

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



MOTOR BİYEL KOLUNUN BAŞ KISMININ KIRILMASININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
NÜMERİK ANALİZİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

DOKTORA TEZİ

TEKİN ÖZDEMİR

BALIKESİR, OCAK - 2013

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**MOTOR BİYEL KOLUNUN BAŞ KISMININ KIRILMASININ
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE
NÜMERİK ANALİZİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

DOKTORA TEZİ

TEKİN ÖZDEMİR

BALIKESİR, OCAK - 2013

KABUL VE ONAY SAYFASI

Tekin ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “**MOTOR BİYEL KOLUNUN BAŞ KISMININ KIRILMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE NÜMERİK ANALİZİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 14.01.2013 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Ziya AKSOY

Üye

Prof. Dr. İrfan AY

Üye

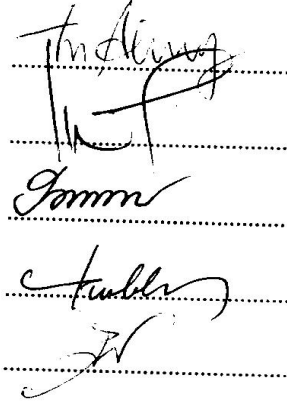
Yrd. Doç. Dr. Sait Özmen ERUSLU

Üye

Yrd. Doç. Dr. Osman Selim TÜRKBAŞ

Üye

Yrd. Doç. Dr. İlker EREN



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Hilmi NAMLI

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü tarafından BAP
2012-50 nolu proje ile desteklenmiştir.**

ÖZET

MOTOR BİYEL KOLUNUN BAŞ KISMININ KIRILMASININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE NÜMERİK ANALİZİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

DOKTORA TEZİ

TEKİN ÖZDEMİR

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:YRD. DOÇ. DR. Ziya AKSOY))

BALIKESİR, OCAK - 2013

Bu çalışmada öncelikle motor biyel kolu üretim aşamaları derinlemesine incelenmiştir. Motor biyel kolu üretiminde kullanılan temel malzemelerden biri olan perlitik yapıdaki C70S6 malzemesiyle kırma deneyleri, ve bunun akabinde kırma deneylerinde elde edilen veriler baz alınarak ANSYS ve LS-DYNA programlarıyla bilgisayar destekli analiz yapılmıştır. Deneyler yapılırken elde edilen biyel kolu kırma parametreleri hem motor biyel kolu optimizasyon çalışmalarında, hem de motor biyel kollarının sonlu elemanlar yöntemiyle analizi sürecinde kullanılmıştır. Perlitik yapıdaki C70S6 biyel kolu, başlangıç kırma deneylerinde elde edilen veriler ışığında çeşitli ısıl işlemlere tabii tutulmuştur. Malzemelerin ısıl işlemler yoluyla elde edilen yeni mekanik özellikleri (perlit-ferrit, martenzit ve temperlenmiş martenzit) ANSYS programına tekrar tanımlanmış ve yeniden bilgisayar destekli analize tabi tutularak deneysel sonuçlarla simülasyon analizi sonuçları karşılaştırılmıştır. Kırma deneyleri hem gerçek ortamda hem de simülasyon ortamında motor biyel kolu başlık kısmına açılan kırılma başlangıç çentiğinin yardımıyla başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle analiz işleminde ANSYS Workbench13 ve LS-DYNA R7.4 v5358 (Ls Prepost) programları kullanılmıştır. Analizler neticesinde motor biyel kolu için en uygun malzeme bileşimi tespit edilmiş, bu bulgu sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan testlerle desteklenmiştir. Bu çalışma, motor biyel kollarının optimizasyonunun sonlu elemanlar yöntemiyle derinlemesine incelenmesi ve elde edilen bulguların karşılaştırılması noktasında, geçmişte yapılan çalışmalardan ayrılmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: motor biyel kolu, sonlu elemanlar yöntemi, kırarak ayırma, simülasyon analizi, Ansys, Ls-dyna.

ABSTRACT

A STUDY ON ENGINE CONNECTING ROD HEAD SECTION'S FRACTURE SPLITTING EXAMINATION BY USING FINITE ELEMENT METHOD

PH.D THESIS

TEKİN ÖZDEMİR

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. Ziya AKSOY)

BALIKESİR, JANUARY 2013

In this study, firstly the production phases of engine connecting rod has been examined thoroughly. By using pearlitic-structured C70S6, one of the basic materials used in connecting rod production, fracture splitting examinations, and followingly finite element analysis have been performed by using ANSYS and LS-DYNA (Ls Prepost) depending on the parameters obtained during the scientific. The fracture parameters collected during the experimental phase have been used in both the connecting rod optimization studies and finite element analysis of connecting rods. The pearlitic-structured C70S6 connecting rod, with the help of the collected data during the experimental phase, has been subjected to different heat treatment operations. The newly obtained mechanical (pearlitic-ferritic, martensitic and tempered martensitic structures) properties of the materials by heat treatment operations re-defined into ANSYS software, and the results have been compared with the experimental results. The fracture experiments have been performed successfully in both real and simulation environments by the help of starting notches designed on the inner wall of the connecting rod's head section. ANSYS Workbench 13 and LS-DYNA R7.4 v5358 have been used to perform finite element analysis. At the end of the experiments and simulation analysis, the best material composition has been defined and, this finding has been supported by the finite element analysis results. This study is completely different from the former studies in terms of the thorough investigation of engine connecting rods via finite element method and the comparison of the findings.

KEYWORDS: engine connecting rod, finite element method, fracture splitting, fracture splitting, simulation analysis, Ansys, Ls-dyna.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
RESİM LİSTESİ	ivv
TABLO LİSTESİ	vivi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Biyel Kolları Hakkında Genel Bilgiler.....	1
1.2 Biyel Kolu Imalat Yöntemleri.....	2
1.3 Biyel Kolu Imalatının Teknolojideki Önemi.....	5
1.4 Motor Biyel Kolu Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	6
1.5 Nümerik Analiz ve Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	8
1.5.1 Nümerik Analizin Amacı.....	8
1.5.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi.....	9
1.5.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Nümerik Analizde Kullanımı.....	11
1.5.3.1 Parçanın Modelinin Çizilmesi.....	11
1.5.3.2 Eleman Tipi ve Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	12
1.5.3.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi ve Diğer Etkilerin Belirtilmesi..	12
1.5.3.4 Modele Ağ Örne.....	12
1.5.3.5 Çözüm.....	12
1.5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geçmişte Yapılmış Çalışmalar.....	11
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	20
2.1 Deneysel Çalışmaların Amacı.....	20
2.2 Deneysel Çalışmalar İçin Malzeme Seçimi.....	20
2.3 Biyel Kolu Kırma Deneyleri.....	22
2.4 Optimizasyon Çalışmaları.....	26
2.5 Deney Sonuçlarının Kırılma Mekanığı Açısından İncelenmesi.....	31
3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ NÜMERİK ANALİZ	33
3.1 Simülasyon Modelinin Oluşturulması.....	34
3.2 Sınır Koşullarının Analiz Yazılımında Tanımlanması.....	37
3.3 Bilgisayar Destekli Analiz Sonuçları.....	38
3.4 Deneysel ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	50
3.4.1 Perlitik C70S6 Biyel Kolu Deneysel Bulguları.....	50
3.4.2 Temperlenmiş Martenzitik Yapıdaki C70S6 Deneysel Bulguları..	52
3.5 Ls-prepost Kırılma Analiz Sonuçları.....	54
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
4.1 Sonuçlar.....	57
4.2 Öneriler.....	58
5. KAYNAKLAR	61
6. EKLER	64
6.1 Ansys ve Ls-dyna Yazılım CD.....	65

RESİM LİSTESİ

Sayfa

Resim 1.1:	Biyel kolu teknik resmi.....	1
Resim 1.2:	Biyele etkiyen kuvvetler	2
Resim 1.3:	Döküm yöntemi	4
Resim 1.4:	Dövmeyöntemi	4
Resim 2.1:	C70S6 kırılabilir biyel kolu	22
Resim 2.2:	Başlangıç çentiği (C70S6 biyel kolu)	23
Resim 2.3:	Kıyarak ayırma deney aparatı ve kırıcı uç	23
Resim 2.4:	C70S6 Kırılma sonrası yüzeyler	24
Resim 2.5:	C70S6 Kırılma sonrası yüzey birleşimi.....	24
Resim 2.6:	C70S6 Biyel kolu sertlik analizinde kullanılan yüzey.. ..	25
Resim 2.7:	Perlitik-Ferritik Yapı	27
Resim 2.8:	Temperlenmiş martenzitik C70S6.....	28
Resim 2.9:	Martenzitik C70S6 (612 HB).....	29
Resim 2.10:	Martenzitik C70S6 (352HB).....	30
Resim 3.1:	Kırılma başlangıç çentikleri ve temas noktaları.....	34
Resim 3.2:	Biyel kolu simülasyonunda kullanılan model.....	34
Resim 3.3:	Biyel kolu hareketinin Y-ekseninde kısıtlanması.....	35
Resim 3.4:	Kırıcı takımın biyel kolu baş kısmına oturtulması.....	35
Resim 3.5:	Deney safhası öncesi sonlu eleman modeli (1).....	36
Resim 3.6:	Deney safhası öncesi sonlu eleman modeli (2).....	36
Resim 3.7:	Kırılma için 15 mm yer değiştirme tanımlaması.....	37
Resim 3.8:	Mekanik özellikler giriş ekranı.....	37
Resim 3.9:	Kırma deneyinde tüm parçaların birbiriyle temas etmesi... ..	38
Resim 3.10:	Çatlak başlangıcı (1)	40
Resim 3.11:	Çatlak başlangıcı (2).....	40
Resim 3.12:	Çatlak başlangıcı (3).....	41
Resim 3.13:	Çatlak başlangıcı (4).....	41
Resim 3.14:	Çatlak ilerlemesi (1).....	42
Resim 3.15:	Çatlak ilerlemesi (2).....	42
Resim 3.16:	Kırılma oluşumu (1).....	43
Resim 3.17:	Kırılma oluşumu (2).....	43
Resim 3.18:	Kırılma oluşumu (3).....	44
Resim 3.19:	Kırılma oluşumu (4).....	44
Resim 3.20:	Toplam yer değiştirme vektörü.....	45
Resim 3.21:	Kırılma yüzeyi (1).....	46
Resim 3.22:	Kırılma yüzeyi (2).....	46
Resim 3.23:	Efektif gerilme bölgeleri.....	47
Resim 3.24:	Meydana çıkan yer değiştirme bölgeleri.....	48
Resim 3.25:	Efektif plastik gerilme bölgesi (1).....	49
Resim 3.26:	Efektif plastik gerilme bölgesi (2).....	49
Resim 3.27:	C70S6 kırılma yüzeyi.....	51
Resim 3.28:	C70S6 kırılma yüzeyi (LS-DYNA).....	51
Resim 3.29:	Temperlenmiş martenzit C70S6 kırılma yüzeyi.....	53
Resim 3.30:	Temperlenmiş martenzit C70S6 kırılma yüzeyi (LS-DYNA).. ..	53
Resim 3.31:	Kırılma anı efektif gerilmeler (Ls-prepost).....	54
Resim 3.32:	Kırılma sonrası efektif gerilme (1) (Ls-prepost).....	55

Resim 3.33: Kırılma sonrası efektif gerilme (2) (Ls-prepost).....	55
Resim 3.34: Kırılma sonrası efektif plastik gerinme (Ls-prepost).....	55
Resim 3.35: Kırılma sonrası gerilme bölgeleri (Ls-prepost).....	56
Resim 3.36: Kırılma sonrası basınç dağılımı (Ls-prepost).....	56

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: C70S6 çeliği alaşım oranları.....	7
Tablo 2.1: Teknolojik biyel kolu çeliklerinin mekanik özellikleri .	21
Tablo 2.2: C70S6 çeliğinin kimyasal bileşimi.....	21
Tablo 2.3: Deneylerde kullanılan C70S6 çeliğinin mekanik özellikleri	25
Tablo 2.4: Deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler.	30
Tablo 3.1: C70S6 Kırılma oluşum zaman tablosu.....	52
Tablo 3.2: Temperlenmiş martenzit C70S6 kırılma oluşum zaman tablosu.....	54
Tablo 4.1: C70S6 mekanik özellikleri ve kırılma zamanları.....	58

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1: Biyel kolu kırma aparatı modeli.....	33
Şekil 3.2: Gerilme yoğunlaşması.....	39

