durumlarda daha büyük değerlere sahip olması, teğetsel gerilmeler yanında eksenel gerilmelerin de yorulma olayında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle deneysel çalışmalardan elde edilen zarf yüzeyindeki yorulma çatlaklarının (Şekil 35) hem eksenel hem de çevresel yönde ortaya çıkması bu düşüncüyü doğrular niteliktedir. Teğetsel gerilmelerle

eksenel gerilmelerin birlikte göz önüne alınması halinde teflon-bronz tabakasının yüzeyinde ortaya çıkan değerlerden daha büyük gerilme değerlerinin birleşim yüzeyinde ortaya çıkması yorulma olayında ilk kılcal çatlakların bu birleşim yüzeyinde ortaya çıkmış olabileceğini göstermektedir.

Yağ filmindeki basınç dağılımı altında, yatak zarfı ortasında, yağ filmi basıncının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri daha büyük değerler alırken, eğimi daha düşük olan diğer basınç gradyanı altında ise daha küçük τ_{xy} kayma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır. Daha önce yapılan benzer sayısal çalışmalarda da [20-22], yağ filmi basıncının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmelerinin daha büyük değerler aldığı hesaplanmıştır. Teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yataklarda yapılan sonlu eleman çözümleri sonucunda, yatak ortasında zarf yüzeyinde oluşan pozitif ve negatif değerlikli kayma gerilmelerinin maksimum değerlerinin oranı, $\frac{\tau_{xy \max}}{\tau_{xy \min}} = 1,57...3,21$ arasında değişirken, birleşim yüzeyinde aynı yerde bu oran

$$\frac{\tau_{xy \max}}{\tau_{xy \min}} = 1,54...2,66 \text{ arasında değişmektedir. Zarfın aynı konumunda, ortaya çıkan}$$

maksimum kayma gerilmesi değerlerinin yağ filminin maksimum basınç değerine oranı, zarf yüzeyinde $\frac{\tau_{xy \max}}{P_{\max}} = 0,02...0,04$ arasında bulunurken, birleşim yüzeyinde bu oran

$$\frac{\tau_{xy \max}}{P_{\max}} = 0,1...0,17 \text{ arasında değişmektedir. Burada teflon-bronz tabakası yüzeyinden itibaren}$$

kalınlık boyunca kayma gerilmelerinin değeri artmakta, birleşim yüzeyinde ortaya çıkan kayma gerilmesi maksimum değerlerinin yüzeydeki kayma gerilmesi maksimum değerlerine

$$\text{oranı } \frac{\tau_{xy \max b}}{\tau_{xy \max y}} = 4,17...4,95 \text{ aralığında bulunmaktadır. Bu durum birleşim yüzeyinde } \tau_{xy}$$

kayma gerilmelerinin diğerlerinden daha büyük değerler aldığını göstermektedir. Teflon-bronz tabakasında ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmesinin dağılımı göz önüne alındığında, yorulmada etkin olan gerilmeler açısından, yatak zarfında en kritik yerin, teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyi olduğu ortaya çıkmaktadır. Nitekim bu bulgu önceki araştırmacılar [78-80] tarafından da benze şekilde elde edilmiştir.

Göz önüne alınan yağ filmi basınç dağılımları altında hesaplanan τ_{xz} ve τ_{yz} kayma gerilmeleri, yağ filmi basınç alanı altında kalan zarf kısmında pozitif ve negatif değerlikli olarak, yatak ortasında sahip olduğu minimum değerden yatak kenarına doğru maksimum

değere erişmektedirler. Bu kayma gerilmelerinin yatak ortasında ve birleşim yüzeyindeki değerlerinin aynı yerlerdeki τ_{xy} kayma gerilmesi değerlerine oranı sırasıyla, yüzeyde $\frac{\tau_{xz}}{\tau_{xy \max}} = 0,016...0,061$, $\frac{\tau_{yz}}{\tau_{xy \max}} = 0,003...0,004$ ve birleşim yüzeyinde ise $\frac{\tau_{xz}}{\tau_{xy \max}} = 0,02...0,042$, $\frac{\tau_{yz}}{\tau_{xy \max}} = 0,0036...0,005$ değerlerini almaktadırlar. Bu oran değerleri de, zarf ortasındaki τ_{xy} kayma gerilmesi değerleri yanında diğer kayma gerilmesi değerlerinin yorulma açısından göz ardı edilebilecek mertebede olduğunu göstermektedir.

Deney yataklarına uygulanan her bir dinamik yükte göz önüne alınan basınç dağılımı altında, yatak zarfının üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde elde edilen gerilmelerden von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilmelerin yatak zarfındaki dağılımları incelenmiştir. Burada teflon-bronz tabakası yüzeyinde, gerilme hipotezine göre hesaplanmış eşdeğer gerilmelerin maksimum değeri, yağ filminde oluşan maksimum basınç değerine oranı $\frac{\sigma_{eq \max}}{P_{\max}} = 0,42...0,44$ aralığında olmaktadır. Bu oran yağ film basıncı tepe noktasına karşılık gelen yatak ortasında ortaya çıkmaktadır. Daha önce yapılan iki boyutlu sayısal çözümlerde de [20,30], yağ film basıncı tepe noktasına karşılık gelen yerde maksimum von Mises eşdeğer gerilmenin ortaya çıktığı belirtilmiştir. Yüzeyden zarf kalınlığı yönünde inildikçe eşdeğer gerilme değerleri artış göstermekte ve birleşim yüzeyinde aynı noktada maksimum değere erişmektedir. Birleşim yüzeyinde ortaya çıkan eşdeğer gerilmelerin yağ film basıncının maksimum değerine oranı $\frac{\sigma_{eq \max}}{P_{\max}} = 0,55...0,61$ aralığında olmaktadır. Burada

birleşim yüzeyinde ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilme değerleri ile yüzeydeki maksimum eşdeğer gerilmeler oranlandığında, birleşim yüzeyindeki eşdeğer gerilmeler $\frac{\sigma_{eq \max b}}{\sigma_{eq \max y}} = 1,32...1,37$ kat daha büyük olmaktadır. Zarftaki eşdeğer gerilmelerin dağılımı incelendiğinde, zorlanma açısından en kritik yer teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakasının birleşim yüzeyinin yağ filmi tepe basıncına karşılık gelen nokta olduğu görülmektedir. Böylece yorulma açısından kılcal çatlakların bu noktadan başlamış olabileceği söylenebilir.

Yatak zarfına etki eden yağ filmi basıncı altında kalan zarf yüzeyinde maksimum değeri tepe basıncına karşılık gelen noktada olmak üzere, çevresel ve enine doğrultudaki radyal deformasyonların değişimi basınç alanı değişimi ile uyumlu olmaktadır. Radyal

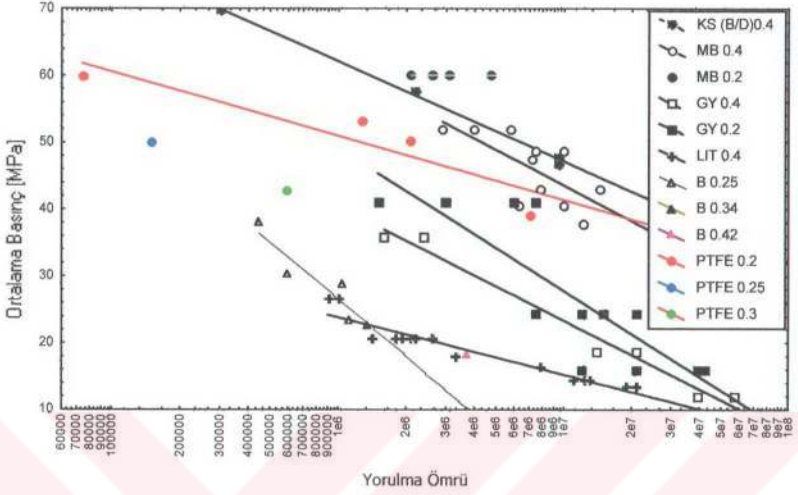
deformasyonlar basınç alanının bittiği yerden itibaren çevresel yönde zarf yüzeyinde çok az bir yükselme göstererek sona ermektedir. Yağ filmi basıncı altında oluşan eksenel deformasyonlar ise, zarfta enine doğrultuda ve daha küçük değerlerde ortaya çıkmaktadır. Sözü edilen durum ilgili literatürde de [20,22] belirtilmektedir. Zarfta oluşan radyal ve eksenel deformasyonlar, yağ film basıncının artan değeriyle daha büyük değerler almaktadır.

Elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda, gerek ortalama basınç değeri gerekse yorulma ömrü açısından değişik dinamik yükler altında teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yatakların, beyaz metal alaşımlı kaymalı yataklara göre, yorulma davranışı açısından, bir çok halde oldukça iyi bir yataklama performansı sergilediği belirlenmiştir. Nitekim Lang ve arkadaşları [12] tarafından beyaz metal yatak malzemeleri üzerinde sinüs formlu, titreşimli ve tam değişken yük ile çevresel dönen kuvvet (Ek Şekil 106) etkisinde yaptıkları deneylerin sonuçları toplu halde Şekil 182'de verilmektedir. Aynı grafikte Bıyıklıoğlu [32] tarafından değişik dinamik yükler altında yapılan beyaz metal alaşım tabakalı yataklara ait sonuçlar da verilmiştir.

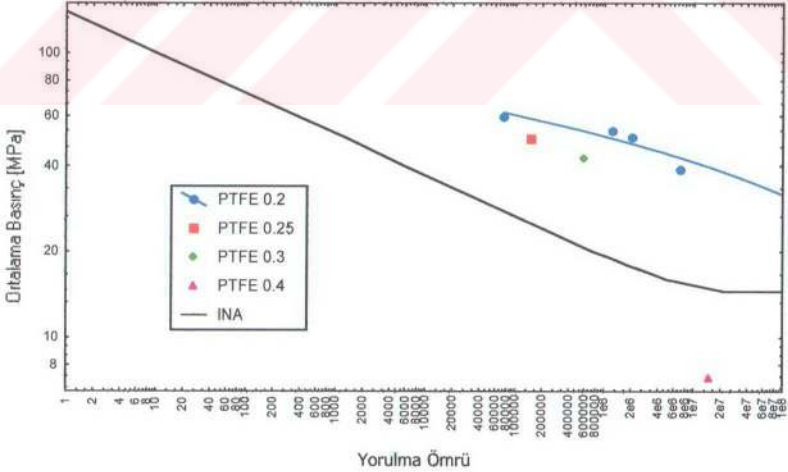
Hemen hemen aynı yüzey basıncında elde edilen yüzey yorulması deney sonuçları karşılaştırıldığında (Şekil 182), bu çalışmada deneye tabi tutulan teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yataklarda sırasıyla 53,04 MPa'da 1.264.800 yük tekrarı ve 50,28 MPa'da 2.083.200 yük tekrarı yüzey yorulması ortaya çıkarken, beyaz metal alaşımlı kaymalı yatakta sinüs formlu titreşimli yük altında 52 MPa'da 2.900.000 yük tekrarı ile 4.000.000 ve 5.800.000 yük tekrarlarında yüzey yorulması ortaya çıkmaktadır. Teflon-bronz tabakalı kaymalı yatakta 53,04 MPa ortalama basınçta 1.264.800 yük tekrarı ile yorulma elde edilirken, değişik dinamik yüklemeler altında beyaz metal alaşımlı yataklarda yapılmış deneylerde sırasıyla 41 MPa'da 1.500.000 yük tekrarı, 35,9 MPa'da 1.600.000 yük tekrarı, 22,67 MPa'da 1.340.000 yük tekrarı ve 20,6 MPa'da da 1.400.000 yük tekrarı yorulma oluşmaktadır. Grafikten açıkça görüleceği gibi, hemen hemen aynı yorulma ömrü civarında teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yatağın beyaz metal alaşımlı yatağa göre 2,5 kata kadar ortalama yüzey basıncıyla yüklenebildiği ortaya çıkmaktadır. Yine yaklaşık aynı yorulma ömrüne sahip değerler karşılaştırıldığında, teflon-bronz tabakalı kaymalı yatakta, çevresel etki eden V nolu dinamik yük altında 39,03 MPa ortalama basınçta 7.068.000 yük tekrarı yüzey yorulması ortaya çıkarken, beyaz metal alaşımlı yatakta çevresel dönen kuvvet altında 16,4 MPa ortalama basınçta 8.000.000 yük tekrarı yüzey yorulması ortaya çıkmaktadır. Beyaz metal alaşımlı yatak üzerinde yapılmış deneylerde verilen diğer

yükleme türleri altındaki değerler ise 48,8 MPa'da 7.400.000, 47,5 MPa'da 7.200.000, 43 MPa'da 7.800.000, 41 MPa'da 7.500.000, 24,4 MPa ortalama basınçta da 7.500.000 yük tekrarı şeklindedir. Tüm bu değerler ve grafikten de görüleceği üzere teflon-bronz tabakalı kaymalı yataklar, yorulma davranışı açısından, beyaz metal alaşımlı kaymalı yataklardan birçok halde oldukça iyi bir performansa sahip oldukları görülmektedir. Bunun nedeni ise teflon-bronz tabakalı kaymalı yatakların yapısında bulunan bronzun mukavemetinin beyaz metalin mukavemetinden daha yüksek olmasından kaynaklanabilir. Ayrıca teflon-bronz tabakalı kaymalı yatakların yüzeyinde bulunan plastik (PTFE) tabakanın büyük yükler altında rahatça çökmesi nedeniyle metal-metal temasının olmasını engellemesi de bu yatakların uzun ömürlü olmasının bir nedeni olabilir.

Üretici firma [36] tarafından verilen, özellikle karışık sürtünme bölgesinde çalışan teflon-bronz tabakalı kaymalı yataklarda müsaade edilebilen yüzey basıncı ile yük tekrar sayısı arasındaki değişim Şekil 183'de görülmektedir. Aynı grafik üzerinde hidrodinamik şartlarda dinamik yük altında yapılan deneylerden elde edilen yorulma ömürleri ile ortalama basınç değerleri de verilmektedir. Burada verilen her iki değişim eğrisinin birbiriyle uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu yataklar karışık sürtünme bölgesinde çalışırken uygulanan yükü taşıyan bölgenin alanı daha küçük olmaktadır. Hidrodinamik şartlarda çalışması durumunda ise mil ile yatak arasına yağ girdiğinden dolayı yük taşıyan alan artmaktadır. Bunun da yatağın yorulma ömrünün artmasına neden olduğu söylenebilir (Şekil 183).



Şekil 182. Çeşitli dinamik yükler altında, beyaz metal alaşımı ve teflon-bronz tabakalı kaymalı yatakların ortalama basınç ve yorulma ömrü değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 183. Üretici firma [36] tarafından verilen yorulma ömrü değerleri ile deneylerde belirlenen ömür değerlerinin karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

1. Yapılan tüm deneylerde yorulma çatlaklarının ana yük bölgesinde oluştuğu görülmüştür.
2. Mil merkezi yörüngeleri göz önüne alındığında, yorulma çatlaklarının oluşum bölgesi, dinamik yük formuna da bağlı olmak üzere, minimum film kalınlığının oluştuğu noktadan 10°-25° kadar önceki bir bölgede veya minimum film kalınlığının da içinde olduğu bölgede ortaya çıkmaktadır.
3. Aynı dinamik yük altında, aynı çalışma şartları altında, yataklama alanının artmasıyla yorulma ömrü de artmaktadır. Yataklama alanı %16,7 kadar artırıldığında yorulma ömründe 4 kat, %40 kadar artırıldığında ise 8 kat yorulma ömrü artışı ortaya çıkmaktadır.
4. Değişik dinamik yükler altında, yataklama alanı sabit olarak alınıp, maksimum kuvvete göre belirlenen ortalama yüzey basıncı göz önüne alındığında, ortalama basınçtaki %13,2'lik bir azalma yorulma ömründe 17 kat artış, ortalama basınçtaki %20'lik bir azalma yorulma ömründe 28 kat artış, ortalama basınçtaki %13,2'lik bir azalma ise yorulma ömründe 95 katlık artış ortaya çıkarmaktadır.
5. Hesaplanan yağ film basınçlarının maksimum değerleri de yataklama alanının artmasıyla azalmaktadır. Yataklama alanındaki %16,7'lik bir artışa karşılık maksimum basınçta %24'lük bir azalış ortaya çıkarken, yataklama alanındaki %40'lık bir artış maksimum basınçta %46,72'lik bir azalış ortaya çıkarmaktadır. Aynı çalışma şartları altında, yataklama alanının artırılmasıyla, yağ filminde ortaya çıkan maksimum basınç değerleri azalmakta, buna karşılık yorulma ömrü artmaktadır.
6. Sayısal olarak hesaplanan basınç dağılımlarının maksimum değerler aldığı bölge ile deneysel olarak elde edilen yüzey yorulması bölgeleri birbiriyle çakışmaktadır. Bu durum, yatakta yüzey yorulması oluşumunda yağ film basıncının en büyük etken olduğunu göstermektedir.
7. Teflon-bronz tabakalı plastik kaymalı yataklar üzerinde değişik dinamik yük örnekleri altında elde edilen yüzey yorulması ömürleri ve ortalama yüzey basıncı değerleri, beyaz metal alaşımlı kaymalı yataklardaki benzer değerlerle karşılaştırıldığında, yorulma davranışı açısından birçok halde oldukça iyi bir performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