SEMBOL LİSTESİ

σ_{Akma}	: Akma gerilmesi
$\sigma_{Maksimum}$: Kopma gerilmesi, maksimum gerilme
ϵ	: Uzama
K_{1c}	: Malzemenin kırılma tokluğu
M_b	: Moment etkisi
F_a	: Cisme etkiyen kuvvet

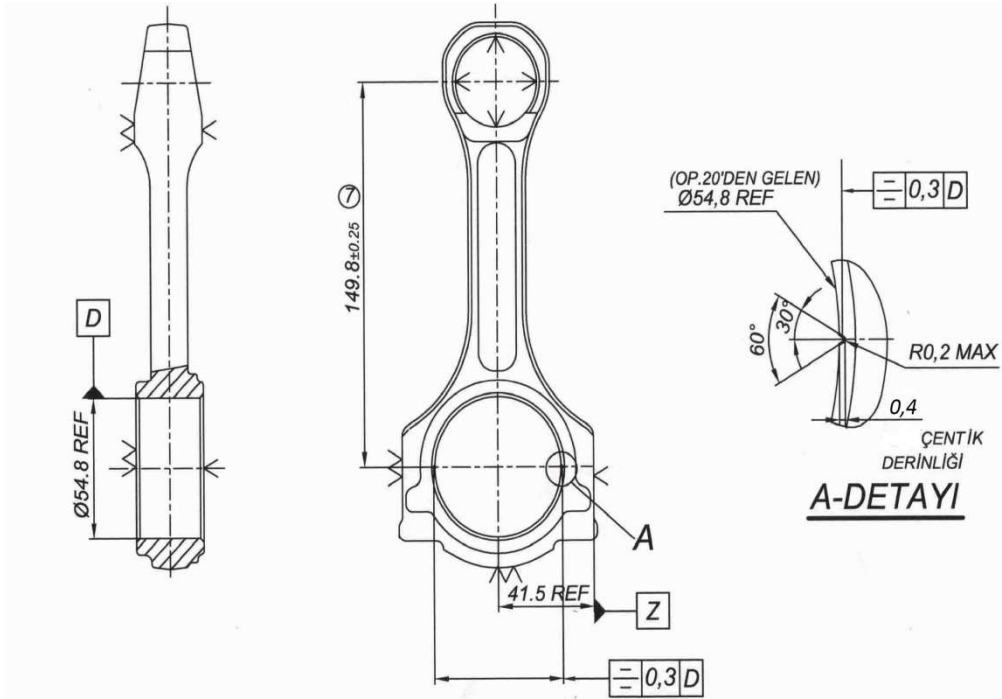
ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince bana destek olan başta eşim Hayat ÖZDEMİR olmak üzere kızım Zeynep Melis ÖZDEMİR ve Oğlum Arda Berk ÖZDEMİR'e, Ford A.Ş. Eskişehir İnönü Fb. Personel Müdürü sayın Onur ŞENGÜN'e, Kırma deneyleri boyunca bizlere destek veren 6'ncı Ana Bakım Merkezi Teknik Müdürü Yarbay Can CANDAN'a, Bilgisayar Destekli Analiz safhasında bizlere yol gösteren CAE Solutions A.Ş.'den sayın Ufuk PENEKLİ'ye, tez çalışması boyunca bizlerden engin bilgi ve tecrübesini esirgemeyen tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Ziya AKSOY ve değerli hocam sayın Prof. Dr. İrfan AY'a, tezin kırma ve ısıl işlemlerle ilgili bölümlerinde büyük fedakarlık ve çalışkanlık göstererek bana destek olan ve çalışmalarımızın olgunlaşmasını sağlayan kader arkadaşım Yüzbaşı Zafer ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

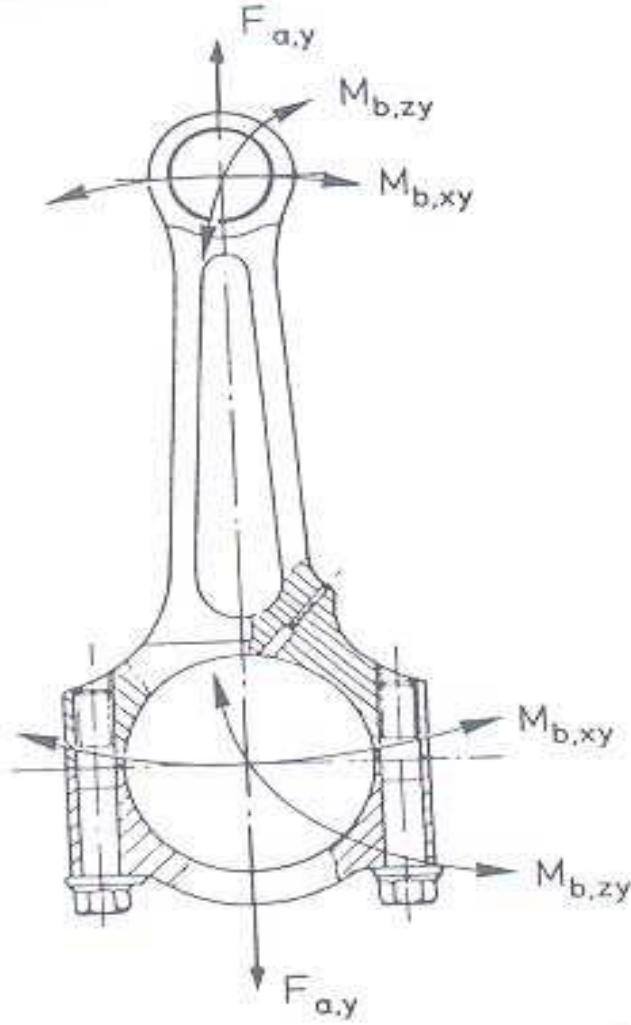
1.1 Biyel Kolları Hakkında Genel Bilgiler

Motor biyel kolu pistonun aksenal dönme kuvvetini kranka ileten motorun dinamik bir parçasıdır. Biyel kolları pek çok motor tipinde (V motor, düz motor, radyal motor vb.) kullanılmaktadır. Biyel kolu teknik resmi Resim 1.1’de görüldüğü gibidir.



Resim 1.1: Biyel kolu teknik resmi

Biyel kolları milyonlarca defa tekrarlı yüklere maruz kaldıkları için piston ve kranka tam uyacak şekilde ve tam toleranslı olarak işlenmelidirler. Motor içerisindeki hareketini düşünersek, biyelin uç kısmında; M_b , xy yönünde ve M_b , zy yönünde moment kuvvetleri etkimektedir. Biyelin baş kısmında ise M_b , xy yönünde ve M_b , zy yönünde etkiyen moment kuvvetleridir. Ayrıca biyele F_a (y yönünde) aksenal basma kuvveti etkisi oluşmaktadır. (Resim 1.2)



Resim1.2: Biyel koluna etkiyen kuvvetler

1.2 Biyel Kolu İmalat Yöntemleri

Biyel kolları dövme, dökme ve toz metalurjisi yolu ile imal edilmektedir. Motor içerisindeki işlevi gereği önce tek parça olarak imal edilir, daha sonra talaşlı imalat ile ya da tek seferde darbeli yükü kırılarak iki parçaya ayrılır. Talaşlı imalat ile ikiye ayırma çok fazla zaman ve maliyet kaybına neden olurken, kırarak iki parçaya ayırma zaman, iş gücü ve maliyet açısından büyük avantajlar yaratmakta, malzeme zayıf miktarı talaşlı imalata oranla daha az olmaktadır. Biyel kolu imalat teknolojisinde özellikle darbe etkisiyle tek seferde kırma konusundaki gelişmeler, son yıllarda artan rekabetin etkisiyle iyice önem kazanmıştır. Ülkemizde de, biyel kolu kıran sınırlı sayıda firma (Ford A.Ş, Omsan A.Ş. vb.) bulunmaktadır.

Motor biyel kollarının baş kısmının kırarak ayırma işleminde açılan çentikler *kırılma başlangıç noktası* oluşturması bakımından büyük önem taşımaktadırlar. Biyel kolları baş kısmında kırılma, önce broşlanmış çentik bölgelerinde stres konsantrasyon faktörü etkisi ile başlar. Radyal basınç etkisi ile çatlağın dışarıya doğru ilerlemesi ve son olarak büyük parçanın kırılması sağlanır. Bu nedenle çentiğin büyüklüğü, şekli ve açılma yeri kırılma kalitesini doğrudan etkiler. Biyel kolu baş kısmına açılacak karşılıklı iki çentiğin simetrik ve aynı ebatlarda olması gerekir. Çentik derinliği istenilen kırılma basıncını ve sonrasında büyük parçanın deformasyonunu etkiler. Endüstride kullanılan çeşitli çentik açma yöntemleri vardır. Broşlama yönteminde biyelin baş kısmının iç tarafında V şeklinde 2 adet simetrik çentik açılır. Bu metotta çentiğin şeklini istenilen şekilde ayarlamak ve bunu sürdürmek zordur. Çünkü işleme esnasında takımların aşınması aynı ebatta çentik elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca broşlama maliyeti de yüksektir. Broşlama esnasında kullanılan büyük miktarlardaki soğutucu sıvı hem maliyetlidir hem de çevresel nedenlerden dolayı bertaraf edilmeleri de ayrı bir maliyet gerektirmektedir.

Alfing&Mauser firması yüksek basınçlı su jeti yöntemini biyel kollarına çentik açmakta kullanmaktadır. Ayrıca toz metalurji ile üretilen biyelerin çentikli olarak imal edildikleri ve bu sayede broşlama, lazer çentik açma veya diğer çentik açma yöntemlerine ihtiyaç duymadıklarının bilinmesinde fayda vardır.

Döküm Yönteminde biyel kolları istenilen malzeme bileşiminin döküldüğü kalıplar kullanılarak tek parça olarak imal edilir. Sonra talaşlı imalat veya darbeli kırma yöntemiyle biyelin baş kısmı iki parçaya ayrılır. Kırılan parçalar tekrar birbirlerine uyacak şekilde işlendikten sonra kullanıma hazır hale getirilir.



Resim 1.3: Döküm yöntemi



Resim 1.4: Dövme yöntemi

Dövme yöntemi, metal ingotun şekillendirilmek üzere sıkıştırılmasıdır. İşlemin yapıldığı sıcaklık ortamına göre *soğuk*, *sıcak* ve *kızgın dövme* olarak üç ayrı

şekilde yapılır. Dövülen parçalar dövme işleminin ardından işlenerek son şekillerine kavuştururlar. Geçmişte demirci tezgâhlarında kullanılan çekiçlerin yerini günümüzde kompresörlü, elektrikli, buharlı ve hidrolik çekiçler almıştır. Çalışma esnasında biyel kolu yanmadan dolayı basma ve çekme kuvvetlerine maruz kalır. Ancak en önemli etki biyelin baş kısmında meydana gelen eğilme yükleridir. Bu etkiyi tolere etmek ve eğilme yüklerini taşıyabilmek için biyel kolları **I-kiriş** şeklinde tasarlanırlar. Enjeksiyon (toz metalürjisi) yönteminde kalıba toz halde karışım metal enjeksiyonu yapılır. Kalıba alınan toz metal sıcak preslenerek sinterleme yapılır. Malzemeye istenilen şekil verilir. Bu yöntemle malzeme özelliklerinin çok daha kaliteli hale getirilmesi sağlanır. Toz metalürjisinde iki ana yöntem kullanılır. Sinterleme yöntemiyle, sıkıştırılmış malzemenin kontrollü hava sıcaklığında bağ oluşturması sağlanır ve istenen özellikler elde edilir. Metal kalıba enjeksiyon yöntemiyle sıkıştırılarak karıştırılan malzeme kalıba alınarak istenen şekle sokulur.

1.3 Biyel Kolu İmalatının Teknolojideki Önemi

Biyelin motor içindeki ana fonksiyonu pistondan aldığı itme hareketini krank miline dönme hareketi olarak iletmesidir. Biyel kolları motor içinde normal bir çalışma esnasında bile dakikada 2.000-3.000 devir yapmaktadır. Bu şekilde, milyonlarca tekrarlı yüke maruz kalan bu parçanın, motor içerisinde hareket ederken oluşacak gerilmelere karşı yeterince dayanıklı olması gerekir. Aynı zamanda pistonun yaptığı her devirde yön değiştirme ve durma hareketlerinde atalet kuvvetlerini azaltmak için de yeterince hafif olmalıdır. Biyel kollarının tasarımında çok titiz olunmalı ve emniyetli olmasına önem verilmelidir; yani aksel basma, aksel çekme ve eğilme kuvvetlerine karşı mukavemetli olmalıdır. Burkulmadan ve eğilmeden pistonun ileri geri hareketi ile oluşan merkezkaç kuvvetlerine karşı da dayanıklı olmalıdır.