8. Yapılan deneylerde uygulanan dinamik yükler altında, sonlu elemanlarla üç boyutlu olarak modellenen yatak zarfı yüzeyine etki eden yağ filmi basıncı altında, radyal, teğetsel ve eksenel gerilmeler baskı karakterli olarak ortaya çıkmakta, zarf kalınlığı yönünde gittikçe azalan değerler göstermektedir. Yağ filminde oluşan basınç alanının bittiği yerden itibaren teğetsel ve eksenel gerilmeler çeki karakterli olarak ortaya çıkmakta, teflon-bronz tabakası kalınlığı boyunca zarf yüzeyinde aldığı değerden önce bir miktar azalma gösterip, daha sonra tabakanın bittiği teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde maksimum değerlerini almaktadırlar. Her iki gerilmenin de maksimum değere eriştiği bu birleşim tabakasında yorulma çatlakları başlamaktadır.
9. Teğetsel çeki gerilmelerinin maksimum değerleri yatak zarfı yüzeyinde hesaplarda göz önüne alınan yağ film basınçlarının maksimum değerlerinin yaklaşık 0,033 katı değerlerinde meydana gelirken teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyinde yaklaşık olarak 0,052 katı değerlerinde oluşmaktadır. Burada yatak zarfı birleşim yüzeyinde ortaya çıkan teğetsel çeki gerilmeleri zarf yüzeyindeki teğetsel çeki gerilmelerden yaklaşık olarak 1,58 kat daha fazla olmaktadır.
10. Yapılan hesaplamalarda yatak zarfında ortaya çıkan çeki karakterli eksenel gerilmelerin maksimum değerleri zarf yüzeyinde yağ film basıncının maksimum değerlerinin yaklaşık 0,028 katı olur iken, birleşim yüzeyinde yaklaşık 0,062 katı değerlerinde meydana gelmektedirler. Eksenel çeki gerilmelerin birleşim yüzeyindeki değerleri, zarf yüzeyindeki değerlerinden yaklaşık olarak 2,17 kat daha fazla olmaktadır.
11. Yağ filminde oluşan değişik basınç dağılımları altında yapılan hesaplamalar sonucunda, aynı basınç dağılımı altında teflon-bronz tabakası yüzeyinde ortaya çıkan çeki karakterli teğetsel gerilmeler eksenel çeki gerilmelerden 1,16 kat daha fazla olmaktadır. Birleşim yüzeyinde ise, eksenel çeki gerilmeler teğetsel gerilmelerden 1,245 kat daha büyük değerler almaktadırlar. Teflon-bronz tabakasının gerek yüzeyinde gerekse birleşim yüzeyinde ortaya çıkan çeki karakterli eksenel gerilmelerin, teğetsel gerilmelere yakın ve bazı durumlarda daha büyük değerlere sahip olması, teğetsel gerilmeler yanında eksenel gerilmelerinde yorulma olayında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.
12. Üç boyutlu olarak modellenen yatak zarfına etki eden yağ filmi basıncı altında ortaya çıkan radyal gerilmeler zarf yüzeyinde baskı gerilmesi olarak yağ filmi basıncı değerinde

olup, maksimum değerini basıncın tepe noktasına karşılık gelen zarf yüzeyinde almakta, zarf kalınlığı boyunca ve enine yönde gittikçe azalma göstermektedir. Yatak zarfında ortaya çıkan radyal gerilme değerlerinin maksimum değerleri zarf yüzeyinde yağ filminde oluşan basıncının maksimum değerine eşit olur iken, birleşim yüzeyinde ise yaklaşık olarak 0,96 katı değerlerinde ortaya çıkmaktadır.

13. Yatak zarfına etkiyen yağ film basınç dağılımının ani düşüş gösterdiği basınç gradyanı altında ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmeleri, eğimi daha düşük olan diğer basınç gradyanı altındaki τ_{xy} kayma gerilmelerinden daha büyük değerler almaktadır. Yatak ortasında ortaya çıkan maksimum τ_{xy} kayma gerilmesi değerleri yağ filminin maksimum basınç değerlerinin yaklaşık 0,03 katı kadar olmaktadır. Birleşim yüzeyinde bu değer yaklaşık 0,14 olmaktadır. Burada yatak zarfı yüzeyinden itibaren kalınlık boyunca kayma gerilmelerinin değeri artmakta, birleşim yüzeyinde ortaya çıkan kayma gerilmesi maksimum değerleri yüzeydeki kayma gerilmesi maksimum değerlerinden yaklaşık 4,56 kat daha büyük olmaktadır. Yatak zarfında teflon-bronz tabakasında ortaya çıkan τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımları göz önüne alındığında, yorulma açısından en kritik yerin, teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyi olmaktadır.
14. Yatak zarfında ortaya çıkan τ_{xz} ve τ_{yz} kayma gerilmeleri çok küçük değerler olduğundan, τ_{xy} kayma gerilmeleri yanında göz ardı edilebilir büyüklüklerdir.
15. Her bir yatak zarfında hesaplanan gerilmelerden von Mises gerilme hipotezine göre hesaplanan eşdeğer gerilmelerin maksimum değerleri yatak ortasında, yağ filminde oluşan en büyük basınç değerinin etki ettiği yerde meydana gelmektedir. Yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan eşdeğer gerilmelerin maksimum değerleri, yağ film basıncının maksimum değerlerinin yaklaşık 0,43 katı değerinde meydana gelmektedir. Birleşim yüzeyinde hesaplanan eşdeğer gerilmeler ise yağ filmi basıncı maksimum değerinden yaklaşık olarak 0,58 kat fazla olmaktadır. Teflon-bronz tabakasının birleşim yüzeyinde ortaya çıkan maksimum eşdeğer gerilme değerlerin yatak zarfı yüzeydeki maksimum eşdeğer gerilme değerlerinden yaklaşık 1,345 kat daha büyük olarak meydana gelmektedirler. Yatak zarfında eşdeğer gerilme dağılımları incelendiğinde, zorlanma açısından en elverişsiz yer, yatak ortasında yağ filmi tepe basıncına karşılık gelen teflon-bronz tabakası ile çelik destek tabakası birleşim yüzeyi olmakta ve yorulma çatlakları bu noktadan başlamaktadır.

16. Yatak zarfına etki eden yağ filmi basıncı altında radyal deformasyonlar basınç ile uyumlu olarak ortaya çıkmakta ve basınç değerleri arttıkça çökme değerlerinde de artış meydana gelmektedir. Eksenel deformasyonlar yatak zarfında, yağ basıncı alanı altında, enine doğrultuda ve radyal deformasyon değerlerinden daha küçük değerlerde oluşmaktadırlar.

6. ÖNERİLER

- 1- Yüzey yorulması deneylerini daha büyük yatak genişliklerinde yapılarak, yağ filminde oluşan basınç dağılımlarının hem çevresel hemde enine yönde ölçülebilir.
- 2- Yağ filminde ölçülen gerçek basınç dağılımları ile gerilme analizleri yaparak, daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir.
- 3- Dinamik yük altında çalışan plastik kaymalı yatakta, mil yörüngesinin deneysel olarakta ölçülerek, teorik hesaplama ile karşılaştırma yapılabilir.
- 4- Her bir dinamik yük örneğinde, kademeli olarak yağın giriş sıcaklığı değiştirilerek, yorulma üzerinde sıcaklığın etkisi belirlenebilir.
- 5- Çevresel ve enine sıcaklık dağılımının yatak yüzeyi ve yatak sırtında ölçümleri yapılarak yatak zarfında oluşan gerilmeler üzerindeki etkisi belirlenebilir.
- 6- Teflon-bronz tabakası kalınlığı ile zarf kalınlığının değişiminin gerilmeler üzerindeki etkisinin belirlenerek, deneysel olarakta yorulma ömrüne olan etkileri incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Watanabe, K., Natsume, J., Hashizume, K., Ozasa, T., Noda, T., Masuda, Y., Theoretical Analysis of Bearing Performance of Microgrooved Bearing, JSAE Review, 21 (2000), 29-33.
2. Babalık, F. C., Makina Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Cilt 2, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2000.
3. Akkurt, M., Makina Elemanları, İkinci Cilt, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1982.
4. Dawson, D., Taylor, C. M., Cavitation in Bearings, Annual Review of Fluid Mechanics, 11 (1979), 35-66.
5. Gyde, N., Ermüdungsbrüche in Gleitlagern, MTZ, 31, 8 (1970), 352-354.
6. Garner, D. R., James, R. D., Warriner, J. F., Cavitation Erosion Damage in Engine Bearings: Theory and Practice, Jour. Engr. for Power, 102, 4 (1980), 847-857.
7. Lansdown, A. R., High Temperature Lubrication, Proc. Instn. Mech. Engrs., 204 (1990), 279-291.
8. Modern Tribology Handbook, Volume One: Principles of Tribology, Ed. Bhushan, B., CRC Pres LLC, New York, 2000.
9. Gyde, N., Fatigue Fractures in Babbitt Lined Journal Bearings, Lab. of Internal Combustion Engines, Technical University of Denmark, Copenhagen, 1969.
10. Bahai, H., Xu, H., Three-dimensional Elastoplastic Finite Element and Elastohydrodynamic Analyses of Journal Bearings, Proc. Instn. Mech. Engrs., 211, C (1997), 143-152.
11. Desaki, T., Kamiya, S., Development of a New Aluminum Alloy Bearing for Small-sized Diesel Engines, JSAE Review, 21 (2000), 143-147.
12. Lang, O. R., Broszeit, E., Katzenmeser, G., Gleitlager-Ermüdungsversuche und Früherkennung Mittels Isotopen, Forschungsberichte, heft 171, der FVV, (1975).
13. Hirano, F., Goto, S., Fatigue Cracks of Bearing Metals Caused by Reciprocating Rubbing, Proc. Instn. Mech. Engrs., 181, 30 (1967), 31-40.

14. Blundell, J. K., Fatigue Initiation in Thin-Wall Journal Bearings, ASLE/ASME Lubrication Conf., ASLE 78-LC-6B-1, Oct. 24-26 Minneapolis, 1978, 1-8.
15. Forrester, P. G., Chalmers, B., Fatigue Testing of Bearing Alloys, Engineering, (1945), 41-43.
16. Bozacı, A., Dinamik Yüklü Radyal Kaymalı Yataklarda Sıcaklık Dağılımı ve Yüzey Yorulması, Doçentlik Tezi, K.T.Ü., Trabzon, 1979.
17. Heisel, U., Mesungen am Instationär Belasteten Radialgleitlager, Diss., Karlsruhe, 1977.
18. Lang, O. R., Surface Fatigue of Plain Bearings, Wear, 43 (1977), 25-30.
19. Harbordt, J., Spannungen und Materialermüdung in Mehrschichtigen Schalen von Gleitlagern, VDI-Z, 118, 22 (1976), 1067-1070.
20. Hacıfazlıoğlu, Ş., Kaymalı Yataklarda Elastik Gerilme Analizi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1992.
21. Hacıfazlıoğlu, Ş., Karadeniz, S., Kaymalı Yataklarda Elastik Gerilme Analizi, 5. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 16-18 Eylül 1990, Ankara, Bildiriler Kitabı, 389-400.
22. Hacıfazlıoğlu, Ş., Karadeniz, S., A Parametric Study of Stress Sources in Journal Bearings, Int. J. Mech. Sci., 38, 8-9 (1996), 1001-1015.
23. Harbordt, J., Beitrag zur Theoretischen Ermittlung der Spannungen in den Schalen von Gleitlagern, Diss., Karlsruhe, 1975.
24. Hilgers, W., Erkennung der Ursachen von Schäden an Dickwandigen Verbundlagern, Schmieretechnik+Tribologie, 25.Jahrgang.3 (1978), 124-130.
25. Lang, O. R., Zur Lagerverformung und Temperaturverteilung in Dynamisch Belasteten Motorengleitlagern, Schmieretechnik+Tribologie, 25.Jahrgang.3 (1978), 75-77.
26. İbrahim, S. M., McCallion, H., Elastic Distortion of Journal Bearing Housing, Proc. Instn. Mech. Engrs., 182, 3N (1968), 183-191.
27. Metals Handbook, Edited by Timohy, L. G., Hovard, E. B., Desk Edition, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, USA, 1985.

28. Pike, R., Finkin, E. F., Bimetal Bearings: An Approach to Improved Performance at Lower Cost, ASME Paper No. 73-DE-31, (1973), 1-11.
29. İbrahim, S. M., McCallion, H., Stresses in Oil Lubricated Bearings, Proc. Instn. Mech. Engrs., 184, 1 (1970), 69-78.
30. Martin, F. A., Garner, D. R., Adams, D.R., Hydrodynamic Aspects of Fatigue in Plain Journal Bearings, ASME Trans., 103 (1981), 150-156.
31. Hills, D. A., Sackfield, A., An Analysis of the Required Strength of Journal Bearings Materials, Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Sep. 6-9, 1983, Paper VII (iii), 202-205.
32. Brykloğlu, A., Dinamik Yüklü Radyal Kaymalı Yataklarda Yüzey Yorulması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1986.
33. Rao, B. V., Zahiri, D. P., Failure of Sleeve Bearing of An Aeroengine, Prakt. Metalogr., 23, 9 (1986), 458-464.
34. Thompson, F. C., Kenneford, A. S., Seager, G. C., The Tensile Stresses in a Bearing Metal Cast on to a Strip and The Fatigue Failure of Bearings, Engineering, (1938), 235-236.
35. Akkurt, S., Plastik Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1991.
36. INA Wälzlager Schaeffler KG, Permaglide Plain Bearings-Catalogue 703, Nuremberg, Germany, 1991.
37. The Glacier Metal Co. Ltd., Glacier Industrial Bearings, DU Plain Bearings-Introductory Brochure SP 514/8/94, United Kingdom, 1990.
38. Jones, M., PTFE Plain Bearings, Industrial Lubrication and Tribology, 48, 6 (1996), 10-12.
39. Yamaguchi, Y., Tribology of Plastic Materials, Elsevier, Tokyo, 1990.
40. Lang, O. R., Steinhilper, W., Gleitlager, Springer Verlag, Berlin 1978.
41. Lancaster, J. K., Dry Bearings: A Survey of Materials and Factors Affecting Their Performance, Tribology, 6, 6 (1973), 219-252.

42. Evans, D. C. and Senior, G. S., Self - Lubrication Materials for Plain Bearings, Tribology International, October (1982), 243-248.
43. Bahadur, S. and Tabor, D., The Wear of Filled Polytetrafluoroethylene, Wear, 98 (1984), 1-13.
44. Gong, D., Zhang, B., Xue, Q. and Wang, H., Investigation of Adhesion Wear of Filled PTFE by Esca, Aes and Xrd, Wear, 137 (1990), 25-39.
45. Bahadur, S., Gong, D., The Action of Fillers in the Modification of the Tribological of Polymers, Wear, 158 (1992), 41-59.
46. Jisheng, E. and Gawne, D. T., Tribological Performance of Bronze - Filled PTFE Facings for Machine Tool Slideways, Wear, 176 (1994), 195-205.
47. Akkurt, S., Poliasetalin Kuru ve Su ile Yağlama Koşullarında Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Bakımından İncelenmesi, 4. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Eylül 1990, Ankara, Bildiriler Kitabı, 585-593.
48. Tewari, U. S., Sharma, K. and Vasudevan, P., Polymer Tribology, JMS - REV. Macromol. Chem. Phys., C29(1) (1989), 1-38.
49. Lancaster, J. K., Accelerated Wear Testing of PTFE Composite Bearing Materials, Tribology International, April (1979), 65-75.
50. Lancaster, J. K., Bramham, R. W., Play, D. and Wagborne, R., Effects of Amplitude of Oscillation on the Wear of Dry Bearings Containing PTFE, Journal of Lubrication Technology, 104 (1982), 559-567.
51. Play, D. F. and Pruvost, B., Comparative Dry Wear of PTFE Liner Bearing in Cylindrical and Spherical Geometry, Journal of Tribology, 106 (1984), 185-193.
52. Rymuza, Z., The Lubrication of Miniature Polymeric Systems - a Review, ASLE Transactions, 30, 4 (1987), 520-525.
53. Artamonov, V. N. and Drozdov Y. N., Tribological Characteristics of Spherical Rocker Sliding Bearings with a Self - Lubricating Coating Based on a Fabric, Soviet Engineering Research, 7, 4 (1987), 5-9.
54. Levin, A. L., Assessing the Efficiency of Polymer Bearings, Soviet Engineering Research, 7, 11 (1987), 18- 21.

55. Rymuza, Z. and Kowalski, P., The Contact Pressure Distribution in the Friction Region of Miniature Journal Bearings, Wear, 116 (1987), 89-106.
56. Rymuza, Z., Designing Miniature Plastic Bearings, Journal of Tribology, 112 (1990), 135-140.
57. Thorp, J. M., Friction of Some Commerical Polymer - Based Bearing Materials Against Steel, Tribology International, April (1992), 69-74.
58. Zhang, Z. Z., Xue, Q. J., Liu, W. M. and Shen, W. C., Friction and Wear Properties of Metal Powder Filled PTFE Composites Under Oil Lubricated Conditions, Wear, 210 (1997), 151-156.
59. Zhang, Z. Z., Xue, Q. J., Liu, W. M. and Shen, W. C., Tribological Properties of Metal - Plastic Multilayer Composites Under Oil Lubricated Conditions, Wear, 210 (1997), 195-203.
60. Tevrüz, T., Tribological Behaviours of Carbon Filled PTFE Dry Journal Bearings, Wear, 221 (1998), 61-68.
61. Tevrüz, T., Tribological Behaviours of Bronze-Filled PTFE Dry Journal Bearings, Wear, 230 (1999), 61-69.
62. Brewe, D. E., Elasticity Effects on Cavitation in a Squeeze Film Damper Undergoing Non-Centered Circular Whirl, Wear, 130 (1989), 69-80.
63. Wilson, B., Glacier Plain Bearings: A Materials and Production Engineering Success Story, Industrial Lubrication and Tribology, 48, 5 (1996), 7-13.
64. INA Wälzlager Schaeffler KG, Permaglide Plain Bearings-Catalogue 705, Heilsbronn, Germany, 1999.
65. ANSYS, User's Manual, DN-R300:50-1, Houston, 1992.
66. Jones, R. M., Mechanics of Composite Materials, International Student Edition, Scripta Book Company, Washington D.C., 1975.
67. Goenka, P.K., Dynamically Loaded Journal Bearings: Finite Element Metod Analysis, Journal of Tribology, 106 (1984), 429-439.