Biyeller gaz ve kütle kuvvetlerine de maruz kalırlar. Üst üste binen bu kuvvetler aksel yönde olup, biyel üzerinde ilave yük oluştururlar. Gaz kuvveti dönme hızı yoluyla belirlenirken; kütle kuvvetleri ise piston, piston pimi ve biyelin dönen parçaları ve biyelin gövdesi vasıtasıyla belirlenir. Biyel kolları bu faktörler ışığında sonsuz ömür için tasarlanırlar. Biyel kolu aksel çekme ve basma yükleri, çok yönlü genlikli eğilme yüklemeleri, atalet kuvvetleri ve burkulma yüklemelerine

maruz kalır. Değişik yükleri destekleyecek şekilde döküm ve dövme ya da sinterleme yoluyla imal edilirler. Maruz kaldığı yüklerle bakacak olursak; piston üzerindeki gaz basıncının etkisi ile basmaya, piston hızının değişiminden dolayı birbirini takip edecek şekilde basma ve çekme kuvvetine, mil üzerindeki eksendeki sarkaç hareketinden dolayı biyelin gövdesinde eğilmeye, çok büyük basma kuvvetlerinin etkisi ile burkulmaya, devirli yüklerin etkisi ile yorulmaya zorlanır. [1]

Yoğun rekabet, firmaların ekonomik olarak tasarlaması ve üretmesi gereken biyelleri yüksek performanslı ürünler olarak üretme yönünde hamle yapmalarına neden olmaktadır. Bu yüzden bazı otomotiv üreticileri pahalı olmasına rağmen dövme çelik yerine toz metalürjisi yöntemiyle biyel kolu üretimine geçmişlerdir. Bunun en önemli sebebi biyel kolu ile başlık kısmının ayrılma işlemindeki talaşlı imalat sürecinin maliyeti göz önüne alındığında, kırarak ayırma sonrasında birleştirilen yüzeylerin çok iyi bir uyum vermeleridir. Toz metalürjisiyle üretilen biyel kolları bahsedilen bu ilave talaşlı imalata ihtiyaç duymazlar. Ancak son zamanlarda düşük alaşımlı kırılabilir çelikler ve C-70 çeliği biyel kolu üretiminde cazip hale gelmiştir. Bu çelikler gövde ve kapların yüzeylerinin talaşlı imalat maliyetini en aza indirerek üretim maliyetini azaltmaktadır. Toz metallere kıyaslandıklarında ise yüksek yorulma dayanımına sahiptirler. [2]

1.4 Motor Biyel Kolu Üzerine Yapılan Çalışmalar

Motorun dinamik bir parçası olan biyel kolu, pistonun eksenel hareketini krankın dönel hareketine çevirir, bu yüzden motorda yapısal dayanıklılık ve verimliliği gösteren anahtar bir eleman konumundadır. Otomobil biyel kollarının burulma hassasiyeti ve biyelin kol kısmındaki alanı azaltma konusunda yapılan bir araştırmada akma, yorulma ve burulma dayanımı özelliklerinin biyel kolu ağırlığının azaltılmasında temel tasarım parametreleri olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuş bir biyel modelinin burulma özellikleri değerlendirilmektedir. Ulaşılan sonuçlarda ise sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımıyla elde edilen burulma değerleriyle gerçek deneylerde ortaya çıkan burulma değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı, modelin sınır ve geometrik koşullarıyla ilgili engellerin üstesinden

gelebilmesi için yapısal analize uyarlanmıştır. Araştırmacılar biyel kollarını *sonlu elemanlar yöntemi* kullanarak yeniden tasarlama yoluna gitmeye başlamıştır. [1]

Kırarak ayırma yöntemiyle imal edilen biyel kollarının metalografik incelemesinin yapıldığı bir çalışmada, biyelerin sıklıkla döküm çeliklerin yerine *kırılgan perlit demirden yapıldığı* ve bu sayede üretim maliyetlerinin düşürüldüğü tespit edilmiştir. Motor içerisinde meydana gelen değişken yük frekansları motor devrinin artması ile birlikte çok süratli şekilde artarlar. Büyük motor arızaları çoğunlukla biyel kolunun hasar görmesi veya kırılması ile oluşur. Bazen de kırılan biyel kolu gövdesi, krankın içine girerek motoru onarılamaz duruma getirir. [3]

Dale J.R., biyel kollarının değerlendirmesi adlı araştırmasında Kuzey Amerika'da 1986'dan 2005 yılına kadar, 500 milyondan fazla biyel kolunun *toz metalurjisi* yöntemiyle imal edildiğini, bu rakamın Kuzey Amerika'da imal edilen biyel kollarının % 60'ını oluşturduğunu, geri kalan bölümün ise geleneksel yöntemlerle veya döküm yoluyla imal edildiğini aktarmaktadır. Toz metalurjisiyle imal edilen biyel kollarının aynı sınıftan C-70 çeliğine nazaran %25-33 daha fazla yorulma dayanımına sahip olduğu da deneysel olarak ispatlanmıştır. [4]

Otomobil biyel kollarının kırılması teknolojisi üzerine yapılan bir deneysel çalışmada, biyel kollarının kırılarak ikiye ayrılması işleminin geleneksel talaşlı imalat yöntemine göre gözle görülür bir avantaja sahip olduğu belirlenmiştir. Kırarak ayırma yöntemindeki imalat işlemi sayısının geleneksel metotlara göre az olmasının, ekipman ve takım yatırım maliyeti ile enerji kullanımını azalttığı tespit edilmiştir. Bu teknolojinin aynı zamanda ürün kalitesini ve yataklama kapasitesini de artırdığı görülmüş, biyel kollarının baş kısmının klasik yöntemle (talaşlı imalat) ve kırılarak ikiye ayrılması işlemleri karşılaştırılmıştır. Malzeme olarak aşağıda bileşimi verilen C70S6 çeliği kullanılmıştır.

Tablo 1.1: C70S6 Çeliği alaşım oranları [5]

Alaşım Oranı	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
C70S6BY	0.72	0.22	0.50	0.009	0.06-0.07	0.061	0.04

Araştırmada *klasik kırma yöntemde biyel kolunun 14, darbe ile kırarak imalatta ise 6 adımda* kullanıma hazır hale geldiği gösterilmiştir. Ayrıca, üretim prosedürleri bu yolla % 60'a kadar, maliyet % 25-35 arasında ve kullanılan enerji % 40 oranında azalmaktadır. [5]

Lazer yöntemi ile çentik açma yönteminin birçok avantajı mevcuttur. Broşlama yöntemine kıyasla açılan çentik genişliği küçüktür ve 0,15 mm'ye kadar kontrol edilebilmekte, bu düşük genişlik kırılma esnasında kaliteyi geliştirmektedir. Yöntemin tek dezavantajı kullanılan lazer kesme takımları, kesmeyi müteakip su verme aşamasında takım aşınmasını artırmaktadır. Kırarak ayırma işleminde ana kırma parametreleri kırma basıncı, geri basınç ve basınç hızıdır. Kırma basıncı çentiğin şekil, boyut ve malzeme özellikleri ile ilgilidir. Yüksek kırma basıncı biyelde istenmeyen deformasyonlara neden olur. Doğru geri basınç kırılma sürecinin kararlılığını artırır, biyel baş kısmının deformasyonunu azaltır ve kırılma yüzeyi uygunluğunu artırır. Basınç hızı kırılan yüzey kalitesini etkiler. Basınç hızının artırılması biyel kolunu gevrek hale getirir ve ayrılan yüzeyin kırılma alanı sünekliliğini istenmeyen şekilde azaltır. Kırılma alanı sünekliliği ne kadar az olursa yüzeylerin birbirine tekrar uyması aynı oranda başarılı olur. Ancak bazı araştırmalarda basınç hızının 100 mm/s.den fazla olmasının sünek kırılma alanını daralttığı, basınç hızının 100 mm/s.'yi geçmesinin ilave bir fayda sağlamayacağını göstermektedir.[5]

1.5 Nümerik Analiz ve Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar metodu mühendislikte pek çok problemin çözümünü elde etmek için kullanılan nümerik bir metottur. Düzgün, geçişli, doğrusal ve doğrusal olmayan problemlerin gerilme analizi, ısı transferi, sıvıların akışı ve elektromanyetizma problemleri sonlu elemanlar metodu ile kolaylıkla analiz edilebilmektedir.

1.5.1 Nümerik Analizin Amacı

Nümerik Analizin Amacını matematiksel problemlerin çözümlenebilmesi için uygun ve en iyi yaklaşım veren yöntemleri bulmak, ayrıca bunlardan anlamlı ve faydalı sonuçlar çıkarmak olarak tanımlanmaktadır. Çözümü istenen problemi tanımlamak ve sonuca varacak yöntemi saptamak genellikle aynı bilim adamının işidir. Bu nedenle

problemi tanımlayanın bir nümerik analizcinin sahip olduğu bilgilerin en azına sahip olması gerekir. Problemin çözümünde bir takım aşamalardan geçilerek sonuca varılır. Bu aşamalardan ilki problemin formüle edilmesidir. Fiziksel bir olayın matematiksel modelinin formüle edilmesinde nümerik analizci, problemini bilgisayar ile çözümleyeceğini göz önünde bulundurmalıdır. Formülasyon yapıldıktan sonra problemin çözümü için hata analizi ile birlikte nümerik yöntem en iyi yaklaşımla sonuç elde edilecek şekilde seçilmelidir. Nümerik çözüm yöntemi, belirtilen ya da istenilen hassaslıktaki yaklaşımla ve belli sayıda ardışık tekrar işlemlerinden sonra matematiksel probleme çözüm getirmelidir. Nümerik çözüm yöntemleri genellikle önceden saptanmış aritmetik ve mantıksal işlemlerden oluşur. Bu işlemlerin tümüne çözüm algoritması denir. Algoritma belli sayıda işlemlerden sonra probleme çözüm getirir. Problemin bilgisayar ile çözümünde üçüncü aşama, algoritmanın bilgisayarda çözümünü sağlayacak programlama aşamasıdır. Programlama; C, Pascal, Basic, Cobol, Fortran vb. bilgisayar dillerinden birisi veya bu alt sistemleri kullanan yazılımlarla (Örneğin ANSYS, LS-DYNA) yapılır.

1.5.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi

Modern sonlu elemanlar metodunun kaynağı 1900'lü yıllara kadar uzanır, bazı araştırmacıların farklı eşitliklerdeki elastik çubukları modellemesiyle başlar. Tarihsel olarak sonlu elemanlar metodu hakkında ilk kitap Courant tarafından 1943'te yayımlanmış ve Courant bu metodu geliştiren kişi unvanını almıştır. Sonlu elemanlar metodu kullanımındaki bir sonraki önemli adım 1950'lerde Boeing uçak firmasının uçak kanatlarını bu yöntemle modellemesiyle atılmıştır. 1960'lara varmadan Clough isimli araştırmacı "Sonlu Elemanlar" terimini popüler hale getirmiştir. 1960'lı yıllarda araştırmacılar akışkanlar mekaniği, ısı transferi gibi mühendislik alanlarında sonlu elemanlar metodu kullanmaya başlamıştır. Zienkiewicz ve Cheung 1967'de tamamen sonlu elemanlar metoduna adadıkları kitaplarının basımını yaparak yayınlamışlardır.

ANSYS yazılımının adı ilk defa 1971 yılında duyuldu. ANSYS, 100.000'den fazla matematiksel formül kodunu içeren geniş kapsamlı sonlu elemanlar tabanlı bir bilgisayar yazılımıdır. Statik, dinamik, ısı transferi, akışkanlar mekaniği ve pek çok elektromanyetik analiz ANSYS vasıtasıyla dakikalar içerisinde yapılabilmektedir. ANSYS yazılımı yaklaşık 30 yıldır sonlu elemanlar metoduna öncülük etmektedir. Günümüzde uzay araştırmaları, otomotiv, elektronik ve nükleer

araştırmalar da dâhil olmak üzere mühendisliğin pek çok alanında bu yazılım yaygın olarak kullanılmaktadır. ANSYS veya benzeri bir sonlu elemanlar metodu altyapısıyla çalışan yazılımı kullanmak isteyen bir kişi sonlu elemanlar metodunu ve bunun alt kabullerini çok iyi anlamak zorundadır. Sonlu elemanlar metodunun temellerini anlamayan bir ANSYS kullanıcısının istediği analizi modellemesi düşünülemez. ANSYS ve benzer yazılımlarla yapılan analizlerde temel hedef, üretilmesi planlanan bir malzemenin imalat maliyetini düşürmek veya mevcut malzemeden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretmektir.