68. McIvor, J. D. C., Fenner, D. N., An Evaluation of Eight-Node Quadrilateral Finite Elements for the Analysis of a dynamically Loaded Hydrodynamic Journal Bearing, Proc. Instn. Mech. Engrs., 202, C2 (1988), 95-101.
69. Kumar, A., Booker, J. F., Goenka, P. K., Dynamically Loaded Journal Bearings: A Model Approach to EHL Design Analysis, Tribology Series 14: Tribological Design of Machine Elements, Ed. Dowson, D., Taylor, C. M., Godet, M., Berthe, D., Elsevier, Amsterdam, 1989, 305-315.
70. Paranjpe, R. S., Han, T., A Transient Thermohydrodynamic Analysis Including Mass Conserving Cavitation for Dynamically Loaded Journal Bearings, Journal of Tribology, 117 (1995), 369-378.
71. Schaffrath, G., Das Gleitlager Mit Beliebiger Schmierspaltform-Verlagerung Des Wellenzapfens Bei Zeitlich Veranderlicher Belastung, Dissertation Universitat Fridericiana, Karlsruhe, 1967.
72. Harbordt, J., Klumpp, R., Computr-Programm zur Berechnung der Verlagerungsbahn, der Örtlichen Drücke und des Tatsächlichen Schmierspalts in Gleitlagern mit Beliebiger Geometrie unter Statischer und dynamischer Last, Forschungsberichte, heft 137, der FVV, (1972).
73. Ricardo Software, Journal Bearing Analysis-Orbit, Documentation/User Manual Version 1.2, IL, USA, 2000.
74. Okamoto, Y., Kitahara, K., Ushijima, K., Aoyama, S., Xu, H., Jones, G. J., A Study for Wear and Fatigue on Engine Bearings by Using EHL Analysis, JSAE Review, 21 (2000), 189-196.
75. Bıyıkhoğlu, A., Dinamik Yüklü Kaymalı Yatak Yüzeylerinde Yorulma Çatlaklarının Başlaması ve Gelişmesi, 3. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 21-23 Eylül 1988, Ankara, Bildiriler Kitabı, 467-478.
76. Vijayaraghavan, D., Brewster, D. E., Frequency Effects on the Journal Bearing for Periodic Loading, Journal of Tribology, 114 (1992), 107-115.
77. Mass, H., Ideas and Hypothese on Plain-Bearing Failures, ASME Paper No. 77-DGP-13, (1977), 1-24.
78. Metals Handbook, vol 10, Failure Analysis and Presentation, 8th. Edition, ASM Handbook Committee, American Society for Metals, USA, 1975.

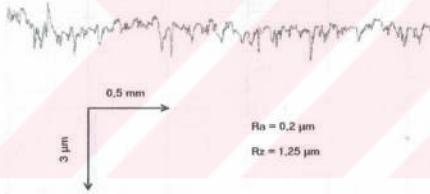
79. Hamer, J. C., Lubrecht, A. A., Ioannides, E., Sayles, R. S., Surface Damage on Rolling Elements and its Subsequent Effects on Performance and Life, Tribology Series 14: Tribological Design of Machine Elements, Ed. Dowson, D., Taylor, C. M., Godet, M., Berthe, D., Elsevier, Amsterdam, 1989, 189-197.
80. Hiraoka, N., Wear Life Mechanism of Journal Bearings with Bonded MoS₂ Film Lubricants in Air and Vacuum, Wear, 249 (2002), 1014-1020.

8. EKLER

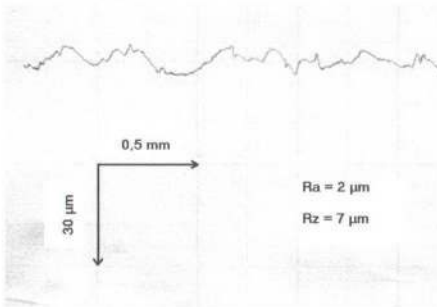
Ek-1. Kaymalı yatakların konstrüksiyon bilgileri

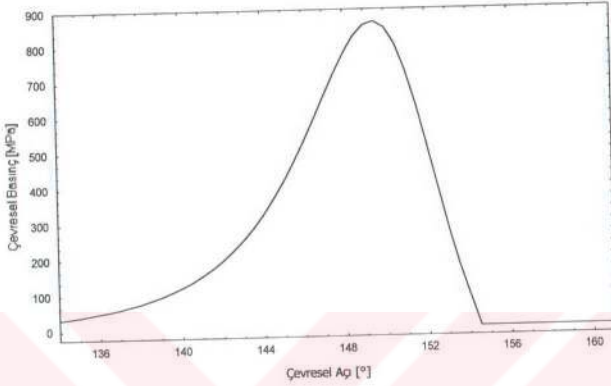
Kullanılan yağ	: Shell Tellus 27
Viskozite (50°'de)	: 20,03 cP
Milin dönme hızı	: 1240 d/dak
Yük frekansı	: 1240 d/dak
Yatak çapı	: 47,775 mm
Mil çapı	: 47,700 mm
Radyal boşluk	: 0,0375 mm
Milin yüzey sertliği	: 52 RSD-C

Mil yüzey profili

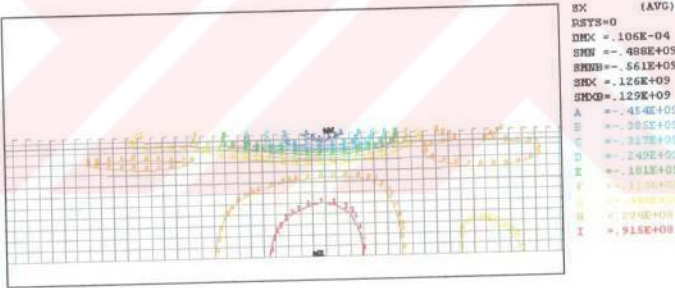


Yatak yüzey profili



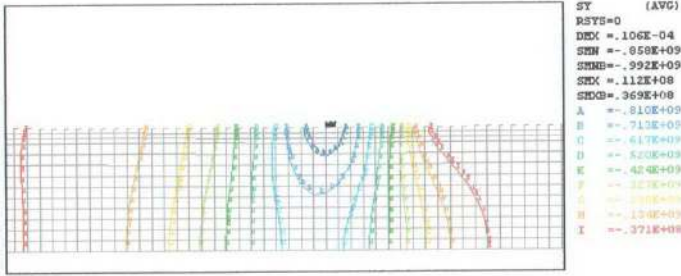


a-Çevresel basınç dağılımı ($P_{\max}=866$ MPa)

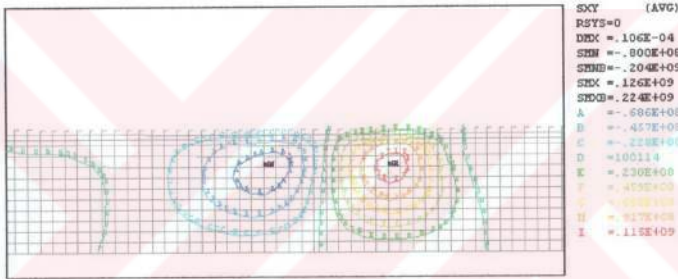


b- Eş teğetsel gerilme eğrileri

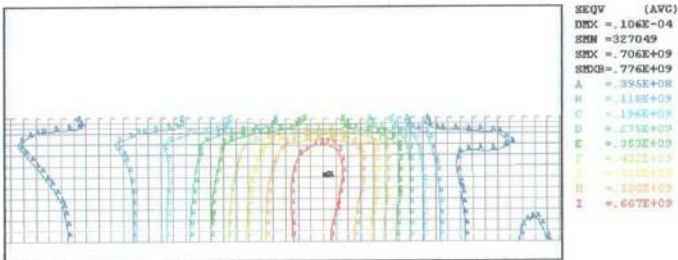
Ek Şekil 1. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri



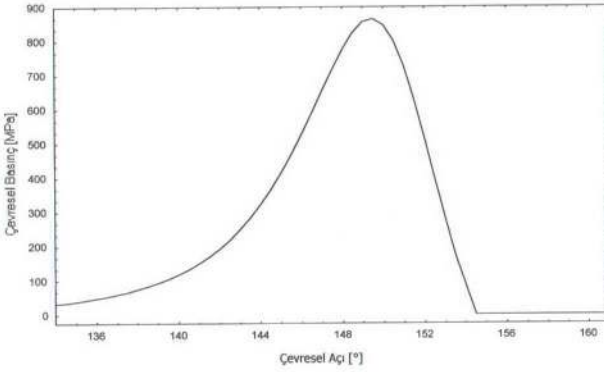
Ek Şekil 2. II nolu yükte 282°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş radyal gerilme eğrileri



Ek Şekil 3. II nolu yükte 282°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri



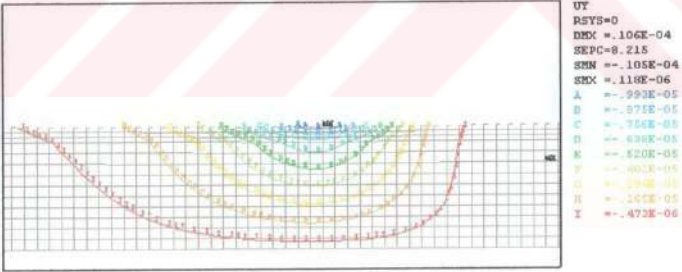
Ek Şekil 4. II nolu yükte 282°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatakta hesaplanan von Mises eş gerilme eğrileri



a- Çevresel basınç dağılımı

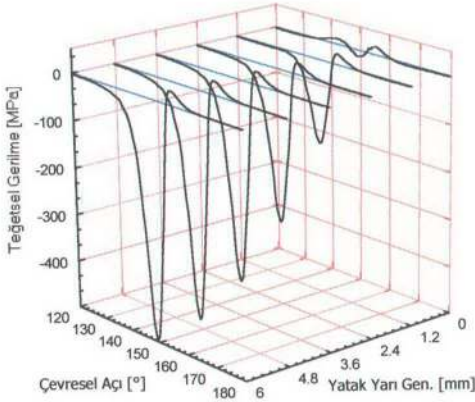


b- Yatak zarf yüzeyinde oluşan radyal deformasyon

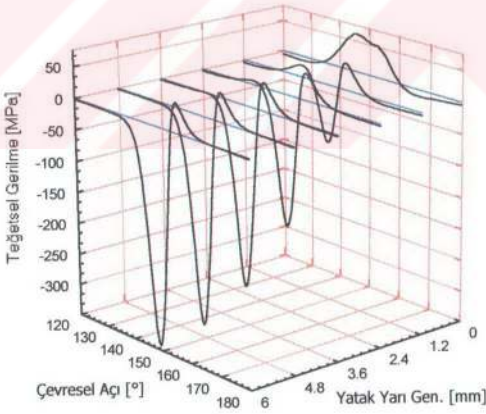


c- Yatak zarf kesitinde oluşan radyal eş deformasyon eğrileri

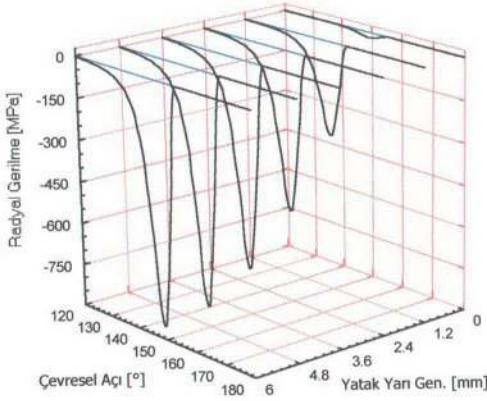
Ek Şekil 5. II nolu yükte 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal deformasyonlar



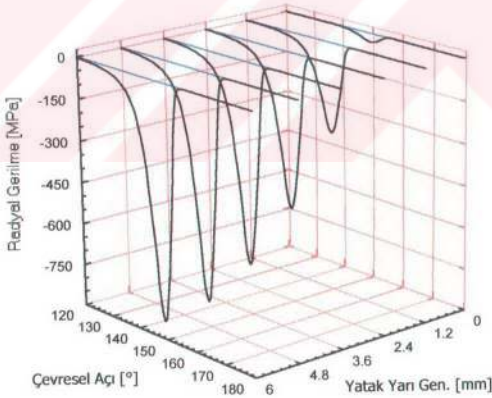
Ek Şekil 6. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler



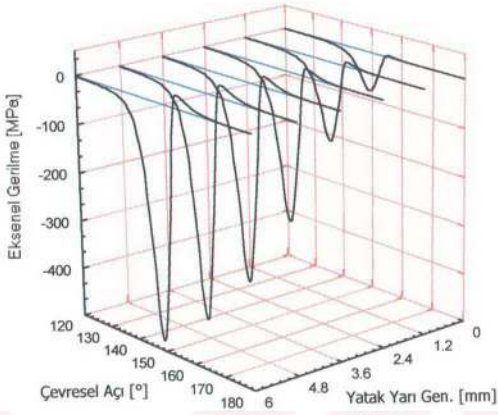
Ek Şekil 7. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler



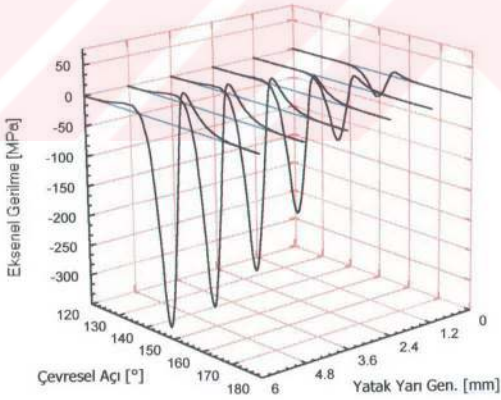
Ek Şekil 8. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler



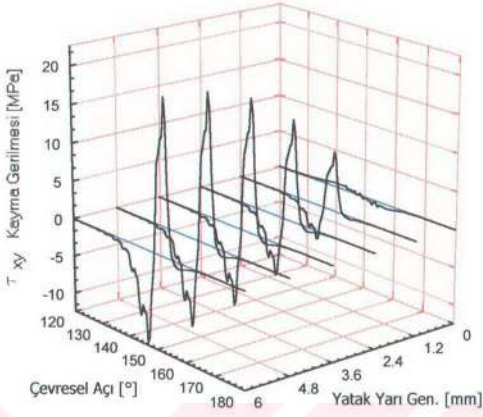
Ek Şekil 9. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler



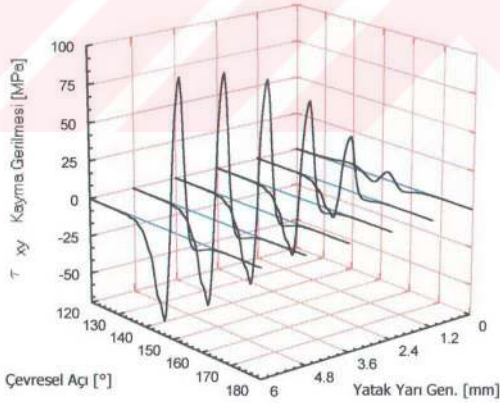
Ek Şekil 10. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler



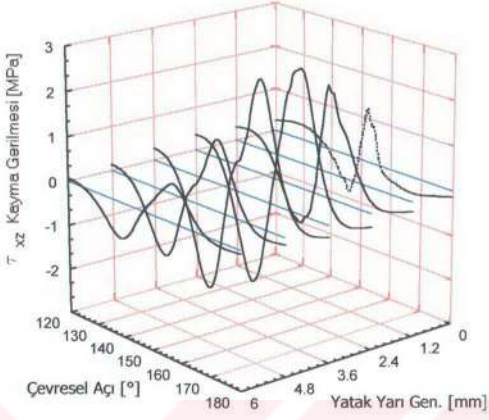
Ek Şekil 11. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler



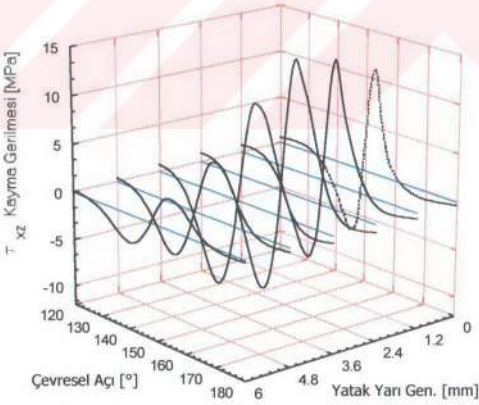
Ek Şekil 12. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



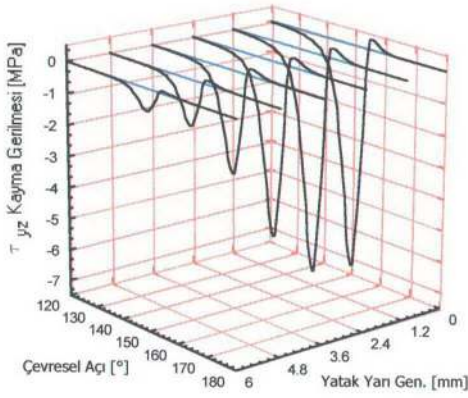
Ek Şekil 13. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



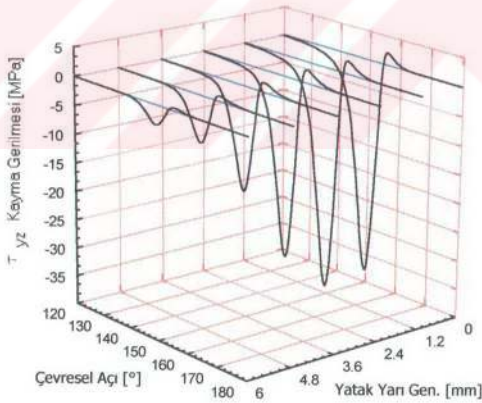
Ek Şekil 14. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



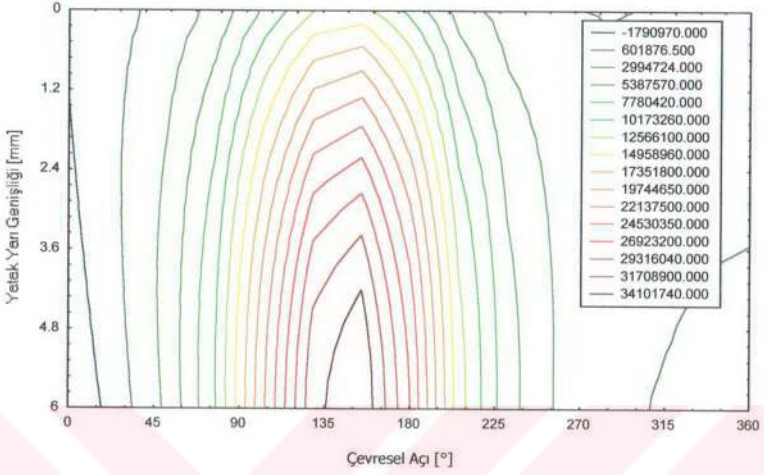
Ek Şekil 15. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



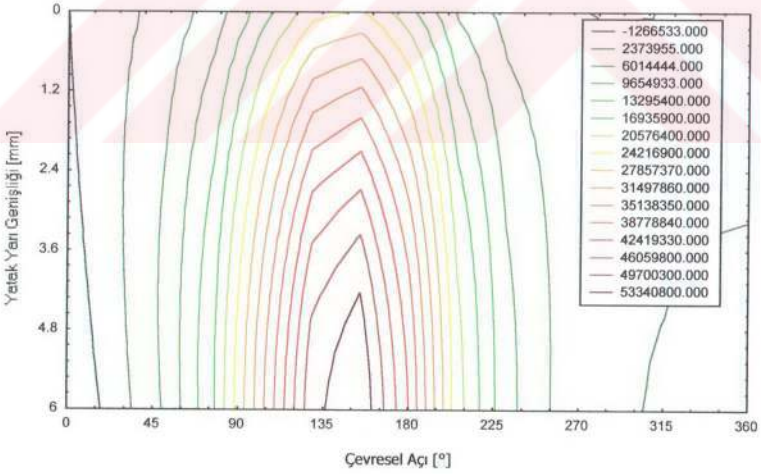
Ek Şekil 16. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



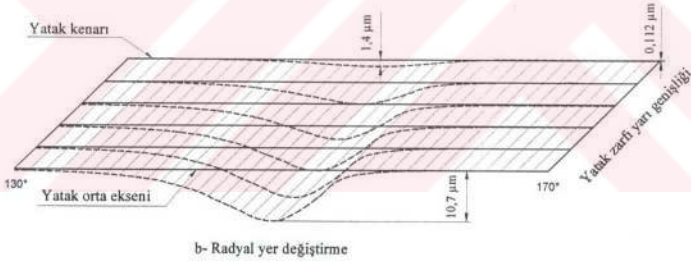
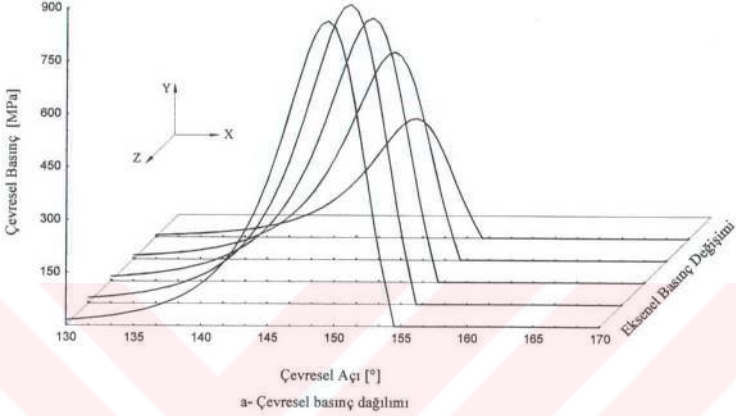
Ek Şekil 17. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



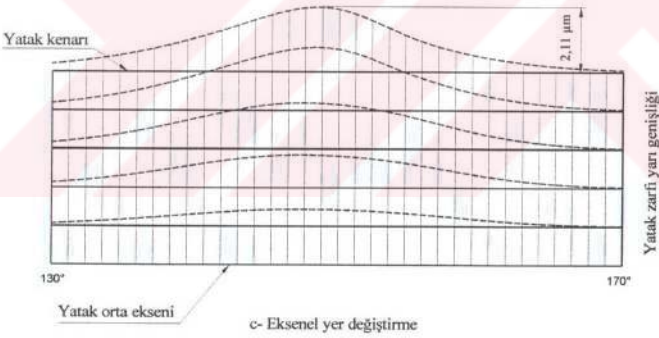
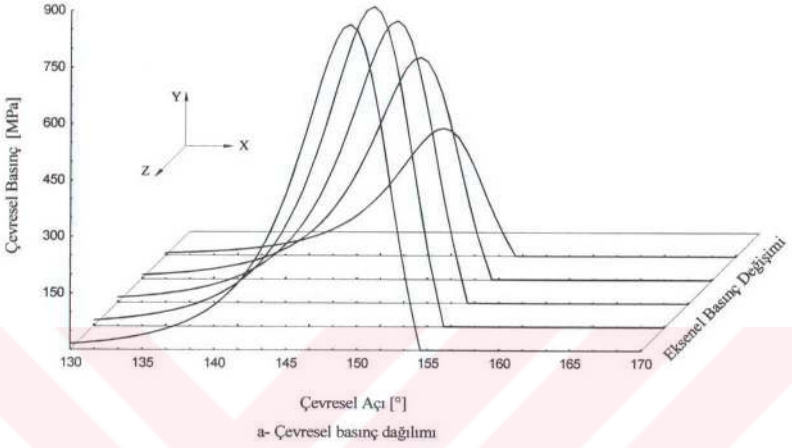
Ek Şekil 18. II nolu yükte 282° krank açısında oluşan basınç etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



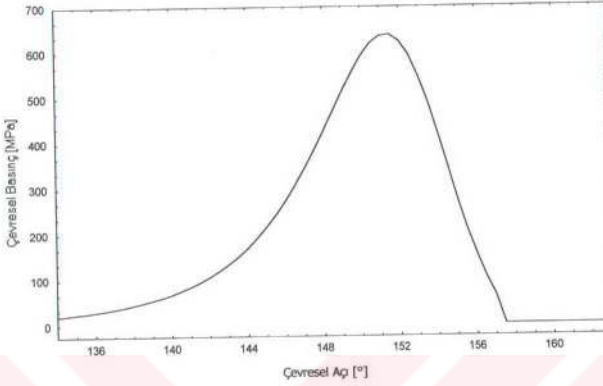
Ek Şekil 19. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



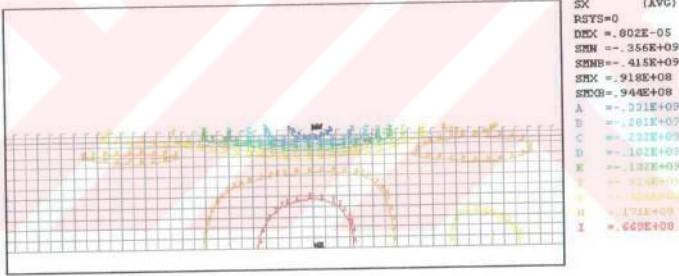
Ek Şekil 20. II nolu yük altında 282° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar



Ek Şekil 21. II nolu yük altında 282°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 12 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar

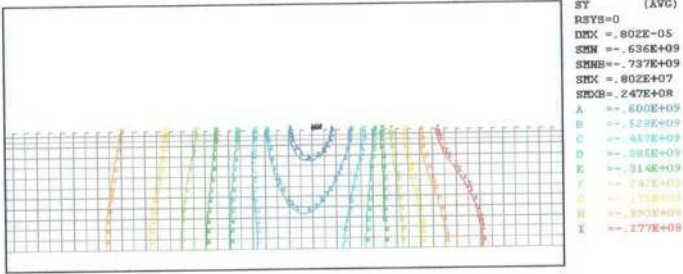


a-Çevresel basınç dağılımı ($P_{\max}=638$ MPa)

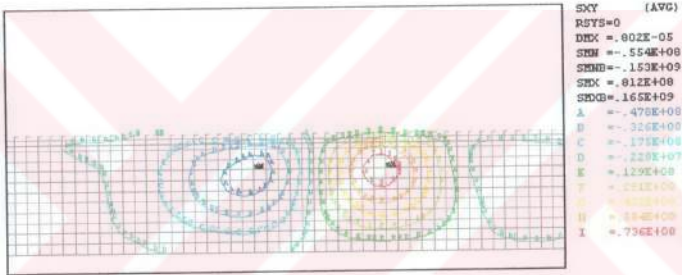


b- Eş teğetsel gerilme eğrileri

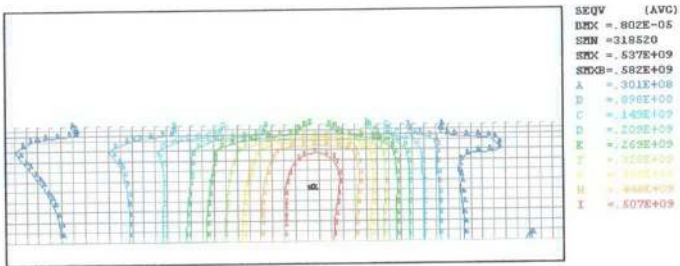
Ek Şekil 22. II nolu yükte 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri



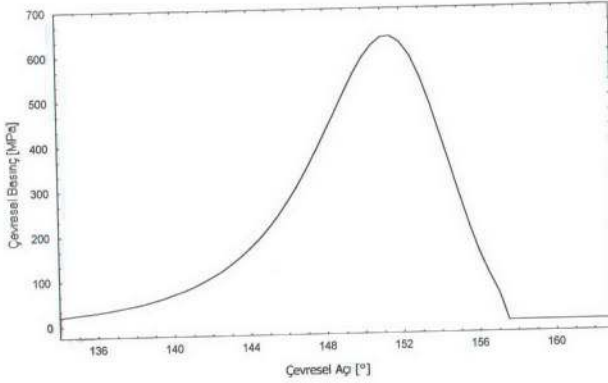
Ek Şekil 23. II nolu yükte 283°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş radyal gerilme eğrileri



Ek Şekil 24. II nolu yükte 283°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri



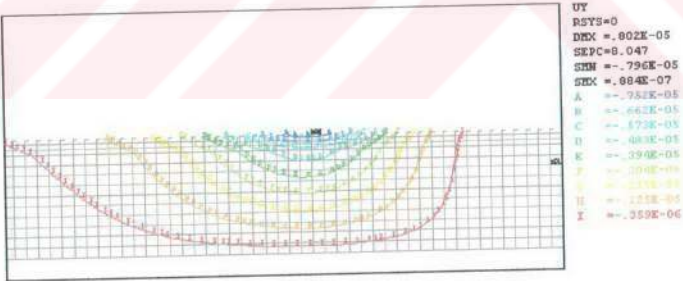
Ek Şekil 25. II nolu yükte 283°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatakta hesaplanan von Mises eş gerilme eğrileri



a- Çevresel basınç dağılımı

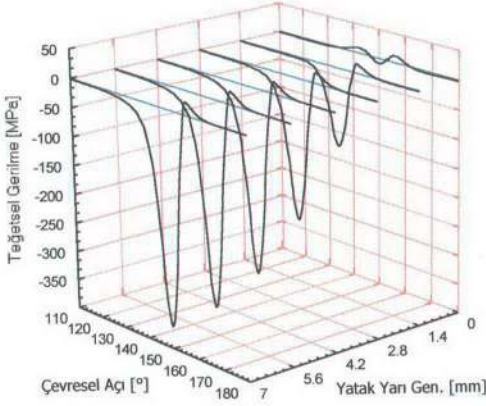


b- Yatak zarf yüzeyinde oluşan radyal deformasyon

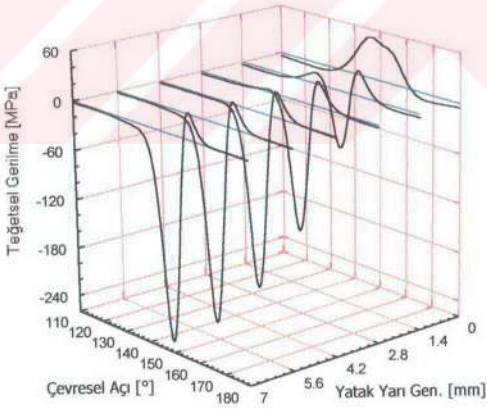


c- Yatak zarf kesitinde oluşan radyal eş deformasyon eğrileri

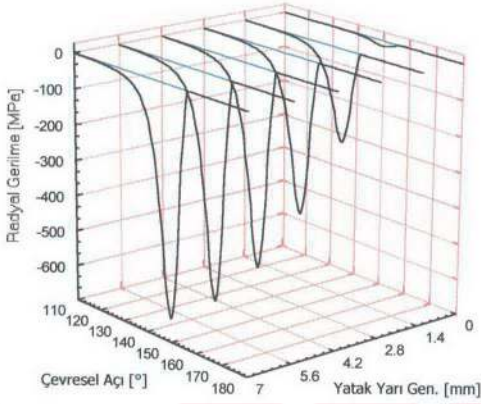
Ek Şekil 26. II nolu yükte 283°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfında oluşan radyal deformasyonlar



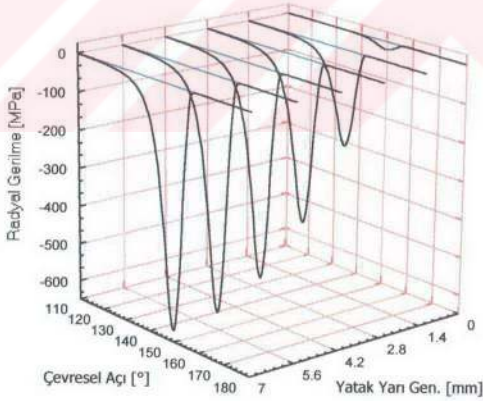
Ek Şekil 27. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler



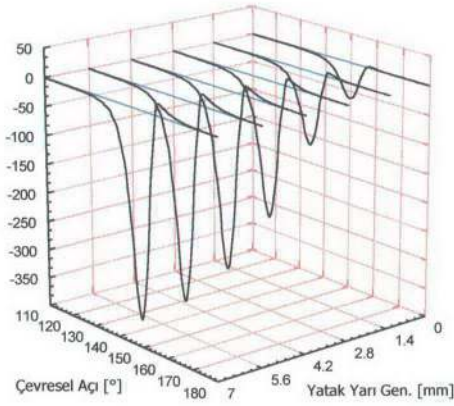
Ek Şekil 28. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler



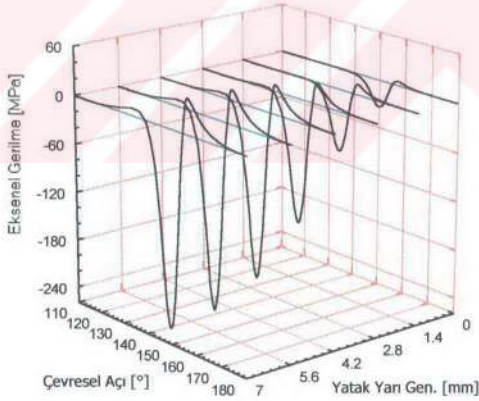
Ek Şekil 29. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler



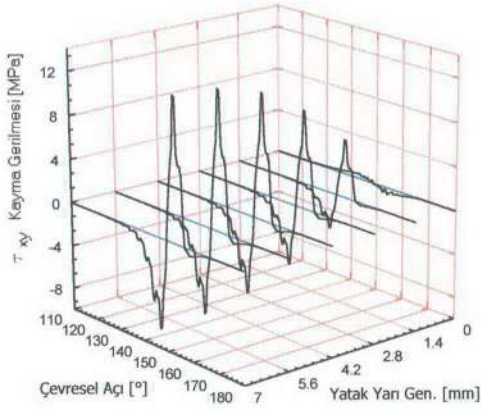
Ek Şekil 30. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki tabakada oluşan radyal gerilmeler