Sonlu elemanlar metodu analizleriyle hesaplanan sonuçların tamamı yaklaşık sonuçlardır. Temel olarak, analiz için kurulan matematiksel model gerçek hayattaki sistemin tahmini bir modeli şeklindedir. Model ne kadar iyi kurulursa, çıkan veya elde edilen sonuçlar da o kadar gerçeğe yaklaşmış olur. Sonlu elemanlar metodu yazılımları, kurulan modeli kendi içerisinde interpolasyon formülleri kullanarak analiz eder. Nümerik analizde yapılacak hatalar (kötü tasarlanmış matrisler) hesaplanan sonuçların doğruluk oranına yansır. Bu yüzden sonlu elemanlar metodu yazılımları kullanılırken tasarlanan modele gerçek hayatta karşılaşılan yükler uygulanmalı ve sınır şartları çok iyi hesaplanmalıdır.

Analiz yapılmadan önce mühendis ilk olarak modelin maruz bırakılacağı çevresel şartları, belirli fiziksel doğal olayları ve istenen tasarımın hedefini belirler. Örneğin bir parçanın dayanıklılığını artırmak pek çok mühendis için temel bir kabuldür. Analizin ilk adımı tasarım modelinin statik veya dinamik şartların hangisine maruz kalacağını belirlemektir. Gerçek uygulamada modelin nasıl sabitlendiği, titreşim şartlarında çalışıp çalışmadığı veya sistem içerisindeki diğer parçalarla nasıl bir etkileşim içerisinde olduğu gibi sorular sorularak kurulacak modelin çalışma şartları belirlenir. Mühendisler uzun yıllardır hesaplama işlemlerinin maliyeti konusunda bedel ödemişler, sonlu elemanlar metodu yazılımları ise bu bedeli çok kısa sürede ve doğruya yakın analizler yaparak en aza indirmeyi başarmıştır. Bir parçanın mekanik gerilmelere dayanma kabiliyetini hesaplamının ötesinde, sonlu elemanlar metodu yazılımları, mühendislere aşırı ısının etkileri, ısı değişiklikleri, akışkanlar mekaniği ve diğer bilim alanlarında bir nesnenin hacmi ve yüzeyinde oluşacak bütün gerilmeleri tahmin etme olanağı sağlamaktadır. [6]

İdareciler için analiz çalışmaları gereksiz ve anlamsız bir masraf olarak görülebilir. Ancak unutulmamalıdır ki, uygun şekilde hazırlanan bir prototip model pek çok tasarımda büyük çapta zaman ve maliyet azaltma fırsatları sunar. Analizler yoluyla bir sistemdeki hareketli eleman sayısının azaltılması, ürünün planlanan zamandan önce elde edilmesi ve ürünün son kullanıcıya planlanandan daha erken sunulması sağlanabilir. Analizler sonucunda elde edilecek bulgular geri besleme olarak kullanılarak, sistem içerisinde aynı işlevi yüklenebilen daha hafif ve daha ekonomik parçalar imal edilebilir. Analiz işlemleri genellikle bir ürünün performansını artırmak amacıyla yapılmıştır. Örneğin bir ürünün ağırlık ve maliyeti azaltılır, dayanıklılığını artırılırsa daha üstün bir ürün ortaya çıkarılmış olur.

1.5.3 Sonlu Elemanlar Yönteminin Nümerik Analizde Kullanımı

Sonlu Elemanlar Yöntemi sayısal bir yöntem olup, özellikle katı mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı transferi ve titreşim gibi problemlerin bilgisayar yardımıyla çözümünde kullanılan çok gelişmiş bir tekniktir. Sonlu Elemanlar Yönteminde (Finite Element Method (FEM)) modeller sonlu sayıda elemanlara bölünür. Bu elemanlar belli noktalardan birbirleriyle bağlanır, bu noktalara düğüm (node) denir.

Mesela katı modellerde her bir elemandaki yer değiştirmeler doğrudan düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerle ilişkilidir. Düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ise elemanların gerilmeleriyle ilişkilidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi bu düğümlerdeki yer değiştirmeleri çözmeye çalışır. Böylece gerilme yaklaşık olarak uygulanan yüke eşit bulunur. Bu düğüm noktaları mutlaka belli noktalardan hareketsiz bir şekilde sabitlenmelidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi düğüm noktaları için tanımlanmış şartları, cebrik lineer denklemlere çevirir, önce bu denklemler çözülür ve bütün elemanlardaki gerçek gerilmeleri bulmaya çalışır. Sonuç olarak model ne kadar çok sayıda elemana bölünürse o elemente uygulanan yüke göre daha gerçekçi sonuç verir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar çalışırken aşağıdaki işlemleri uygularlar.

1.5.3.1 Parçanın Modelinin Çizilmesi

İlk önce analiz edilecek parçanın geometrik şekli çizilir. Bu ya doğrudan paket programın içinde bulunan araçlar kullanılarak klavye ve mouse yardımıyla

çizilir yada AutoCAD, Solidworks ve ANSYS Workbench gibi bir tasarım programıyla katı model çizilerek yazılım programı içine aktarılır.

1.5.3.2 Eleman Tipi ve Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Daha sonra yazılım programına malzeme özellikleri girilir. Mesela elastik bir analiz için isotropic malzeme özelliklerinden elastikiyet modülü, Poison oranı ve yoğunluk gibi özellikler girilir. Daha sonra çizilen model için kullanılacak elemanların özellikleri belirlenir.

1.5.3.3 Sınır Şartlarının Belirlenmesi ve Diğer Etkilerin Belirtilmesi

Bir sonraki adımda programa modelin sınır bölgelerindeki koşullar girilir. Ayrıca varsa model üzerindeki diğer etkiler belirtilir. Mesela katı mekaniği için destek noktaları ve yük uygulama noktaları belirtilir.

1.5.3.4 Modele Ağ Örne

Eleman özellikleri belirlendikten sonra, model küçük elemanlara bölünür. Yani model ağ durumuna (mesh) getirilir. Burada önemli olan seçilen eleman kullanılarak modelin nasıl daha iyi küçük parçalara bölüneceğidir. Bazı paket programlar bunu otomatik olarak yapmaktadır. Mesela I-deas ve Ansys paket programları mesh üretimini otomatik olarak yapabildiği gibi kullanıcıya da ağ yapısı üretme imkanı tanımaktadır. Ayrıca program otomatik olarak ürettiği ağ yapısı üzerinde kullanıcının değişiklik yapmasını desteklemektedir.

1.5.3.5 Çözüm

Sonraki aşamada daha önceden girilen parametrelere göre problem çözümlenir.

1.5.4 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Geçmişte Yapılmış Çalışmalar

Yüksek karbonlu C70S6 çeliğinin kontrollü kırılmasında lazerli geçiş çentiği etkisi adlı araştırmada, kırılabilirliği artırılmış bir yüzeyde CO₂ ve diyot lazer kullanarak kırma çentiği gibi davranacak bölge oluşturması üzerinde çalışılmıştır. Çalışma sonucunda *lazerle açılmış çentiklerin kırılma üzerinde önemli etkilerinin olduğu* tespit edilmiştir. [7]

C70S6 malzemesinden imal edilen biyel kolunun kırılmasında lazerli çentik açma üzerine işlem parametreleri adlı çalışmada sonlu elemanlar metodu ile lazerli kırılma başlangıç çentiklerinin kırılmaya etkileri simülasyon ortamında incelenmiştir. *Sonlu elemanlar metodu* ile yapılan çalışmaların gerçek deneylerle yapılan çalışmalarla uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu konuda yapılacak çalışmalarda sonlu elemanlar yönteminin güvenilir ve ekonomik olduğu belirtilmiştir. Çalışmada başlangıç çentiğinin (SN-starting notch) öneminden bahsedilmiş, çentiğin kırılmanın kalitesini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Çentik derinliğinin az olması kırılma kuvvetinin fazla olmasına, bu da biyel kolu üzerinde deformasyonun aşırı fazla olmasına neden olmaktadır. Çentik derinliğinin fazla olması ise imalatın daha ileriki aşamalarını olumsuz olarak etkilemektedir. Bu yüzden ideal çentik derinliğinin 0,1-0,4 mm aralığında olmasının en uygun değer olduğu sonucuna varılmıştır. [8]

Biyel kollarını kırarak ayırma metoduyla üretirken kullanılacak malzemenin özellikleri önemlidir. Malzeme, kırılarak ayrılma minimum deformasyona uğramalı, çok yoğun, gevrek ve işlenebilirliği çok iyi olmalıdır. Kırarak ayırma işleminde en önemli etkenlerden biri de kırılmanın başlangıç noktasını tespit için, açılan çentiğin görevidir. Broşlanmış çentiklerde, çatlaklar önce stres konsantrasyon faktörünün etkisi ile oluşur ve radyal basınç etkisi ile dışarıya doğru ilerleyerek büyük parçanın tamamen kırılmasına neden olur. Bu nedenle açılacak çentiğin büyüklüğü, şekli ve yeri kırılma kalitesini doğrudan etkiler. Yüzey sertleştirilmiş biyel kollarının kırarak ayrılmasındaki gelişmeler isimli araştırmada, bu tür üretimde kullanılan malzemenin sertliğinin yüzeyden derinliğe doğru değişim gösterdiği, merkeze yaklaştıkça daha az sert ve daha az kırılğan olduğu tespit edilmiştir. Biyel kolunun üretim maliyetini düşürmek için **kırarak ayırma** metodu çok ciddi şekilde hesaba katılmaya başlanmıştır. Kırarak ayırma yönteminde başlık kısmı ve biyel kolu dövülerek tek bir parça halinde üretilmekte, baş kısım iç çapında açılan bir çentikle çatlak başlangıç noktası oluşturularak tek bir darbe ile kırılmaktadır. Sonuçta kırılan iki parçayı tekrar birleştirmek için yapılan imalat işlemlerinin pek çoğuna gerek kalmamakta, çünkü kırılan yüzeyler birbirine mükemmel şekilde oturmaktadır. Bu şekilde hem işçilikte hem de işlem prosesinde büyük tasarruf sağlanmaktadır. JIS SCM420 çeliği de biyel kolu imalatında kullanılmaktadır. Bu çeliğe karbürizasyon yöntemi ile yüzeyden 0,5 mm. derinliğe kadar karbürleme uygulanmakta, neticede

800 MPa' a kadar çıkan bir yorulma dayanımı elde edilmektedir. JIS SCM420 çeliğinde sertlik yüzeyden derinliğe doğru azalmakta, bu yüzden tam gevrek kırılma elde edilememektedir. Bu da ayrılma yüzeylerinin tam olarak birleştirilememesi anlamına gelmektedir. Bunu engellemek için birleşme yüzeyindeki çatlakların oluşumunun nedenleri incelenmiş ve oluşan boşlukların önlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu sorun sıcaklık ve birim uzama (strain) parametreleri ile çalışan düşey bir kırma makinesi modellenmesi ile aşılmıştır. Bu çalışmada non-lineer (doğrusal olmayan) bir yöntem olarak "Explicit metod simülasyonlu çok yüksek hızda darbe fenomeni", analiz yazılımı olarak LS-DYNA v960 modülü kullanılmıştır. Simulasyonda ilk hız olarak 650 mm/s. ve 200 kg.lık bir kütle kullanılmış, yerçekimi kuvveti 9800 mm/s. alınmıştır. Değişken olarak sünek-gevrek geçiş çizgisi alınmıştır. Sonuçta çatlak başlangıç noktaları gerilim yığılmasını önlemek için kaldırılarak tekrar simültine edildiğinde kırılma sonrası meydana gelen küçük çatlakların ve boşlukların önleniği görülmüştür. Bu da istenilen bir gevrek kırılma yüzeyidir. Daha sonra aynı boyutlarda bir biyel ile deneysel olarak da işlem gerçekleştirilmiş, 800 MPa değerinde yorulma dayanımı ve ağırlıkta % 30 azalma elde edilmiştir. SCM420 karbürü çeliği 2003 yılından beri Yamaha motorsikletlerinde kullanılmaktadır. [9]