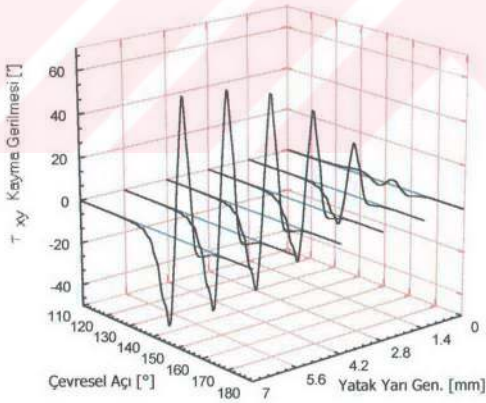
Ek Şekil 31. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan aksel gerilmeler



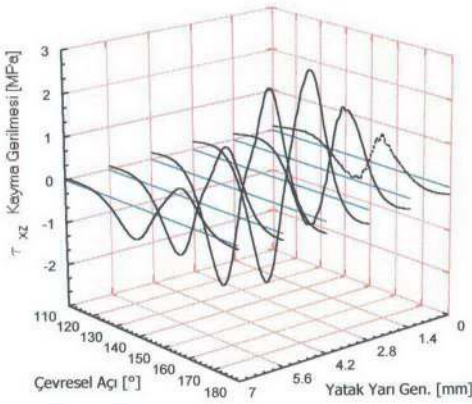
Ek Şekil 32. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki tabakada oluşan aksel gerilmeler



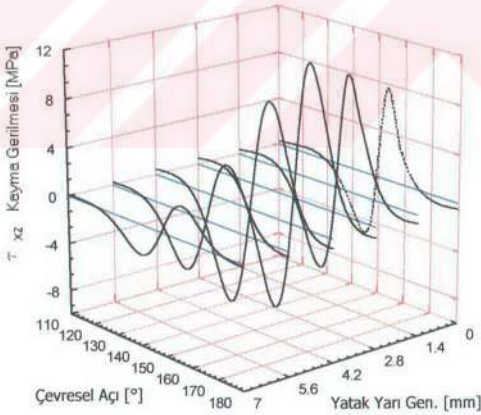
Ek Şekil 33. II. nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



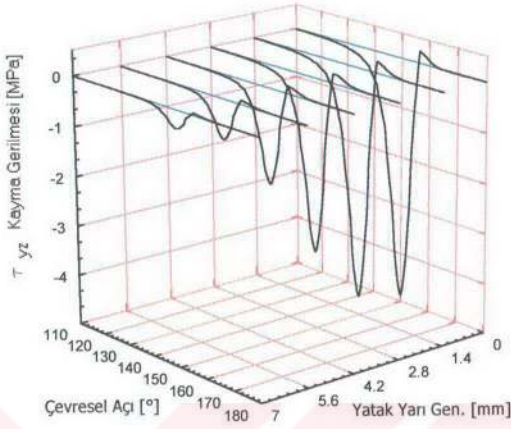
Ek Şekil 34. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



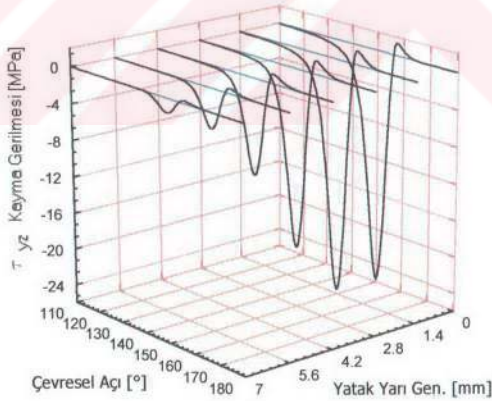
Ek Şekil 35. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



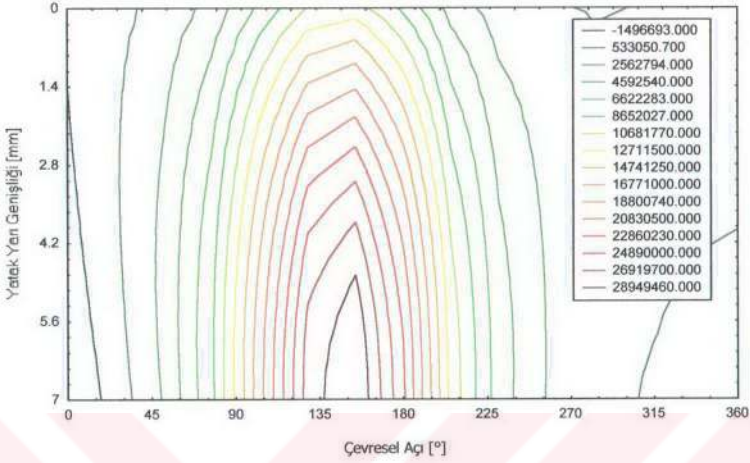
Ek Şekil 36. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



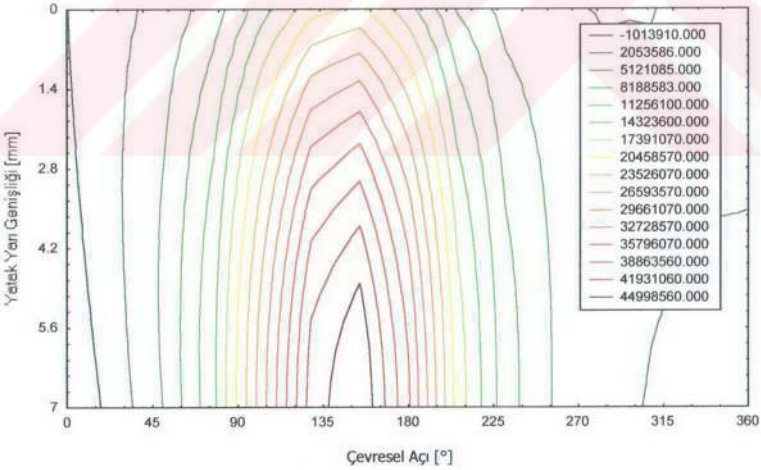
Ek Şekil 37. II. nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



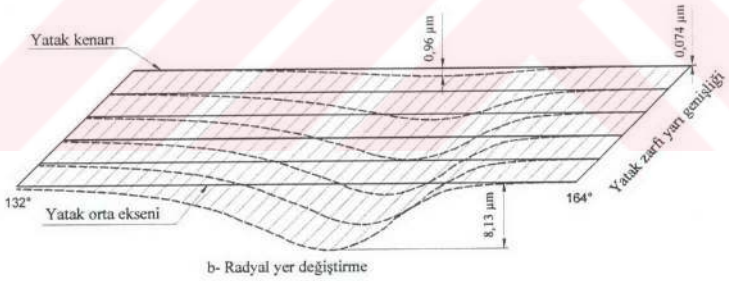
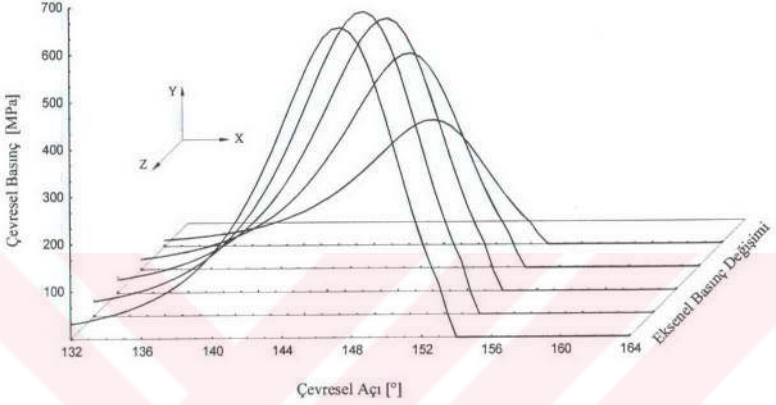
Ek Şekil 38. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



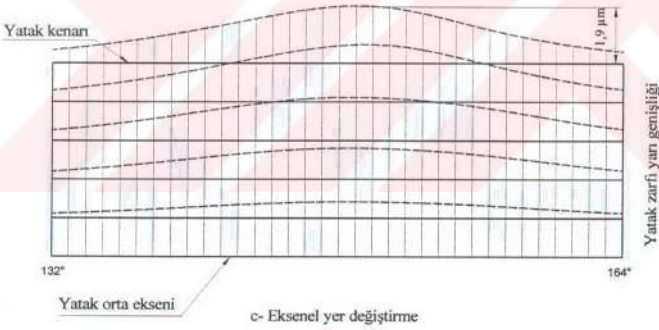
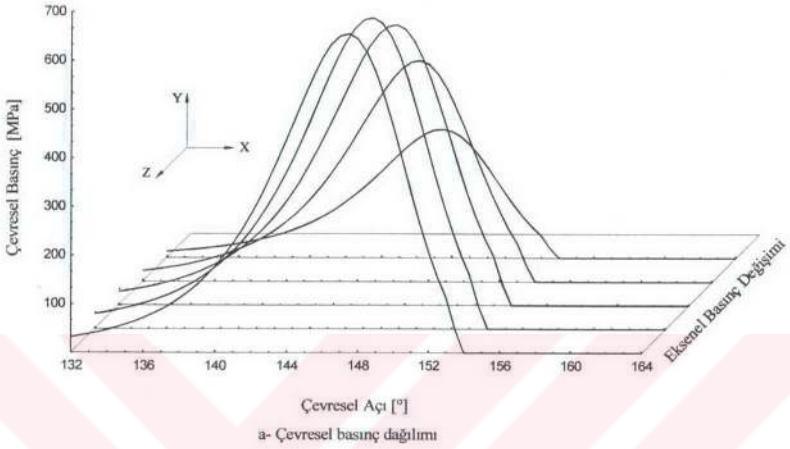
Ek Şekil 39. II nolu yükte 283° krank açısında oluşan basınç etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



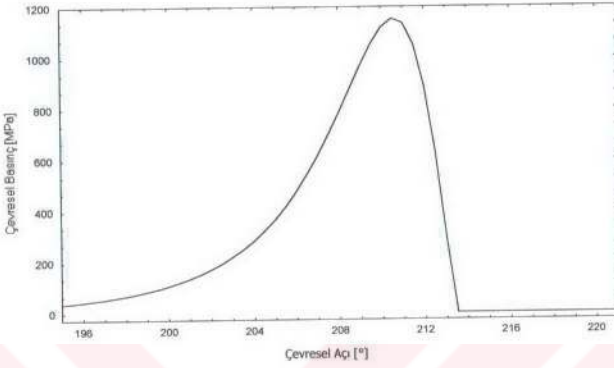
Ek Şekil 40. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



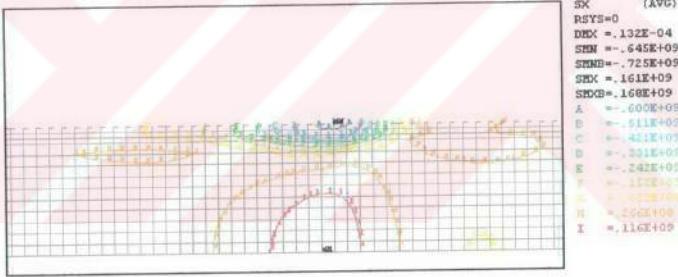
Ek Şekil 41. II nolu yük altında 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar



Ek Şekil 42. II nolu yük altında 283° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde 14 mm genişliğindeki yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar

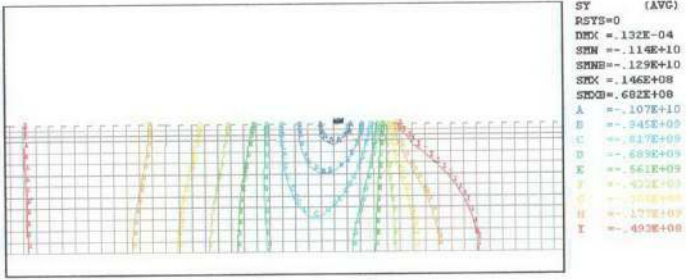


a-Çevresel basınç dağılımı ($P_{\max}=1154\text{MPa}$)

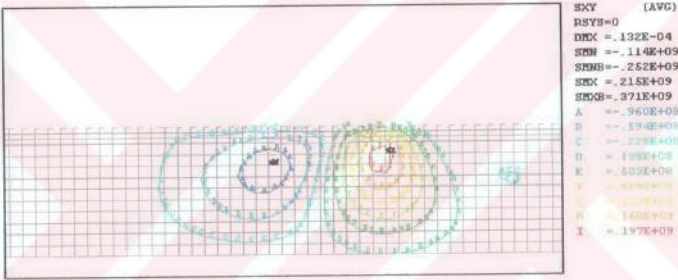


b- Eş teğetsel gerilme eğrileri

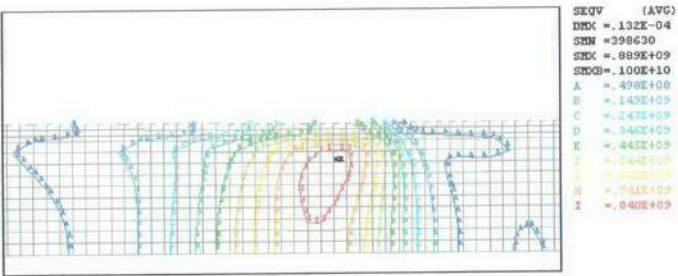
Ek Şekil 43. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri



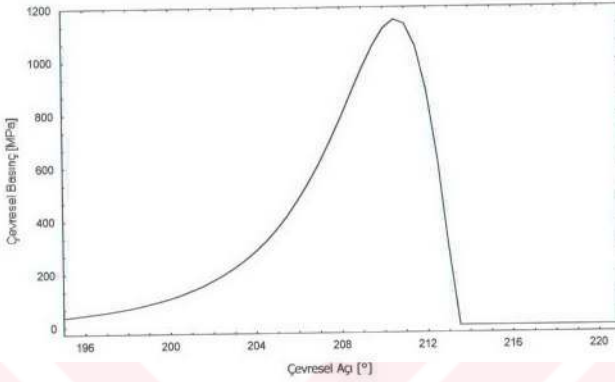
Ek Şekil 44. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş radyal gerilme eğrileri



Ek Şekil 45. III nolu yük altında 252° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri



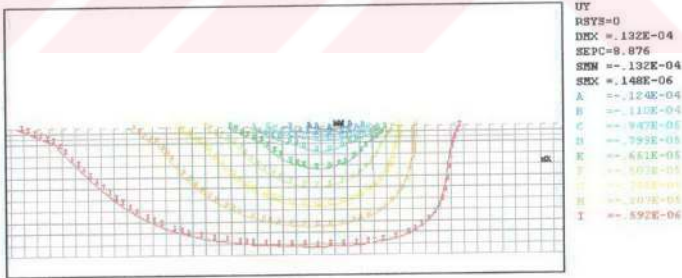
Ek Şekil 46. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme eğrileri



a- Çevresel basınç dağılımı

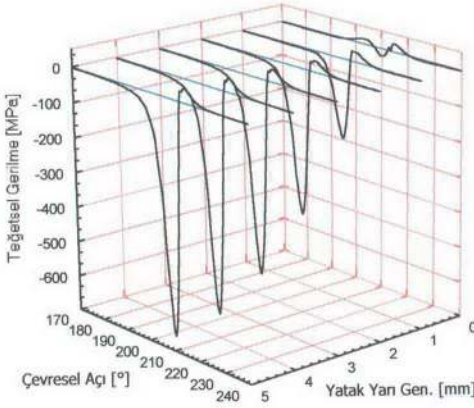


b- Yatak zarf yüzeyinde oluşan radyal deformasyon

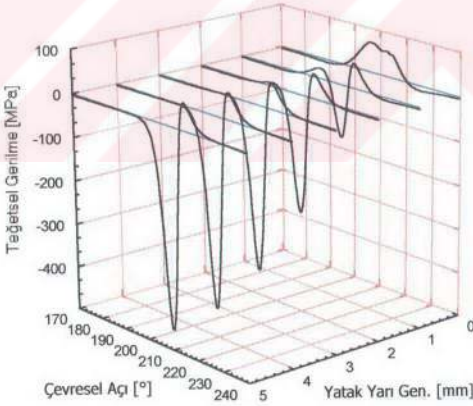


c- Yatak zarf kesitinde oluşan radyal eş deformasyon eğrileri

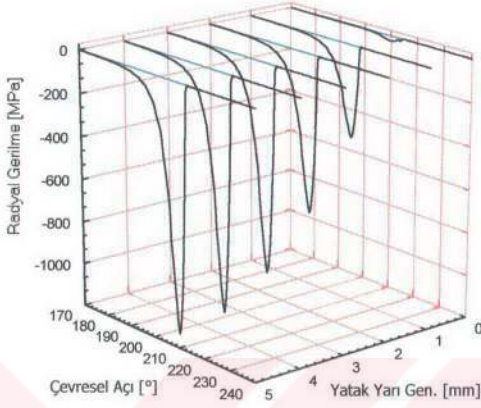
Ek Şekil 47. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan radyal deformasyonlar



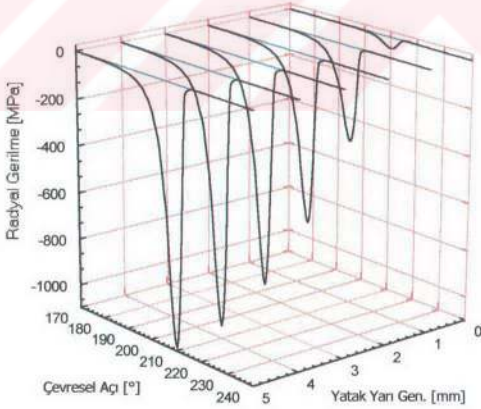
Ek Şekil 48. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler



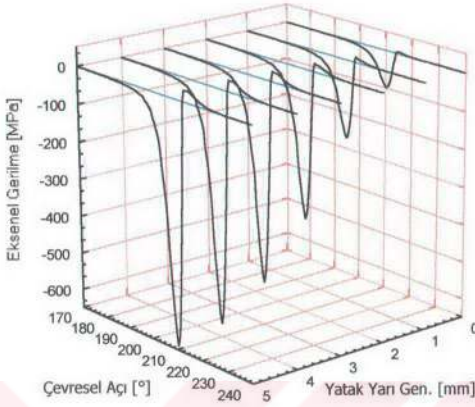
Ek Şekil 49. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler



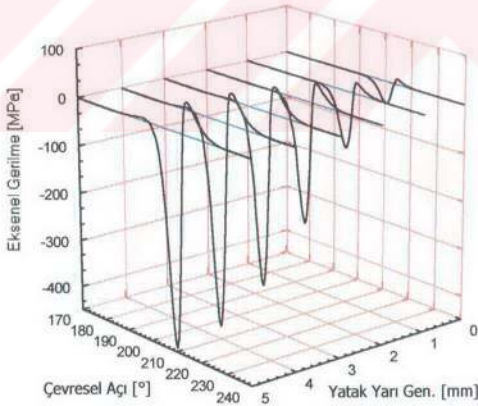
Ek Şekil 50. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler



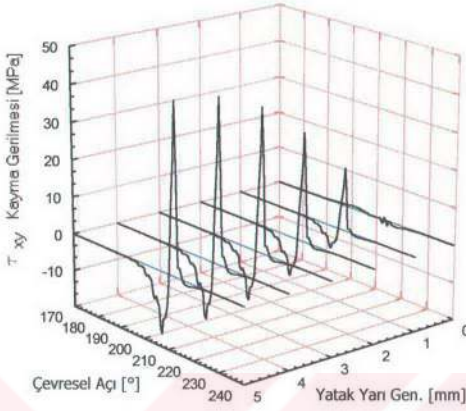
Ek Şekil 51. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler



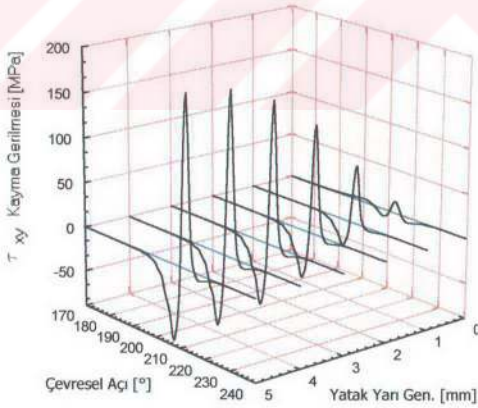
Ek Şekil 52. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler



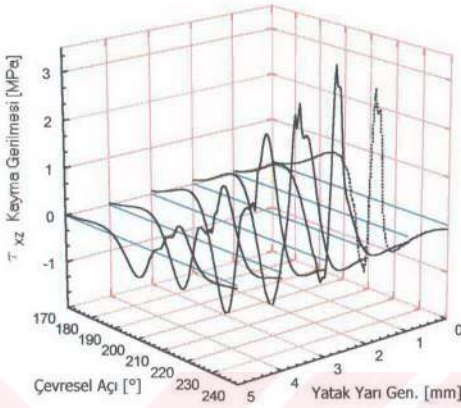
Ek Şekil 53. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler



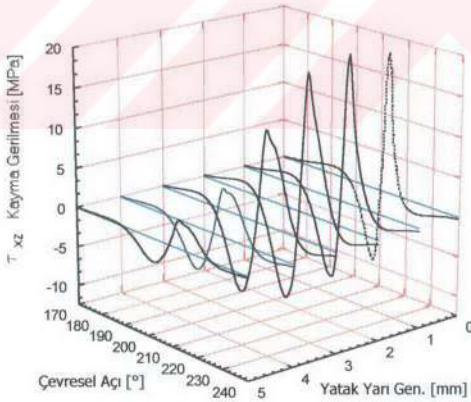
Ek Şekil 54. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



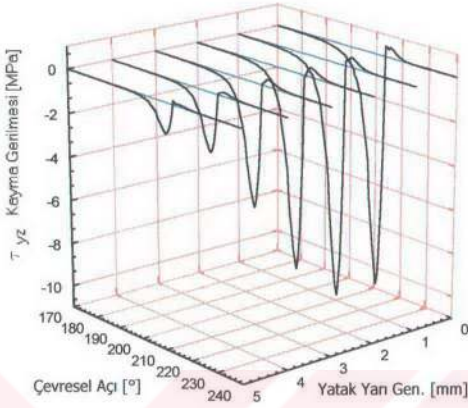
Ek Şekil 55. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



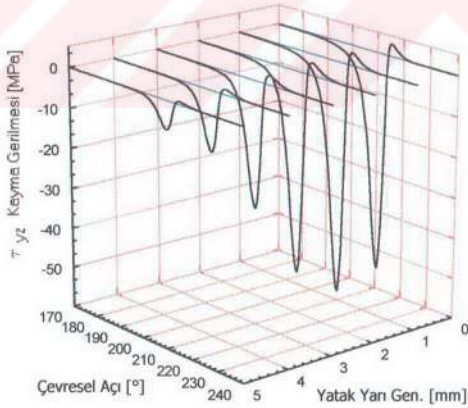
Ek Şekil 56. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



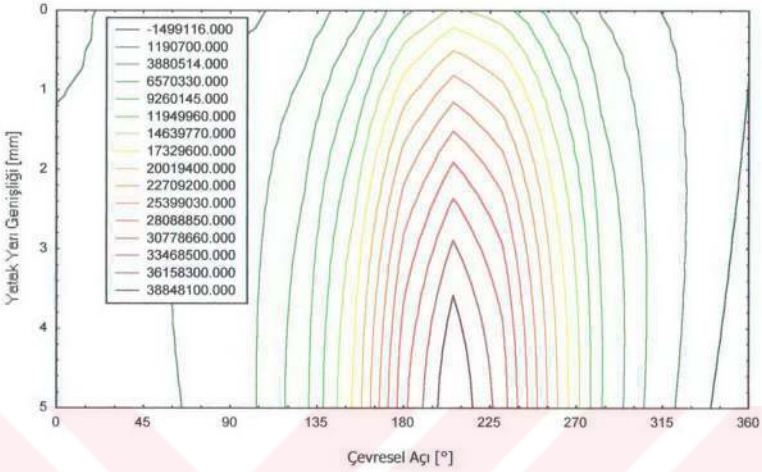
Ek Şekil 57. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



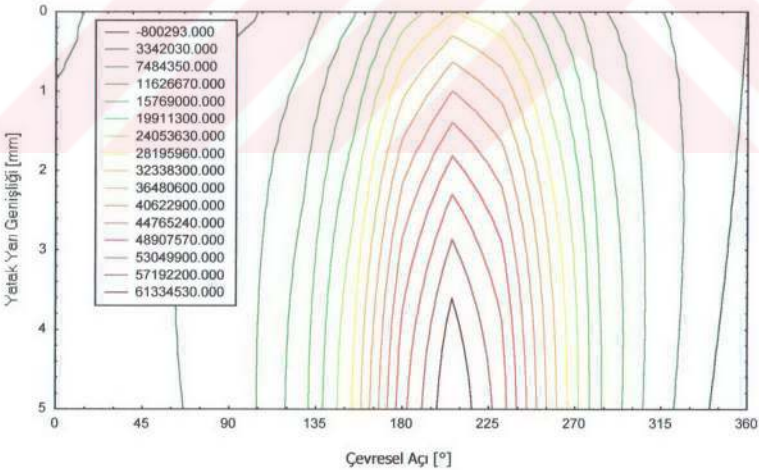
Ek Şekil 58. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



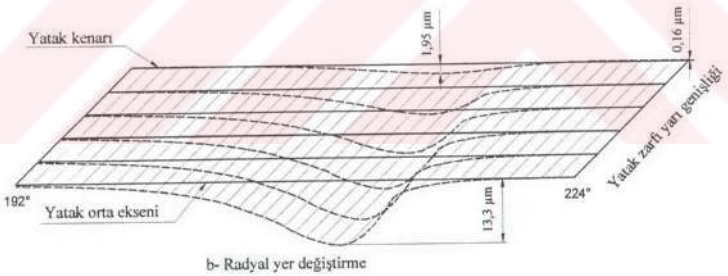
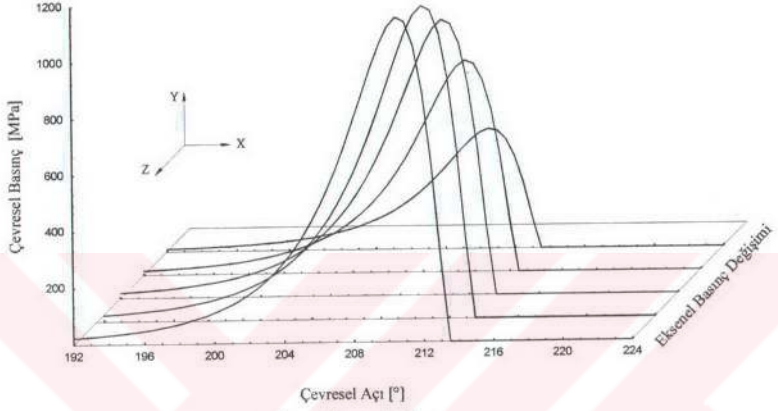
Ek Şekil 59. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



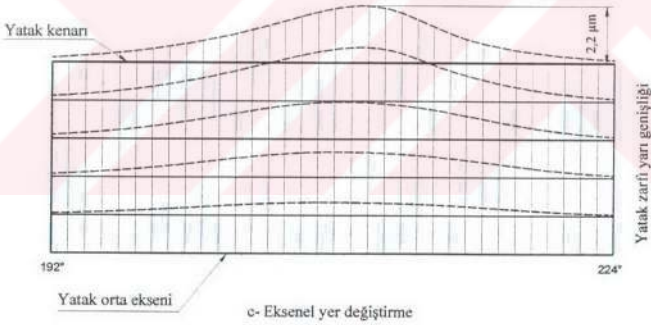
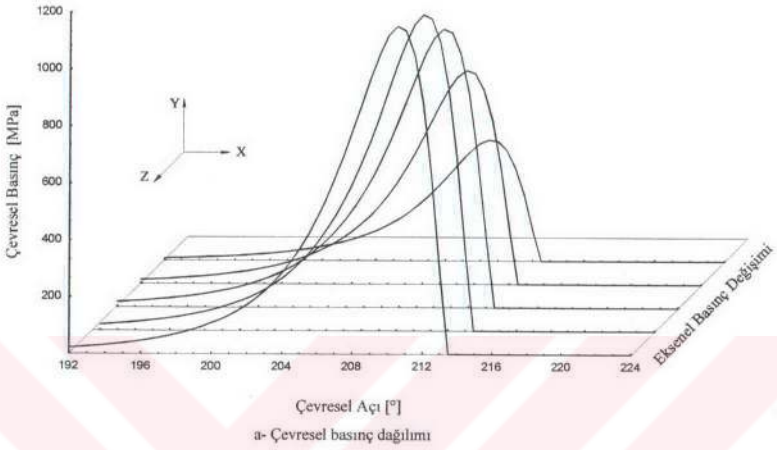
Ek Şekil 60. III nolu yükte 252° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



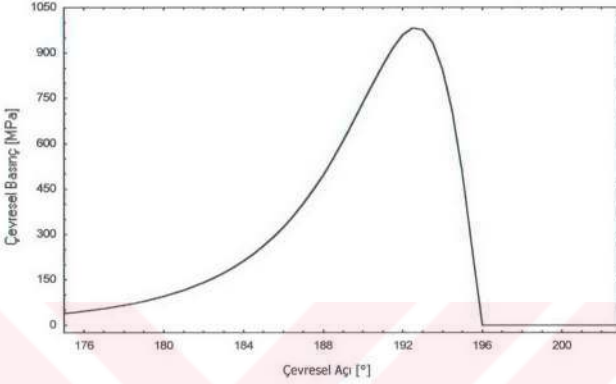
Ek Şekil 61. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



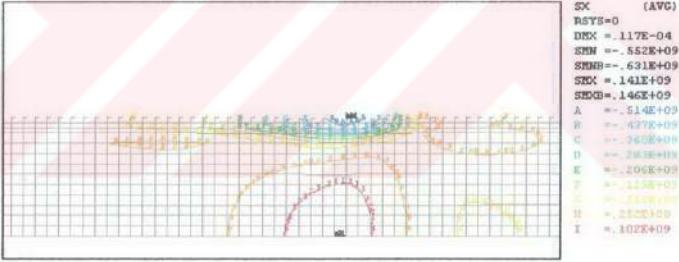
Ek Şekil 62. III nolu yük altında 252° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar



Ek Şekil 63. III nolu yük altında 252°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar

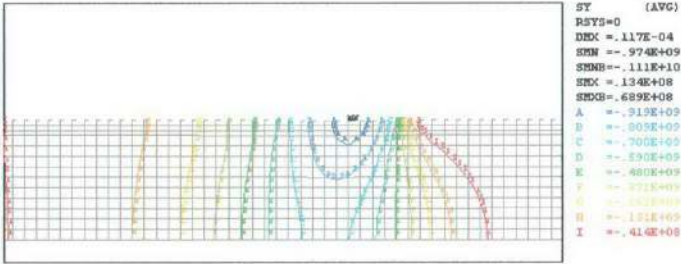


a-Çevresel basınç dağılımı ($P_{\max}=982$ MPa)

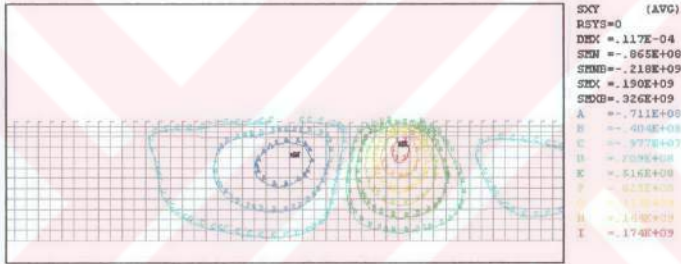


b- Eş teğetsel gerilme eğrileri

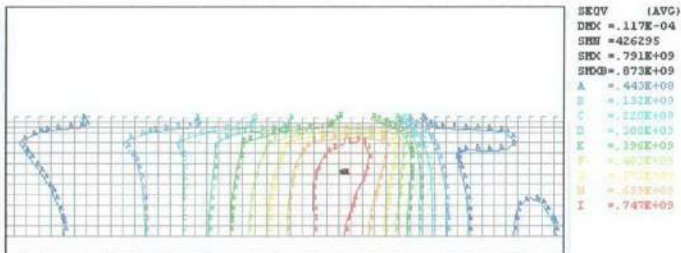
Ek Şekil 64. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri



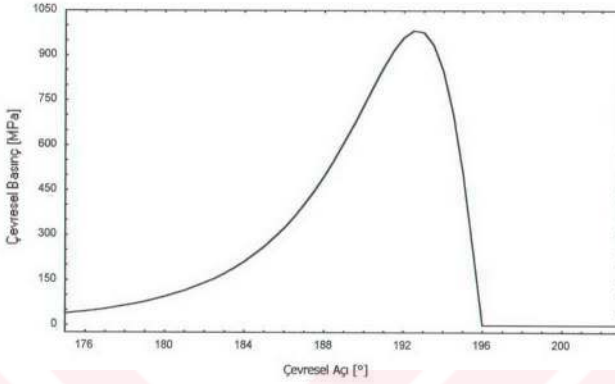
Ek Şekil 65. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş radyal gerilme eğrileri



Ek Şekil 66. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri



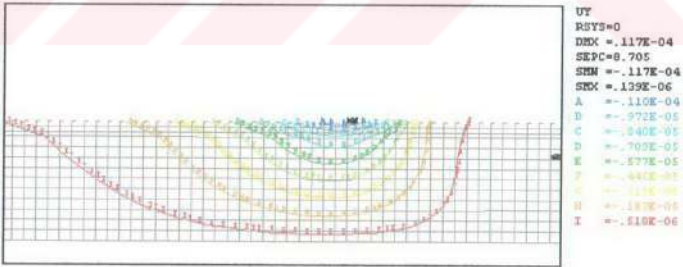
Ek Şekil 67. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme eğrileri



a- Çevresel basınç dağılımı

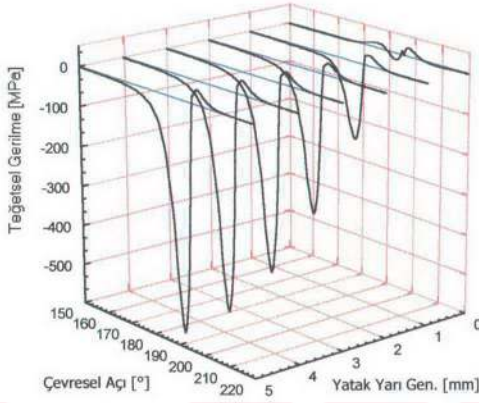


b- Yatak zarf yüzeyinde oluşan radyal deformasyon

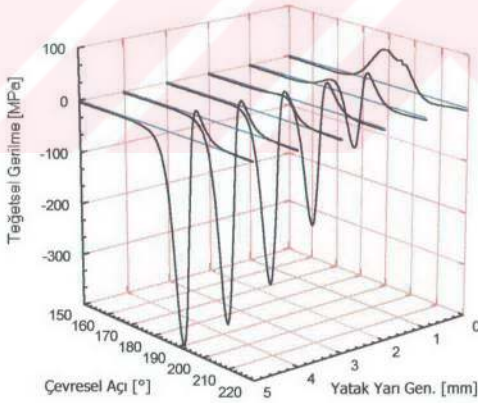


c- Yatak zarf kesitinde oluşan radyal eş deformasyon eğrileri

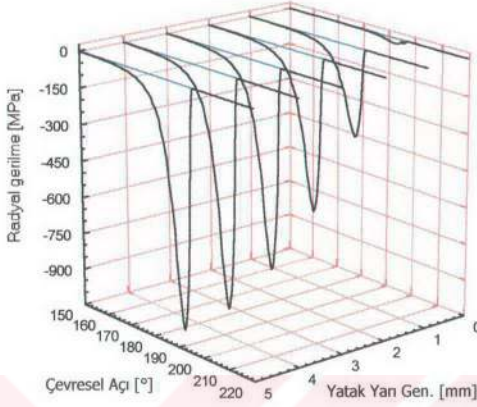
Ek Şekil 68. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan radyal deformasyonlar