Yüksek mukavemetli C70S6 ve SMA40 çeliklerinin biyel kolunda kullanılması uygulaması ve yorulma özellikleri isimli araştırmada, bu çeliklerin ortalama yorulma ömrünün sırasıyla 140,200 ve 168,700 devir, yorulma limitlerinin 432 ve 437 Mpa olduğu tespit edilmiştir. Biyel kolunda en önemli mukavemet kriteri yorulma dayanımıdır. Burada karşımıza *fretting korozyonu* tabiri çıkar ki, temas eden iki yüzey arasında sürtünme nedeniyle oluşan bir aşınma vardır ve bu aşınma genel olarak mekanik malzemelerin tekrarlı ve birbirlerine göre çok az genlikte hareketleri neticesinde meydana gelir. Bu çalışmada C70S6 ve SMA40 çeliklerinin yorulma dayanımları fretting korozyonu oluşma durumunda incelenmiş, her iki malzemede de yüksek yorulma dayanımı (432 MPa ve 437 MPa) görülmüştür. Fretting korozyonu oluştuğunda ise yorulma dayanımında önemli bir düşüş yaşandığı tespit edilmiştir. [10]

Shenoy ve Fatemi de biyel kolu imalatı ve maliyetin düşürülmesi isimli araştırmada, biyel kolunda tasarım ve imalatında en belirleyici faktör olarak yorulma

dayanımını göstermişlerdir. Ayrıca, eğilme gerilmesi, atalet kuvvetleri ve diğer eksantriklikleri azaltmak için malzeme kesit modüllerinin (section modules) yüksek olması gerektiği sonucuna varmışlardır. Maliyeti düşürmek için malzeme özelliklerinde değişiklik yapmışlar, bu yolla C-70 çeliği kullanarak malzeme ağırlığında % 10, maliyetinde % 25 azalma sağlamışlardır. [11]

Bir dizel motor biyel kolunun sonlu elemanlar metodu ile analizi isimli araştırmada çalışan bir motorun sınır koşullarındaki dinamik değişikliklerin geleneksel yöntemlerle yapılmasının imkânsızlığı temel alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle model bir çalışma yapılmıştır. Titreşim özellikleri ve titreşim frekans dağılımlarını elde etmek için bilgisayar destekli olarak oluşturulan model kullanılmıştır. CAD yazılımı ile biyelin fiziksel modeli elde edilmiş, sonra Hyperworks ve MSC Nastran yazılımları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle deney modeli oluşturulmuştur. ADMS/View yazılımıyla parçanın eğilebilir, dinamik modeli oluşturulmuş, motorun en yüksek yanma basıncı ve atalet kuvvetleri altında biyel kolunun yorulma gerilmesi değerleri ölçülmüştür. Sonuçta biyel üzerindeki en yüksek yüklerin biyelin her iki ucundaki birleşim noktalarında olduğu tespit edilmiştir. Yöntem teorik gerçeklerin tasarım üzerinde uygulanmasında ve farklı model geliştirmede yenilik getirmektedir. [12]

Kırarak ayırma yöntemiyle V-Ti-N mikroalaşımli çeliklerden imal edilen biyel kollarının mikroyapı ve mekanik özellikleri isimli araştırmada malzemenin mekanik özellikleri optik mikroskop, SEM ve TEM mikroskopları kullanılarak incelenmektedir. Sonuçlar bu çeliğin iç-yapısının *ferrit ve perlitten* oluştuğunu göstermektedir. Son haddeleme ısısını düşürerek ve haddelemeden sonra soğuma hızını artırarak orta karbonlu V-Ti-N alaşımli çelikte çok iyi granül yapıda ferrit ve dar lamelar boşluklu perlit elde edilebilmektedir. Bu uygulamalar akma mukavemetini 750 Mpa, gerilme mukavemetini ise 1000 Mpa'nın üzerine çıkarmaktadır. [13]

Ogwuagwu biyel kolu olarak kullanılan alüminyum çubuğun kırılma özellikleri çalışmasında Nijerja'da kullanılan tarım makinelerindeki motorlar için alüminyum alaşımli olarak ima edilecek biyel kollarının sonlu elemanlar yöntemiyle simülasyonunu yapmış ve sonuçların olumlu olduğunu göstermiştir. Nijerya'daki kişi başına düşen gelirin düşük olması tarımı çok ekonomik olarak yapmayı

gerektirmektedir. Tarım makinelerinde kullanılan malzemelerin maliyeti doğrudan üretim maliyetine yansıdığından bu araştırmadan elde edilen bulgular kendi alanında büyük önem taşımaktadır. [14]

Biyel kollarına su verme işlemi yoluyla çatlaklardan kaçınmanın simülasyonu ve mekanik özelliklerin artırılması konulu bir araştırmada, yüksek performanslı dizel motor biyel kolları üzerindeki çalışma yükü fazlaysa biyel kolunun mekanik özelliklerinin kritik bir hal alacağı tespit edilmiştir. Çelikten imal edilen bir parçaya su verme işlemi uygulandığında, belirli mekanik özelliklerin soğuma ısısının altında elde edilmesi gereken yerlerde *martenzitik dönüşüm* başlar. Bu esnada yüzeyde oluşan gerilme, çatlak oluşma eğilimiyle beraber artar. Parça, soğutma ortamından öyle kritik bir zamanda çıkarılırsa, içerden yüzeye transfer edilen ısı sayesinde yüzeyde oluşacak gerilme ve çatlamlar bertaraf edilebilir. Böyle bir fikrin devamında, parçanın soğutma sıvısından çıkarma zamanına karar vermek için su verme işleminin simülasyonu yapılır. Parçanın mekanik özellikleri artırılırken yüzeyde çatlak oluşma riski de ortadan kaldırılmış olur. Sonuç olarak, biyel kolları 840⁰C'ye kadar ısıtılmış, sonra yağda veya %14'lük PAG çözeltisi içinde hızlı soğuma işlemine tabi tutulmuş ve en sonunda 550⁰C'de 4 saat boyunca temperlenmiştir. Parçalar sıcaklıkları 100⁰C'nin altına düşünce soğutucu ortamdaki çıkarılmıştır. %14'lük PAG çözeltisi içerisinde bekletme zamanı hesaplama yoluyla tespit edilmiştir. Araştırmanın sonunda endüstriyel ortamda en uygun su verme şartlarını elde etmek için soğutma yağının ısı transfer katsayısı ve %14'lük PAG çözeltisinin su verme kapasitesi ölçülmüştür. Biyel koluna su verme işlemi sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiştir. Hesaplanan bekletme zamanına göre dökülen biyellere %14'lük PAG çözeltisi içinde su verilmiş ve ortaya çıkan mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulandan daha iyi olduğu görülmüştür. Bu esnada çatlak oluşumunun da tamamen ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Bu da göstermektedir ki, simülasyon yoluyla hesaplanan değerler pratikteki değerlerle uyum sağlamaktadır. [15]

Bariani ve Bruschi C70S6 biyelerinin dövme sonrası soğutma ve dövme işleminin modellenmesi hakkındaki makalelerinde nümerik ve deneysel olarak biyel kolu imalatındaki teknikleri karşılaştırmışlardır. Çalışmanın nümerik analizi

safhasında, deformasyon aşamaları ve soğutma fazı 2 ve 3 boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. [16]

Jaju ve Charkha dört zamanlı tek silindirli motor biyel kolu modelleme ve analizinde malzeme ve maliyet ayarlaması adlı araştırmada biyel kolu statik yük gerilme analizi ve ağırlık tasarımı konusunda çalışmışlardır. Dört zamanlı tek silindirli benzinli bir motor biyel kolunun sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılmıştır. Öncelikle CAD Pro/E Wildfire 3.0 yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle uygun bir model çizilmiştir. Daha sonra verilen yükleme koşullarında ANSYS Workbench 9.0 yazılımı kullanılarak model üzerinde oluşan Von Misses gerilmeleri hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ve yük analiz sonuçlarındaki gözlemlere dayanarak malzeme optimizasyon çalışmasında kullanılacak en uygun yük seçilmiştir. Sonuçlar çok eksenli gerilme derecesinin tayininde ve yorulma gerilmesinin hesaplanması için yorulma modelinde de kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada dinamik şartlar uygulanmamıştır. [17]

Gangwani ve Metkar biyel kolunun sonlu elemanlar yöntemi ve bilgisayar destekli modellenmesi konusundaki çalışmada Mahindra marka traktörün DI modelinde oluşan gerçek bir problemi ele almışlardır. Çalışmada biyel kolunun krank ile uyumsuz çalışmasının nedenlerini tespit için önce Pro/ Wildfire 4.0 yazılımı, sonra da sistemin simülasyonu için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Araştırma sonucunda mevcut motorun biyel kolunda oluşan Von Misses gerilme değeri 258 Mpa olarak gerçekleşirken, bilgisayar destekli olarak oluşturulan optimum tasarım modelinde aynı çalışma koşullarında 136 Mpa'lık bir gerilme değerinin optimum gerilme olması öngörülmektedir. Ayrıca söz konusu motorun piston, krank mili ve krankı içinde benzer modellemeler bilgisayar destekli olarak yapılmış ve ihtiyaç duyulan gerilme değerlerinin çok daha düşük değerler olduğu tespit edilmiştir. [18]

Biyel kolunun optimum şekilde tasarlanabilmesi ancak biyel kolunun çalışma şartlarının ve kol üzerine binen yüklerin çok iyi şekilde analiz edilmesiyle mümkün olabilir. Shenoy ve Fatemi biyel kolarındaki yük ve gerilmelerin dinamik analizi isimli çalışmalarında biyel kolunun dinamik analizini yapmışlar, deneysel verilerle kıyaslandığında bilgisayar destekli analizden daha verimli sonuçlar almışlardır. Çalışmada yakıt tasarrufunun önemi üzerinde durulmuş ve uygun biyel

kolu imalatının yakıt tasarrufu sağlamada kritik bir önemi olduğunu belirlenmiştir. [19]

Biyel kolu imalatında sıcak şekil verme işleminin 3 boyutlu simülasyonu konulu başka bir araştırmada, *dövme işleminin tüm aşamalarını sonlu elemanlar yöntemiyle simüle edilmiştir*. Çalışma sonunda deneysel ve bilgisayar destekli olarak elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. [20]

Wang ve He Çin’de biyel kollarının dökülmesindeki gelişmelere bir bakış isimli araştırmada, otomobil ve motosiklet endüstrisindeki biyel kolu iç-yapı kalitesi ve hassasiyetine olan talepteki artışla beraber, hassas döküm teknoloji ve ekipmanlarındaki yenilikleri incelemişlerdir. Başlıca gelişmeler otomatik besleme ve ısı kontrol sistemlerindeki yeniliklerdir. Bu teknoloji 3-boyutlu CAD/CAM uygulamalarının kalıp döküm, kesme, darbeli şekillendirme ve kalibrasyon işlemlerinin yanında çapraz haddeleme, haddeleme ve hassas döküm ekipmanlarını kapsamaktadır. Otomatik parça kesme ve besleme, bir titreşim kabı ve servo kontrollü bir haddeleme aparatıyla yapılır. Kesilmiş parça bir indüksiyon ısıtıcısına önceden ayarlanmış bir besleme zamanında verilir. İnfrared kamera ve üç yönlü bir ayırma aletiyle ısıtıcının çıkışındaki parça ısı kontrol edilir. Sadece önceden ayarlanmış uygun ısı sınırlarındaki parçaların ön işleme operasyonuna geçişine izin verilir. Parçaya uygulanan sıkı ısı kontrolü, yüksek iç-yapı kalitesi elde edilmesi ve döküm sonrası ısı işlemlerinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca makalede VeraCAD yazılımı uygulamalarının tasarım zamanı, yatırım ve kullanılan malzeme miktarında büyük tasarruf sağladığı belirtilmektedir. Hassas döküm işlemlerinde hidrolik çekiçler kullanılmaktadır. Burada biyelin ebatsal uygunluğu döküm kalıpları yoluyla sağlanmaktadır. Biyelin uzunluk yönünde normal toleransı $\pm 0,3$ mm, buna karşılık eninde ise 0,4 mm olarak ayarlanmaktadır. CA488 ve Jetta gibi motorlarda kullanılan hassas biyel kolları bu yöntemle hidrolik çekiçler kullanılarak imal edilmektedir. [21]

Motor biyel kollarının baş kısmına takılan vidada kaynaklanan yorulma konusunda yapılan çalışmada, yenileştirilen bir motorun 6 ay sonra tekrar büyük arıza vermesinin kökündeki sebep araştırılmıştır. Biyel kolu vida sökümü izlemeye alınmış ve seçilen parçalar laboratuvar ortamında analize tabi tutulmuştur. İncelemede her dört biyel kolu vidasından birinin yorulma kırılması sonucu hasara uğradığı tespit edilmiştir. Daha sonra diğer vidalar üzerinde çalışılmış ve bir vidanın da gerilme

testleri yapılmıştır. Bu sırada bir vidanın normal tork rahatlamasına uğradığı yani yalama olduğu tespit edilmiştir. Burada da, analitik kırılma mekaniği yaklaşımıyla bağlantılı olarak biyel kolu vidalarındaki çatlak başlatıcı yorulma ve sıkma kuvveti arasındaki bağıntıyı ortaya çıkarmak hedeflenmiştir. Araştırma sonucunda elde edilen bulgularla muhtemel arızaları önlemek için bazı önemli tasarım yeniliklerine ulaşılmıştır. [22]

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Deneysel Çalışmaların Amacı

Motor biyel kollarının başlık kısmının kırılmasının sonlu elemanlar yöntemiyle analizinin yapılabilmesi için öncelikle kırma işleminin deneysel yöntemle nasıl yapıldığı incelenmiş ve bu konuda uzman firmalarla irtibata geçilerek genel fikir oluşturulmuştur. Oluşturulan genel fikir ışığında kırma aparatı tasarlanmış ve hidrolik pres vasıtasıyla kırma işlemi tek darbeye başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte elde edilen bulgular kayıt altına alınarak deneyler farklı ısıl işlem yöntemleri uygulanan biyel kolları üzerinde yenilenmiş ve farklı bulgular elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar ışığında elde edilen farklı sertlik değerleri ile çekme ve akma gerilmeleri daha sonra yapılan bilgisayar destekli analiz çalışmalarına da temel oluşturmaktadır.