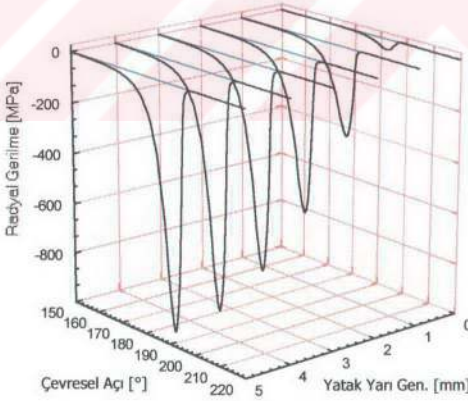
Ek Şekil 69. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler



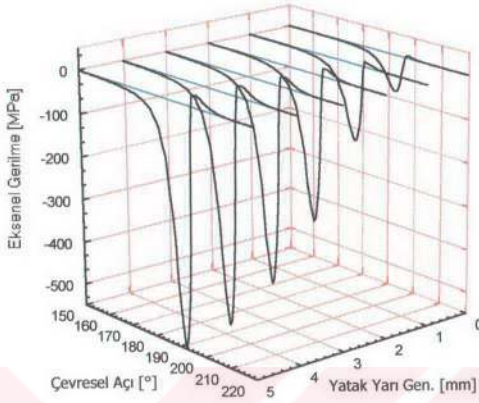
Ek Şekil 70. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler



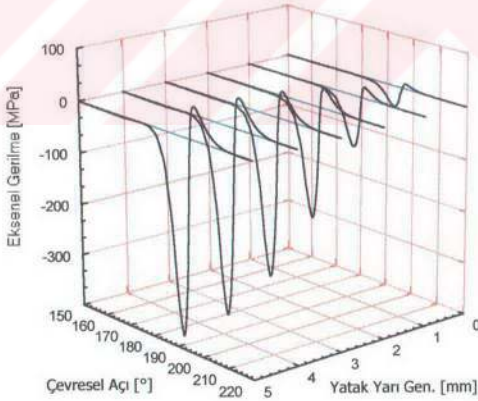
Ek Şekil 71. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler



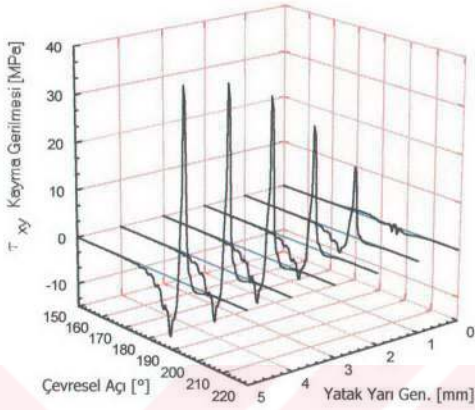
Ek Şekil 72. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler



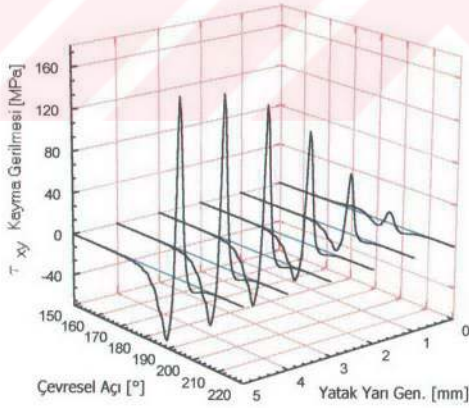
Ek Şekil 73. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler



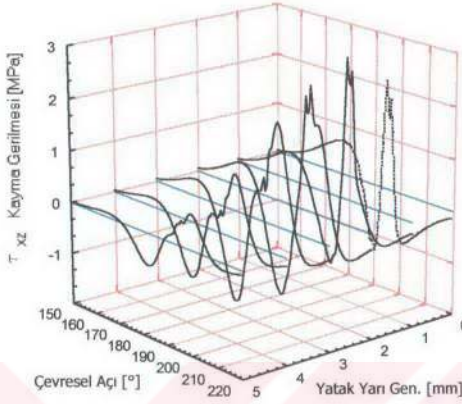
Ek Şekil 74. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki tabakada oluşan eksenel gerilmeler



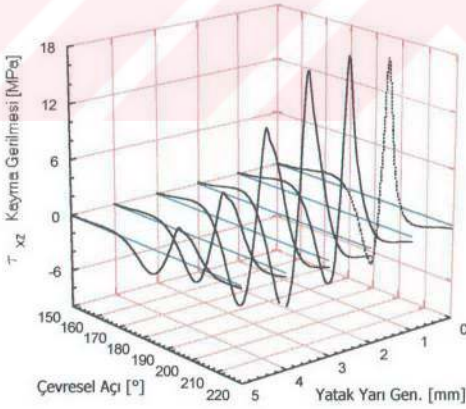
Ek Şekil 75. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



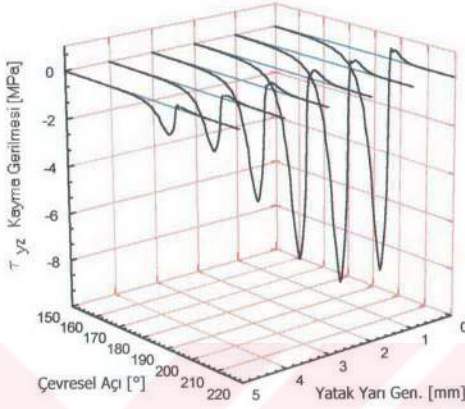
Ek Şekil 76. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



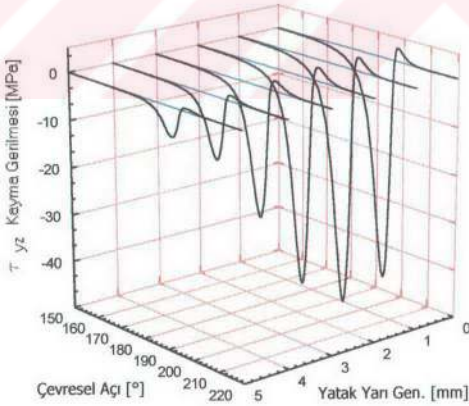
Ek Şekil 77. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



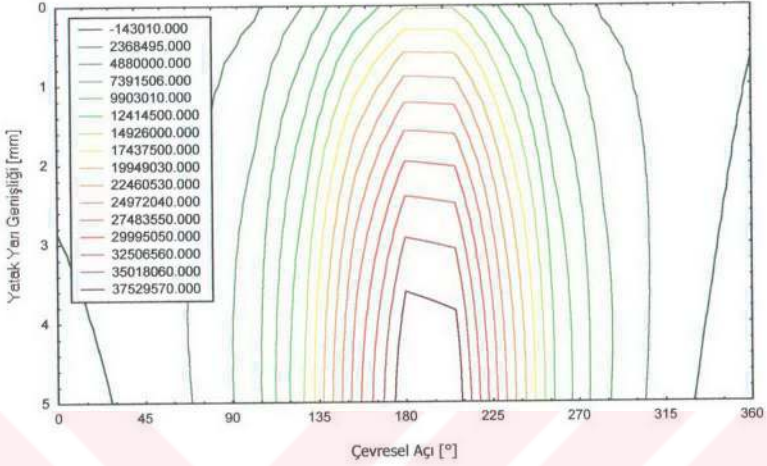
Ek Şekil 78. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



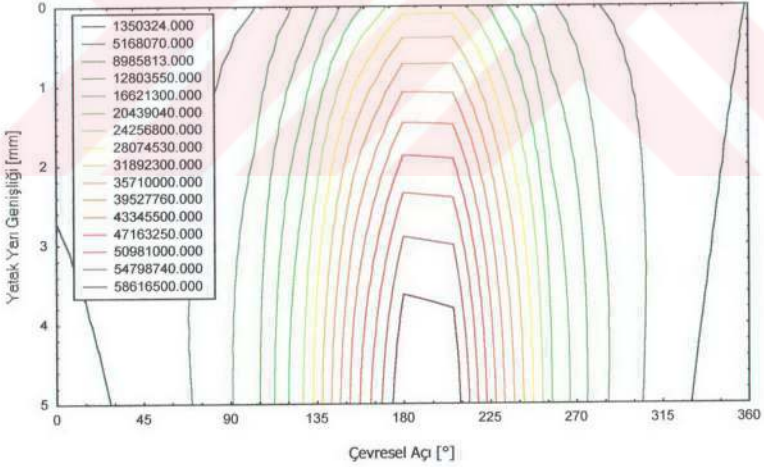
Ek Şekil 79. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



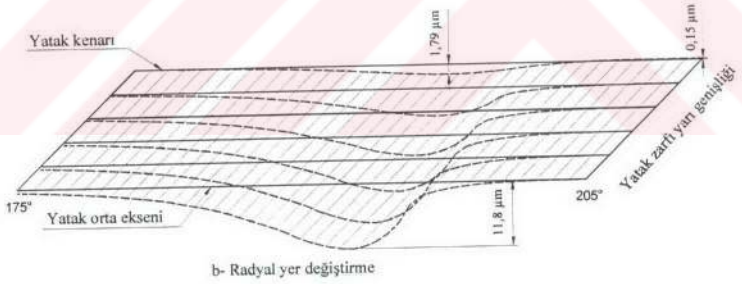
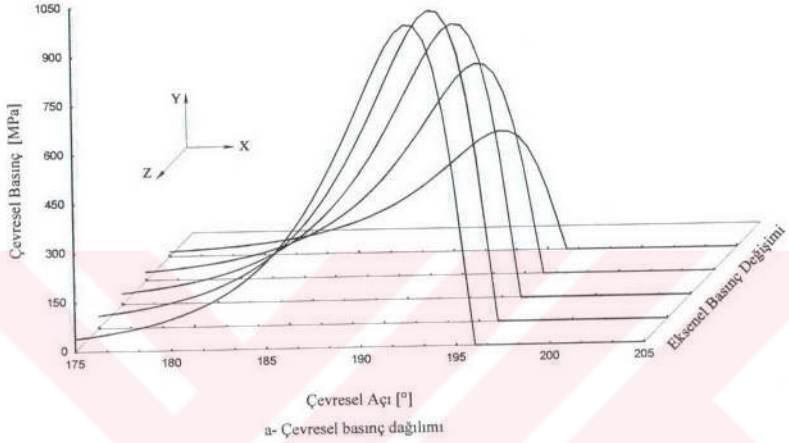
Ek Şekil 80. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



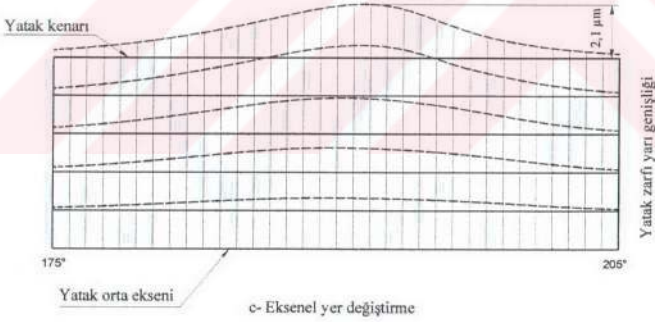
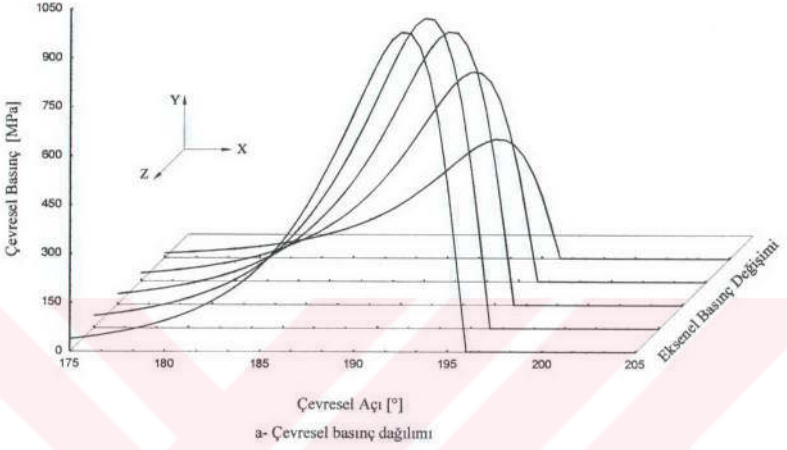
Ek Şekil 81. IV nolu yükte 219° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



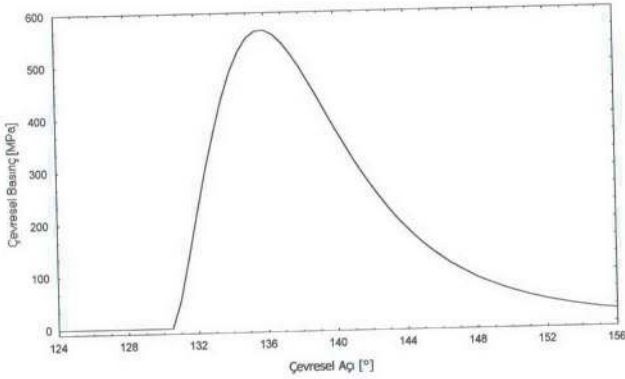
Ek Şekil 82. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



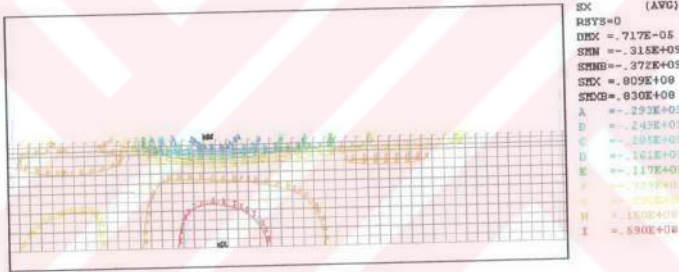
Ek Şekil 83. IV nolu yük altında 219° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar



Ek Şekil 84. IV nolu yük altında 219° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar

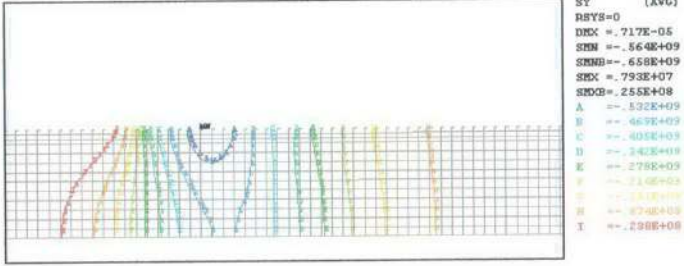


a-Çevresel basınç dağılımı ($P_{\max}=567\text{MPa}$)

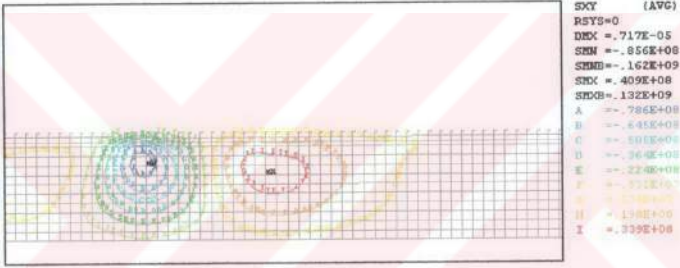


b- Eş teğetsel gerilme eğrileri

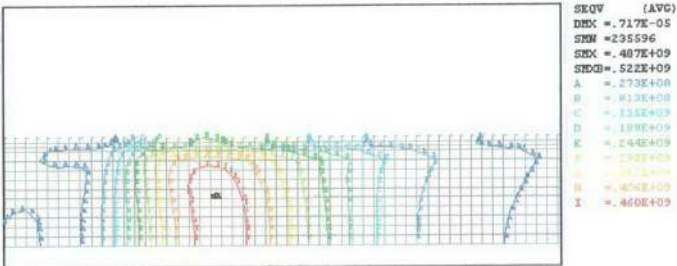
Ek Şekil 85. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş teğetsel gerilme eğrileri



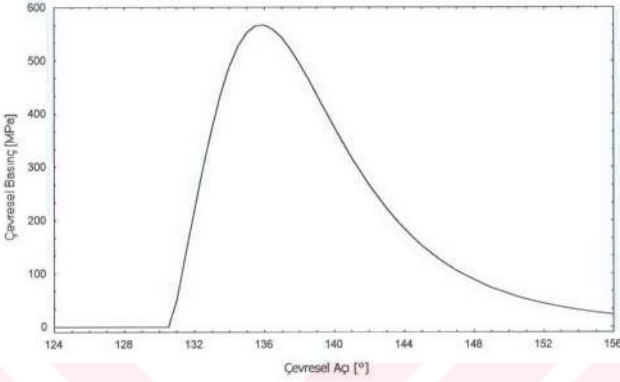
Ek Şekil 86. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş radyal gerilme eğrileri