2.2 Deneysel Çalışmalar İçin Malzeme Seçimi

Kırarak ayrılma prosesinde kullanılacak malzeme en az şu özelliklere sahip olmalıdır: Kırılarak ayrılmada minimum deformasyon, yüksek yoğunluk, uygun gevreklik ve yüksek işlenebilirlik. Halihazırda, biyel kollarının kırılarak ayrılma prosesinde toz metalurji malzemeleri, dövme demir, nodüler dökme demir ve yüksek karbonlu düşük alaşımlı çeliklerdir. Ancak pratikte bildiğimiz anlamda düşük alaşımlı karbon çeliklerini kırarak ayrılma prosesinde kullanmak için üretmek mümkün değildir, çünkü bu malzeme çok fazla süneklik ve kırılma esnasında fazla deformasyon gösterir. Plastik deformasyon biyel başlık ve gövdesinin tam olarak birleşmesine izin vermez. Deformasyon ne kadar az olursa klevaj kırılma yüzeylerinin birbirlerine oturması (uyması) o kadar iyi olur. Malzemenin kimyasal yapısı süneklikte çok önemlidir. Örneğin Mn ve N oranının azaltılması ve Si ve V oranının artırılması sünekliğin azalmasına sebep olur. SPLITASCO70 ve SPLITASCO50 (Fransa), S53CVFS ve S50CVS1 (Japonya) ve C70S6BY (Almanya) gibi malzemeler kırılarak ayrılan biyel kolu prosesinde geliştirilmiş olup, kitlesel olarak başarılı bir şekilde imal edilmektedir. C70S6 (Almanya) Jetta-

Volkswagen (Çin’de) arabalarının biyel kolu imalatında kullanılmakta olup, Tablo 2.1’de kimyasal yapısı görülmektedir. Bu çelikte Mn oranı azken, V sünekliğin azaltılması için ve S ise işlenebilirliğin artırılması için eklenmiştir. Yapı perlit ve süreksiz ferrittir. Sertlik 263-310 HB, çekme mukavemeti 900 MPa, akma mukavemeti 520 MPa ve en yüksek uzama oranı ise 10% dur.[23]

Tablo 2.1: Teknolojik biyel kolu çeliklerinin mekanik özellikleri [24]

Malzeme	0,2 % Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)		Uzama %	Havada Su Verme	Kırılarak Ayrılma
	Min	Min.	Max.	Min.		
C45S6	370	630	780	17	+	
VANARD 925	560	850	1000	12	+	
70 MnVS	510	810	970	10	+	+
38MnVS5	580	850	1000	12	+	
C70S6	560	850	1010	10	+	+
FRACTIM	580	850	1000	12	+	+

Biyel kolu üretiminde kontrollü olarak havada su verilen çelikler normal ısı işleme tabi tutulan çeliklerin yerlerini almaktadır. Dizel motorları ve yüksek performanslı benzinli otomobiller için yüksek mukavemet değerli çeliklere gereksinim vardır. Ağırlık ve ambalaj kısıtlamaları nedeniyle yüksek mukavemetli çeliklere olan ihtiyaç büyümektedir. VANARD 925®, çeliği çoğunlukla kullanılan C45S6 çeliğine göre çok daha yüksek mukavemetlidir ve 38MnVS5 çeliğine göre de işlenebilirliği daha iyidir. FRACTIM çeliği de C70S6 çeliğine göre hem maliyet olarak hem de işlenebilirlik olarak daha iyidir [23].

Tablo 2.2: C70S6 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) [2]

% Oran	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ni	Fe
C70S6	0.692	0.182	0.507	0.02	0.064	0.114	0.042	0,060	Kalan

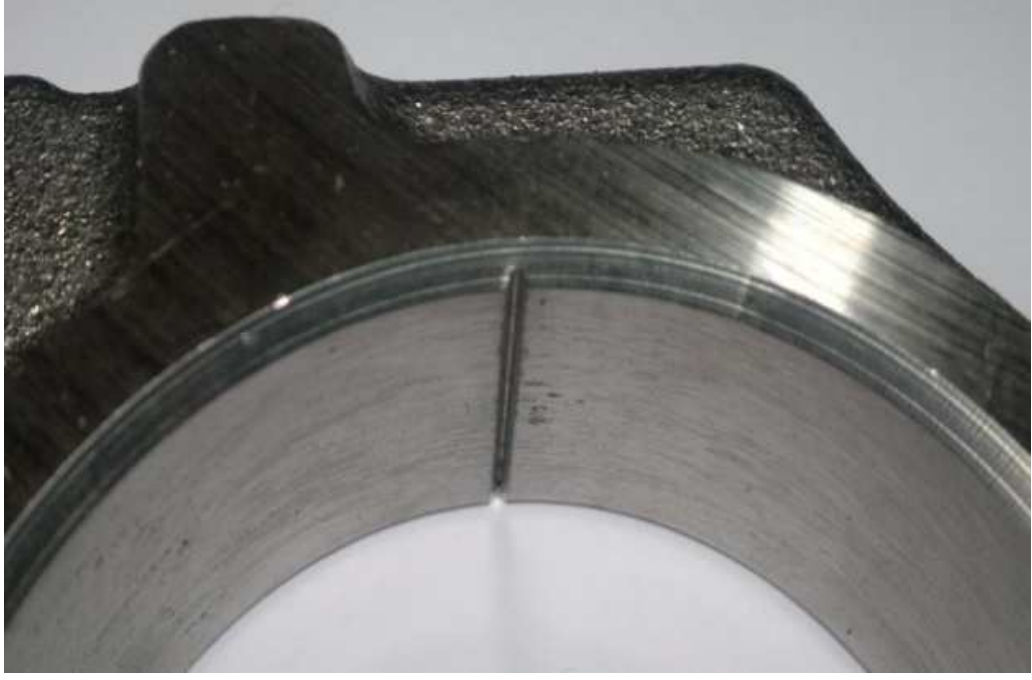
Tablo 2.2'de verilen değerler incelendiğinde kırma deneylerinde C70S6 eliğinin S (kükürt) oranı diğerlerinden daha fazla olup (%0,064), tek darbeli kırmada gevrek bir kırılmaya imkan vermektedir. Bu nedenle deneylerde perlitik yapıdaki C70S6 eliğinin kullanılması ve tüm ısıl işlem uygulamalarının bu elik çeşidi üzerinde uygulanmasına karar verilmiştir.

2.3 Biyel Kolu Kırma Deneyleri

Kırılabilir C70S6 eliğine (Resim 2.1) başlangıç entiklerinden (Resim 2.2) tek darbeli yük ile kırma testi uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan eksantrik hidrolik pres ve kırma işlemini sağlayan aparat resimleri Şekil 2.3'te görölmektedir.



Resim 2.1: C70S6 kırılabilir biyel kolu



Resim 2.2: Başlangıç çentiği (C70S6 biyel kolu)

Deneyleerde biyel kolunu iki parçaya bölmek için kullanılan yük ani ve tek darbede uygulanmıştır. Yük ve hız değışkenleri sırasıyla 1600 kN ve 330 mm/s olarak alınmıştır. Başlangıç çentiği çatlağın ilk başladığı noktadır ve kırık oluştuktan sonra da her iki yüzey birbirine mükemmel şekilde oturmaktadır (Resim 2.4-5). Deneyleer sonunda mükemmel bir tek darbeli kırılma elde edilmiştir. Başlangıç çentik derinliği arttıkça kırma basıncının azaldığı tespit edilmiştir. 0,1-0,4 mm. çatlak derinliğinin en uygun çatlak derinliği olduğu da yapılan deneyleelerde ispatlanmıştır.[2]

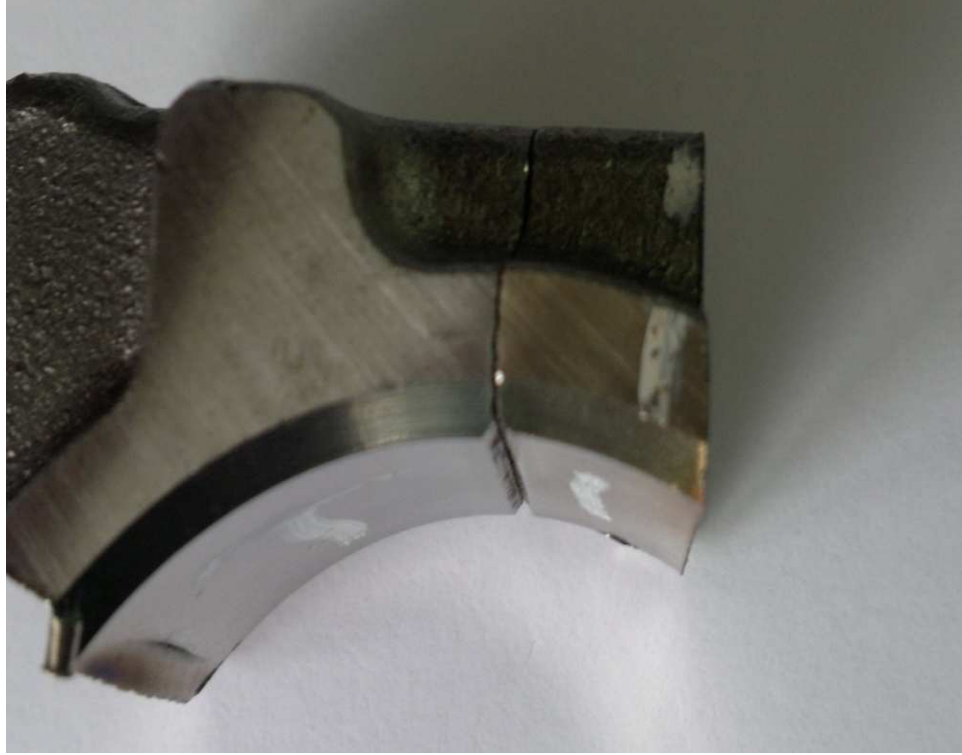


Kırıcı takım konik şekilde tasarlanmış, deformasyona uğramayacak malzemeden seçilmiştir.

Resim 2.3: Kırarak ayırma deney aparatı ve kırıcı uç



Resim 2.4: C70S6 kırılma sonrası yüzeyler



Resim 2.5: C70S6 Kırılma sonrası yüzey birleşimi



Resim 2.6: C70S6 Biyel kolu sertlik analizinde kullanılan yüzey

Deneysel safhada en önemli detaylardan biri kırılacak biyel kolunun Y-ekseninde tam olarak sabitlenmesidir. Sabitleme işleminden sonra 160.000 kg. kuvvetlik basınç kırıcı konik takım üzerine uygulanarak kırıcı ucun biyel kolu baş kısmının içerisinden geçirilmesine çalışılır. Kırıcı takımın şekli konik ve ilk girişte biyel kolu baş kısmının çapından dar, ilerleyen safhada ise çaptam daha geniş olmasından dolayı çapların eşitlendiği noktada stres yoğunlaşması başlaması hedeflenmiştir. Kırıcı takımın sertliğinin biyel kolundan çok daha fazla olmasına özen gösterilerek kırıcı takımda deformasyon oluşmaması sağlanmıştır. Kırma deneyinde uygulanan tek darbeli ani kuvvetin ivmesi 330 mm/s olarak verilmiştir.