Ek Şekil 87. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan eş kayma gerilmesi eğrileri



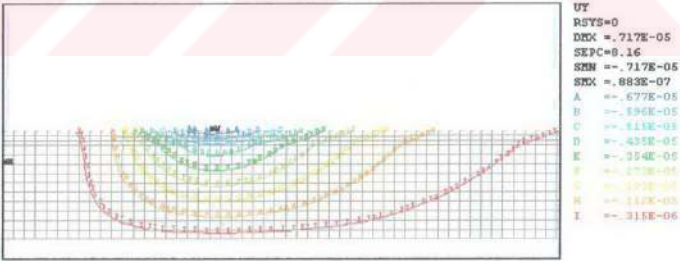
Ek Şekil 88. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde hesaplanan von Mises eşdeğer gerilme eğrileri



a- Çevresel basınç dağılımı

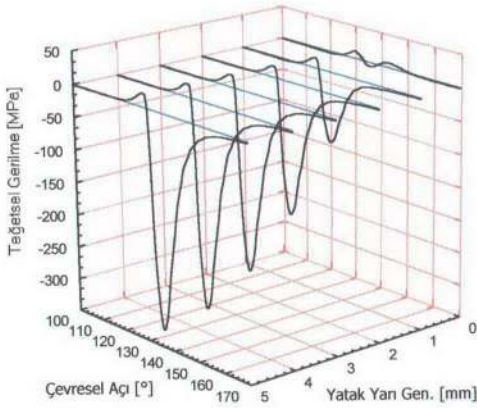


b- Yatak zarf yüzeyinde oluşan radyal deformasyon

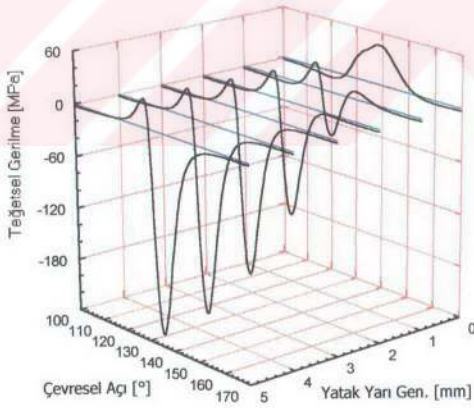


c- Yatak zarf kesitinde oluşan radyal eş deformasyon eğrileri

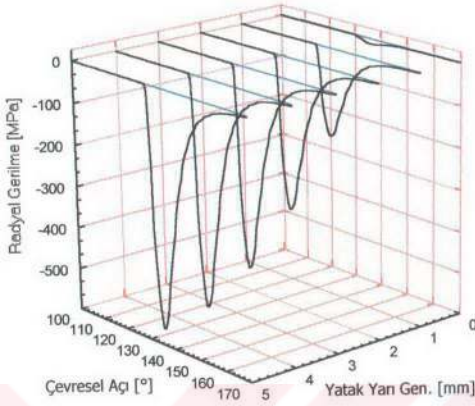
Ek Şekil 89. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı kesitinde oluşan radyal deformasyonlar



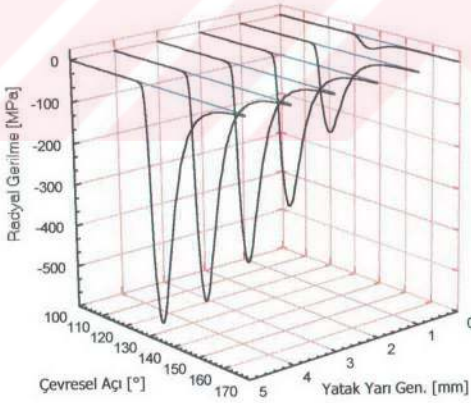
Ek Şekil 90. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmeler



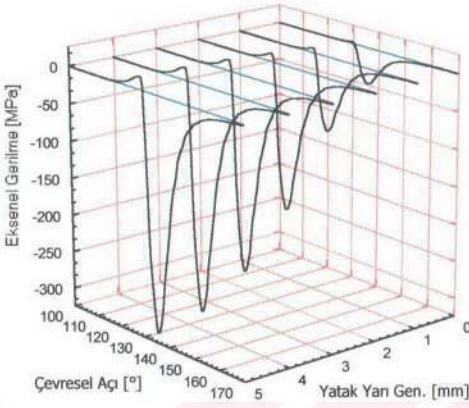
Ek Şekil 91. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan teğetsel gerilmeler



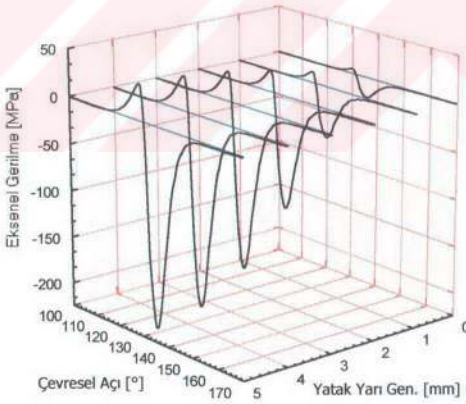
Ek Şekil 92. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan radyal gerilmeler



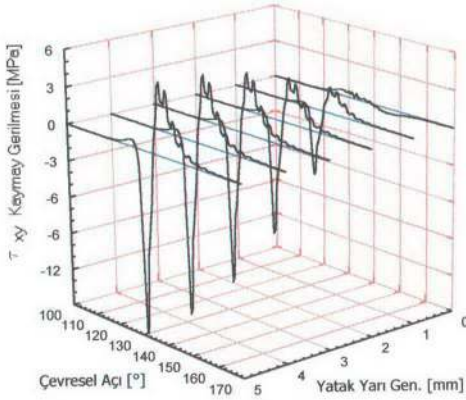
Ek Şekil 93. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan radyal gerilmeler



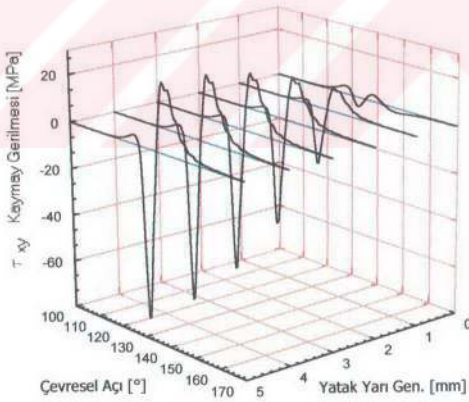
Ek Şekil 94. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan eksenel gerilmeler



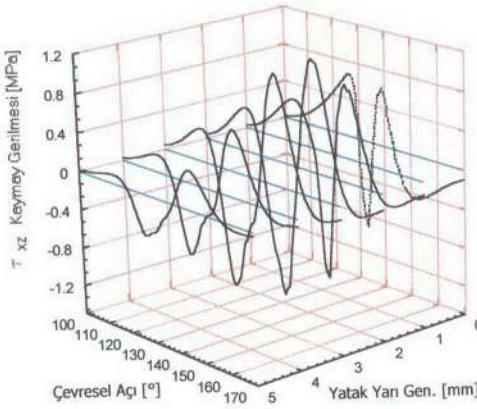
Ek Şekil 95. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan eksenel gerilmeler



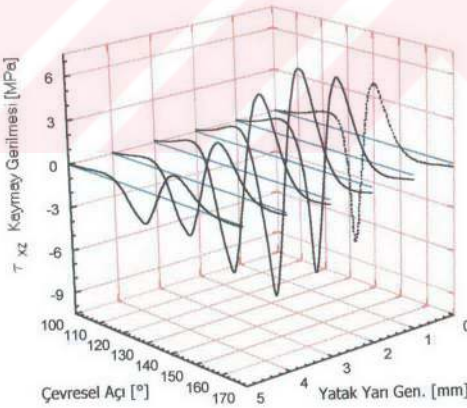
Ek Şekil 96. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



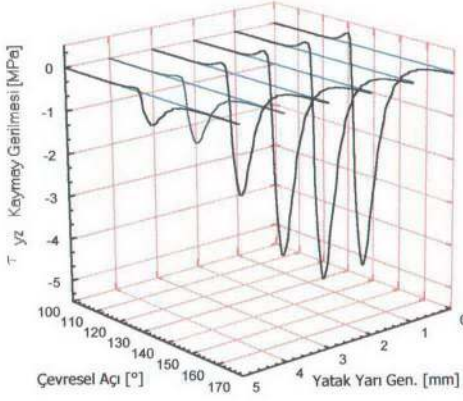
Ek Şekil 97. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xy} kayma gerilmeleri



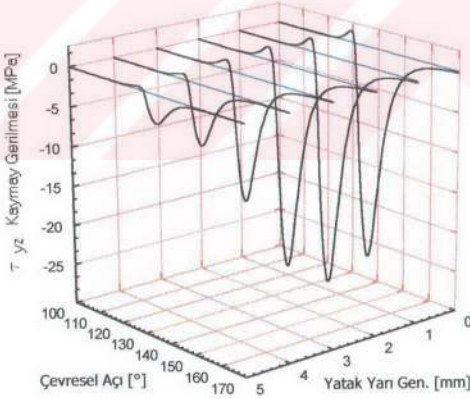
Ek Şekil 98. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



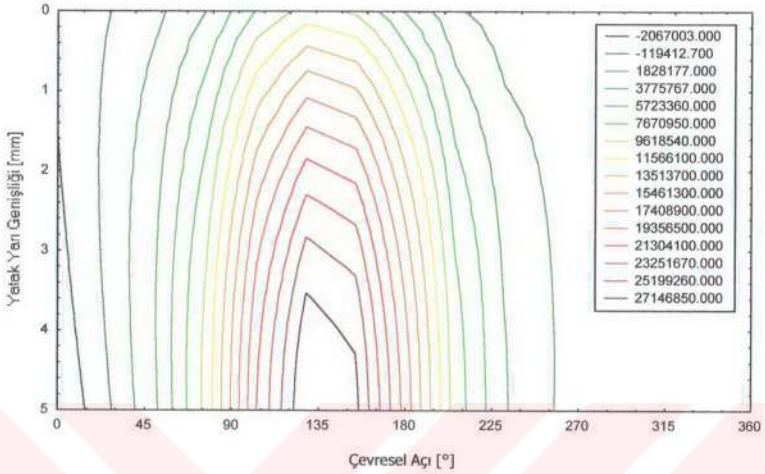
Ek Şekil 99. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{xz} kayma gerilmeleri



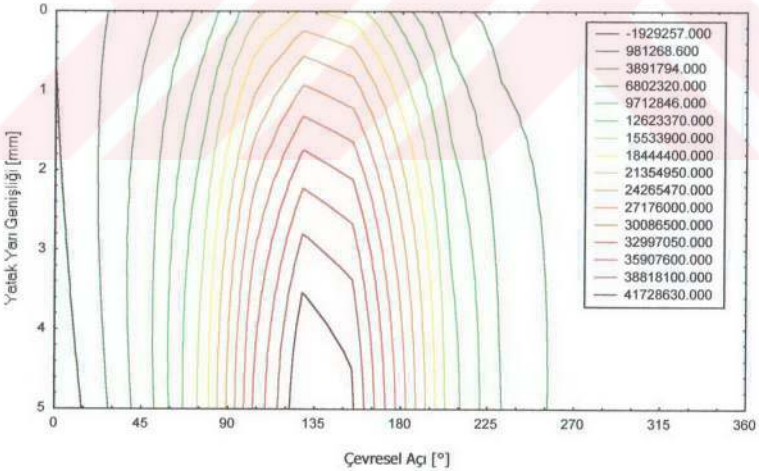
Ek Şekil 100. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



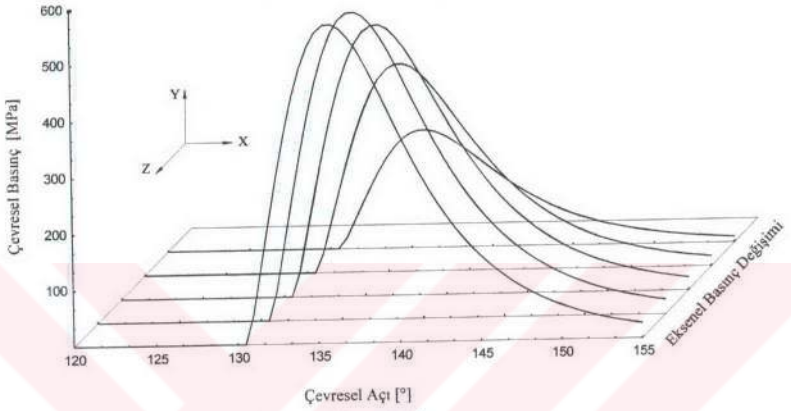
Ek Şekil 101. Yatak zarfı yüzeyinin 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında oluşan τ_{yz} kayma gerilmeleri



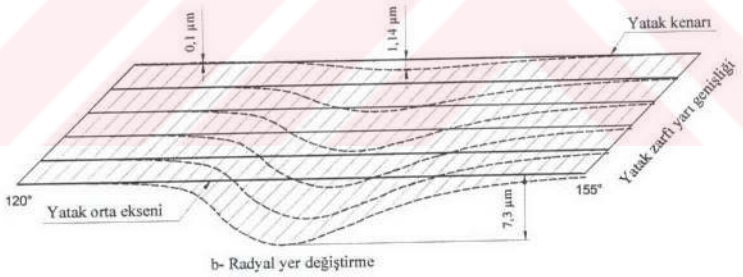
Ek Şekil 102. V nolu yükte 147° krank açısında oluşan basınç etkisinde yatak zarfı yüzeyinde hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



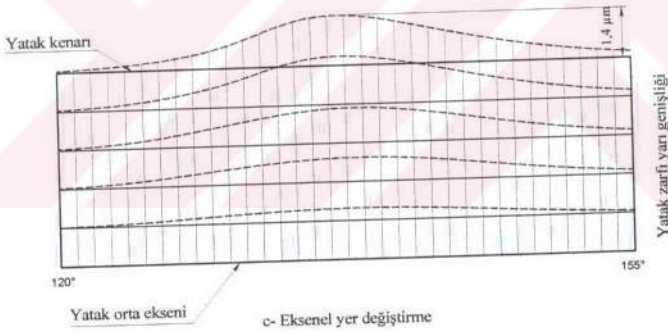
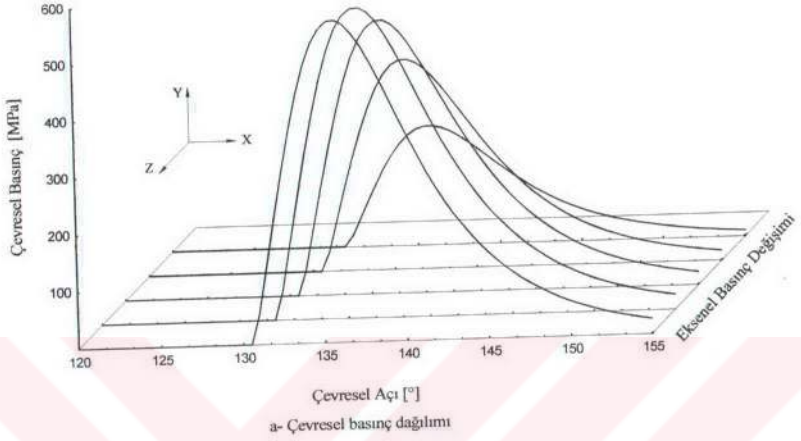
Ek Şekil 103. Yatak zarfı yüzeyini 0,32 mm altındaki birleşim tabakasında hesaplanan von Mises eş gerilme dağılımları



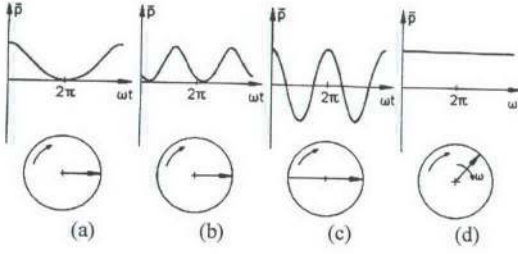
a- Çevresel basınç dağılımı



Ek Şekil 104. V nolu yük altında 147° 'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan radyal deformasyonlar



Ek Şekil 105. V nolu yük altında 147°'deki krank açısında oluşan basınç dağılımı etkisinde yatak zarfı yüzeyinde ortaya çıkan eksenel deformasyonlar



- a - Sinüs formulu 4π periyodlu titreşimli yük (KS)
- b - Sinüs formulu 2π periyodlu titreşimli yük (MB)
- c - 2π periyodlu tam değişken yük (GY)
- d - Çevresel dönen kuvvet (LIT)

Ek Şekil 106. Beyaz metal alaşımlı yataklara uygulanan yük örnekleri [12]

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Sabri DUMAN, 1965 yılında Trabzon'nun Çaykara ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Çaykara, Diyarbakır ve Şanlıurfa'da tamamladı. 1983 yılında Çaykara İnönü Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl girdiği K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümünü, 1987 yılında başarıyla bitirdi. 1987 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisansı eğitimini 1991 yılında başarıyla tamamlayarak Makina Yüksek Mühendisi oldu. 1991 yılında aynı yerde Doktora çalışmasına başladı. 1988 yılından beri K.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü'nde Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.