Deneysel çalışma sonunda kırılan yüzey Nikon MA 100 Metal Mikroskop ile incelenmiş, kesilen numune parçaya kimyasal analiz ise BAIRD DVG Spektrometre ile yapılmıştır. Son olarak parçanın sertlik testi Brinell sertlik ölçme cihazı ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo 2.3'te gösterilmiştir. [25]

Tablo 2.3: Deneylerde kullanılan C70S6 çeliğinin mekanik özellikleri [23]

σ Akma [MPa]	σ Maksimum [MPa]	Sertlik [HRB]	% ϵ Uzama
560	850	280	10

Deneyin başlangıç safhasında darbeli yükün uygulanmasıyla kırıcı takım biyel kolu başlık kısmının içinden geçmeye çalışır. Ancak kırıcı takımın çapının biyel kolu başlık kısmı çapıyla eşitlendiği noktada biyel kolu başlık kısmının iç çapı boyunca stress yoğunlaşması başlar. Bu yoğunlaşma arttıkça biyel kolu baş kısmı başlangıç çentiklerinden ani şekilde ayrılır ve burada Resim 2.4'te görülen pürüzlü yüzeyli kırık oluşur. Çatlak ilerlemesi başlangıç çentiklerinin etkisiyle düzgün ve doğrusal şekilde gelişerek gevrek ve iki taraflı bir kırılmayla sonuçlanır. Deney boyunca tek taraflı kırılmayı engellemek amacıyla biyel kolunun başlık kısmı biyel kolu baş kısmının çapından %1 daha geniş olarak imal edilen bir kalıp içerisine yerleştirilir. Bu sayede istenmeyen bir sonuç olan tek taraflı kırılmadan kaçınılmış olur. Aksi halde yapılan deney anlamsız, sonuçların ise bilimsel olarak kullanılamaz olması kaçınılmaz olacaktır.

Deneylerin her bir aşamasının bitiminde JEOL/JSM-6510 LV scanning electron microscopy (SEM) cihazıyla ayrıca yüzey analizleri yaptırılarak kırılma yüzeyleri incelenmiştir. SEM analizleri de açıkça göstermiştir ki, kırılma yüzeyleri kırılğan, granül şekilde ve mikroyapıda perlit ve dendritik yapıda ferrit kalıntıları bulunmaktadır. Parça üzerinde neredeyse yok denecek kadar az malzeme kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapının çoğunlukla iyi-lamelar perlitten oluştuğu ve yapının süreklilik arz ettiği de tespit edilmiştir. [25]

2.4 Optimizasyon Çalışmaları

Başlangıç kırma deneylerinin bitirilmesini müteakip deneylerde kullanılan biyel kollarına çeşitli ısıl işlemler uygulanmış ve biyel kollarının iç yapıları değiştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Burada optimum biyel kolu malzeme bileşimi ve ısıl işlem sonucu iç yapıda oluşan yeni sertlik, akma ve kopma gerilmesi değerlerinin tespit edilmesi hedeflenmiştir.

Perlitik-ferritik yapı elde etmek için biyel kolu 800°C'ye kadar ısıtılarak tavllanmış ve ardından havada soğutulmaya bırakılmıştır. (Resim 2.7)



Resim 2.7: Perlitik-Ferritik Yapı

Bu yapıda, mikroyapı çoğunlukla lamelar ve sferoid kaba perlitten oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, yapı içerisinde kalıntı ferrit te gözlemlenmiştir. Sertlik 190 HB olarak ölçülmüştür. Bu yapıdaki bir biyel kolu teknolojik kullanım için fazla yumuşak ve kırma deneylerinde uygulanan darbe etkilerini kaldıramayacak derecede düşük mukavemet değerlerine sahiptir.

Kırma deneyinde kuvvet uygulandığında parçanın çarpılma eğilimi gösterdiği, kırılma başlangıç çentiklerinin uygun şekilde açılmış olmasına rağmen kırılmanın uygun şekilde gerçekleşmediği, ayrıca malzemenin üzerinde kırıcı takım ile temas noktalarında ezilmeler olduğu da gözlemlenmiştir. **Bu yapının biyel kolu imalatında kullanılmasının uygun olmadığı tespit edilmiştir.** Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etme ihtiyacı duyulmamıştır. [26]

Temperlenmiş martenzitik yapı elde etmek için biyel kolu 780°C'ye kadar ısıtılarak östenitleme yapılmış ve ardından 45 dakika suda bekletilmiştir. Sonra tekrar 450°C'de 30 dakika fırına alınmış ve ardından da havada soğutulmuştur.



Resim 2.8: Temperlenmiş Martenzitik C70S6

Bu şekilde elde edilen yapının dönüşmemiş ferrit içeren temperlenmiş martenzit olduğu görülmüş (Resim 2.8), sertlik değeri 306 HB olarak ölçülmüştür. Bu yapının başlangıç deneylerinde kullanılan ve halen üretim sektöründe kullanılan perlitik-yapıdaki C70S6 biyel kolu mekanik değerlerine çok yakın değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen kırılma yüzeyinin de başlangıç deneylerinde kullanılan perlitik yapılu biyel kolu gibi pürüzlü olduğu ve kırılmadan sonra iki yüzeyin birbirine iyi şekilde oturduğu gözlemlenmiştir. **Bu yapının motor biyel kolu imalatında kullanılabilir bir yapı olduğuna karar verilmiştir.**

Martenzitik yapı elde etmek için biyel kolu önce 800°C sıcaklıkta 45 dakika östenitleme yapılmış ve suda soğutularak işlem sona erdirilmiştir. Bu ısıl işlemin ardından yapılan sertlik testinde 352 HB sertlik değeri elde edilmiştir. Mikroyapıda ise ferrit kalıntılarının gözlemlendiği iyi martenzitik bir yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu malzeme ile kırılma deneyleri yapıldığında sertliğin yüksek olmasından dolayı çarpılmadan kaynaklanan süresiz bir kırılma elde edilmiştir. **Bu yapının motor biyel kolu imalatında kullanılmasının uygun olmadığına karar verilmiştir.** Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etme ihtiyacı duyulmamıştır.[27]



Resim 2.9: Martenzitik C70S6 (352 HB)

*Martenzitik yapı elde etmek için ikinci olarak biyel kolu 800°C sıcaklıkta 45 dakika östenitlenmiş ve ardından %10 NaCl çözeltisinde soğutulmuştur. Bu şekilde tam bir kaba martenzit taneli yapı elde edilmiş, ancak ölçülen sertlik değeri 612 HB olmuştur. Yapı fazlasıyla kırılğan şekilde elde edilmiş, ancak deneysel safhada oluşan kırılma yapının aşırı sert olması nedeniyle, başlangıç çentiklerinin kırılma başlatmada etkisiz kalmasına neden olmuştur. Yapılan kırma deneyinde süreksiz bir kırılma gözlenmiştir. İç yapının aşırı derecede sert olmasından dolayı **bu yapının biyel kolu imalatında kullanılmasının uygun olmadığına karar verilmiştir.** (Resim 2.10) Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etme ihtiyacı duyulmamıştır.[27]*



Resim 2.10: Martenzitik C70S6 (612HB)

Isıl işlemler sonucunda motor biyel kolları için en uygun malzemenin 780° C'de Östenitlenip ardından 18°C'lik suda su verilen ve daha sonra 450°C'de 3 saat östenitlenip, sakin havada soğutulmak suretiyle **306 HB sertliğe sahip temperlenmiş martenzitik yapının kırarak ayrılabilen motor biyel kolları için** uygun bir malzeme olduğu tespit edilmiştir. [27] Deneyle sonuçunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4: Deneyle sonuçunda elde edilen mekanik özellikler

Deneyle Parçası Türü	σ Akma [MPa]	σ Maks. [MPa]	Sertlik [HRB]	% ϵ Uzama
C70S6 (Perlitik)	560	850	280	10
C70S6 (Perlitik-Ferritik Yapı) Havada su verilmiş	380	570	190	12
C70S6 (Temperlenmiş Martenzit) Suda su verilmiş	703	1009	306	10
C70S6 (Martenzit) Havada su verilmiş	810	1160	352	7
C70S6 (Martenzit) % 10 NaCl çözeltisinde su verilmiş	1407	2007	612	5

Tablo 2.4'te toplanan akma ve maksimum gerilme değerleri sertlik değerlerinin tecrübî şekilde hesaplanması yoluyla elde edilmiştir. [28]

2.5 Deney Sonuçlarının Kırılma Mekanîği Açısından İncelenmesi

Kırılma mekanîği bir çatlak veya çatlaklığın uygulanan yükler altında nasıl ilerlediğini ve yayıldığını inceler. Bu incelemeye kırılmanın deneysel sonuçları ve nümerik çözümlerin birbirleriyle olan ilişkileri de dahil edilir.

Statik çatlak büyümesi, çatlak ilerlemesinin düzgün, yavaş ve kontrollü olarak oluştuğu denge şartlarında meydana gelen çatlak yayılma türüdür. Yarı-statik çatlak büyümesi kinetik enerji oluşumu olmaksızın gerçekleşir. Bu kırılma türünde kırılan parçalar üzerinde hiç bir gerilme kalmadığında enerji de yavaş yavaş sıfıra iner.

Dinamik çatlak büyümesi bir kinetik enerji üretimi yoluyla oluşur. Çatlak genişletme kuvveti ise yarı-statik çatlak büyümesindeki kuvvetten daha büyük bir kuvettir. Dinamik çatlak büyümesi enerji dengesi bakımından da ele alınabilir. Kırılmanın başlangıcındaki enerji çatlak büyümesi sürecinde artarak devam eder. Kırılma sonucunda ise bu enerji kinetik enerjiye dönüşerek dengeye kavuşur.

Bir çatlak üç farklı şekilde yüklenir. Bu üç yükleme modunun herhangi biriyle lineer davranış gösteren bir malzemede oluşan gerilmeler incelendiğinde, bu gerilmelerin çatlak ucunda sonsuza yaklaştığı görülür. Lineer elastik davranış gösteren bir malzemenin çatlak ucunda oluşan gerilme yoğunlaşmasını tanımlamanın bir yolu K-gerilme yoğunluk faktörüdür. Çatlağın yükleme moduna dayanarak bu işlem I,II,III modlarından biriyle tanımlanır. Mod I çatlak açıklığı metodu, Mod II çatlak ayrılma metodu, Mod III ise çatlak kayma metodu olarak tanımlanır.

K_I sadece kırılan parçanın geometrisine ve onun nasıl yüklendiğine bağlı olarak değişen bir parametredir. K_{IC} (gerilme şiddeti faktörü) gevrek kırılmayı gösteren en önemli büyüklüktür ve Kırılma tokluğu olarak adlandırılır.

Yapılan kırma deneyleri kırılma tokluğu açısından incelenirse malzemenin kırılma tokluğu aşağıdaki şekilde elde edilebilir [29] :

$$K_{Ic} = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2}$$

Burada;

K_{Ic} : Malzemenin kırılma tokluğu ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-3/2}$)

σ : Uygulanan gerilme (N/m^2)

a : Çatlak uzunluğunun yarısı (m)

Eldeki verilerden;

a : 4 mm.

Deneylerde uygulanan kuvvet $F= 100 \text{ Ton}=1000 \text{ kN}$

Uygulanan basınç: $P=F/A$

A : Biyelin kuvvet uygulanan büyük kısmının yüzey alanı

$$A= H.L=28 \cdot (\pi \cdot d) = 28 \cdot \pi \cdot 58 = 5099,36 \text{ mm}^2 = 0,0051 \text{ m}^2$$

$$P = F/A = 1000 \text{ kN} / 0,0051 \text{ m}^2 = 196078 \text{ kN}/\text{m}^2 = 196 \text{ MPa}$$

Bulunan değerleri $K_{Ic} = \sigma \cdot (\pi \cdot a)^{1/2}$ bağıntısında yerine koyarsak;

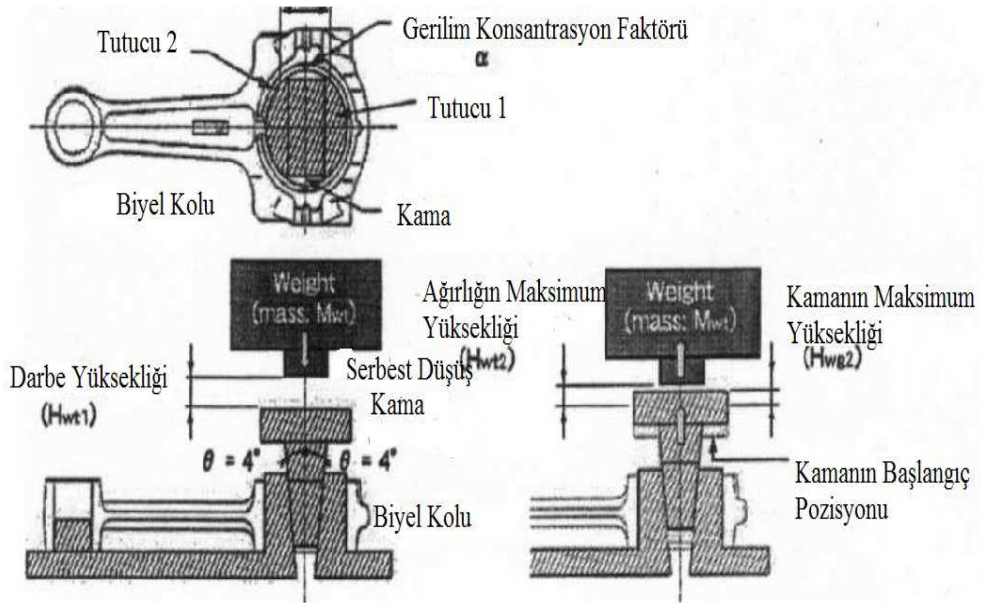
$$K_{Ic} = 196 \cdot (3,14 \cdot 0,004)^{1/2} = 21,96 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-3/2} \text{ elde edilir.}$$

Bu değer akma mukavemeti 580 MPa ve çekme mukavemeti 860 MPa olan yüksek karbonlu ve düşük alaşımlı bir çelik (C70S6) için uygun bir parametredir. Gevrek kırılmanın arzu edildiği kırma deneyi için gerekli şartları sağlamaktadır.

3. BİLGİSAYAR DESTEKLİ NÜMERİK ANALİZ

Deneyel safhada C70S6 çeliğine ait elde edilen tüm veriler, bulgular ve mekanik özellikler ANSYS ve LS-DYNA yazılım programına tanımlanmıştır. Kırılma başlangıç çentiği açılarak ve darbeli yük uygulanarak kırılan biyel kolları ANSYS Workbench R13 yazılımı ile modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak LS-DYNA R7.4 v5838 ile çözdürülmüştür. Oluşturulan sonlu eleman modeli 319547 tetra, 7700 kabuk elemanı ve 66925 düğüm noktası ile ağ yapısına uyarlanmıştır.

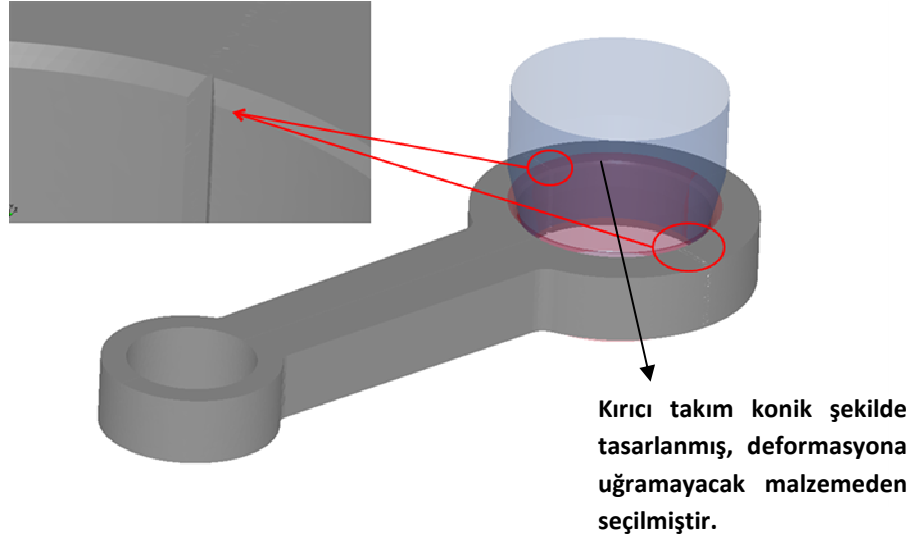
Simülasyon deneylerinde kullanılması planlanan biyel kolu kırma aparatı modeli Şekil 3.2'de görülmektedir.[9] ANSYS ve LS-DYNA yazılımlarıyla yapılan kırma işleminde de bu kırma mantığı esas alınmıştır.



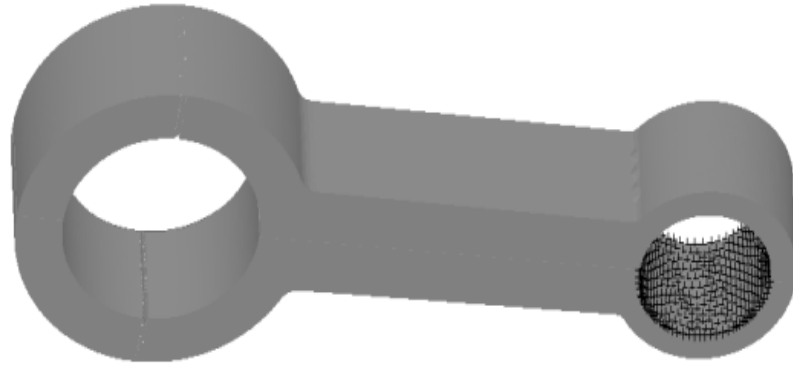
Şekil 3.2: Biyel kolu kırma aparatı modeli [9]

3.1. Simülasyon Modelinin Oluşturulması

Biyel kolunun sonlu elemanlar modeli ANSYS Workbench 13 yazılımıyla tasarlanmıştır. Büyütülmüş kırılma başlangıç çentik şekli Resim 3.1'in sol üst köşesinde görülmektedir. Aynı resmin sağ tarafında ise deneylerde kullanılan C70S6 biyel kolu gerçek görüntüsüne uygun şekilde çizilmiştir. Ayrıca, biyel kolunu kırmak amacıyla kırma deneylerinde biyel kolu başlık kısmının içerisine yerleştirilen kırıcı takım da resimde net olarak görülmektedir. Kırıcı takım deneylerde olduğu gibi sıkıgeçme şeklinde ve biyel kolu başlık kısmının iç çapına tam oturacak şekilde tasarlanmıştır.

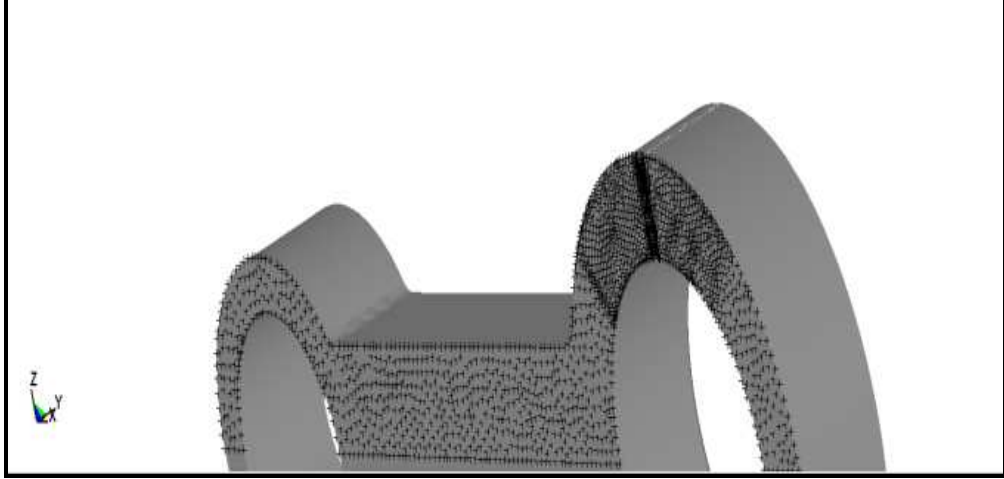


Resim 3.1: Kırılma başlangıç çentikleri ve temas noktaları



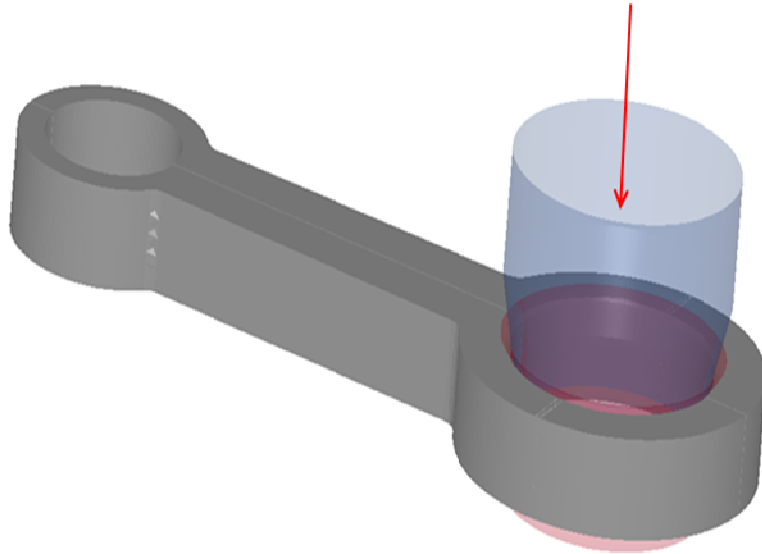
Resim 3.2: Biyel kolu simülasyonunda kullanılan model

Simülasyon deneylerinin tamamında biyel kolunun Y-eksenindeki hareketi biyelin uç kısmından tamamen kısıtlanmıştır. (Resim 3.2) Burada deneysel çalışmalarda yapılan işlemin aynısının simülasyon çalışmasında da simüle edilmesi hedeflenmiştir. (Resim 3.3)

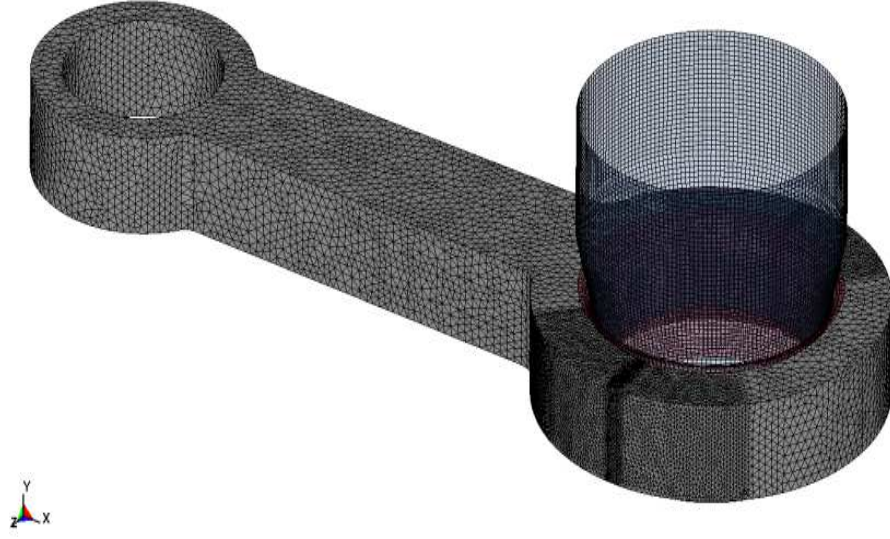


Resim 3.3: Biyel kolu hareketi y-ekseninde kısıtlanmıştır.

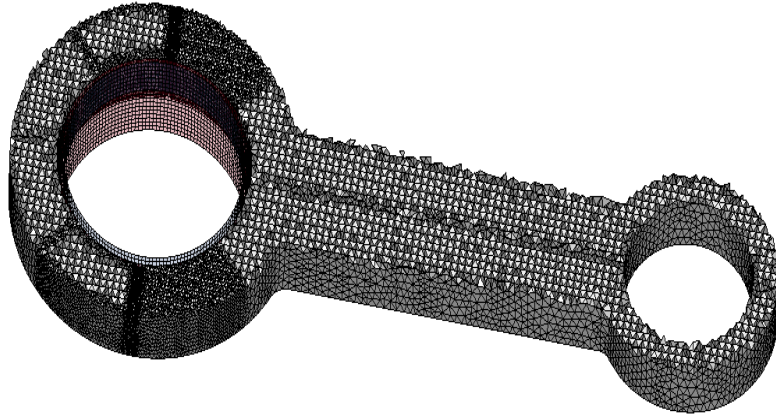
Tasarım tamamlandıktan sonra malzeme seçimi yapılmış ve mekanik özelliklerin yazılıma aktarılması sağlanmıştır. Simülasyon yazılımında kırıcı takıma Y-ekseninde 160.000 kg'lık kuvvet etkisinde 15 mm'lik yer değiştirme tanımlanmıştır. (Resim 3.4)



Resim 3.4: Kırıcı takımın biyel kolu baş kısmına oturtulması



Resim 3.5: Deney safhası öncesi sonlu eleman modeli (1)

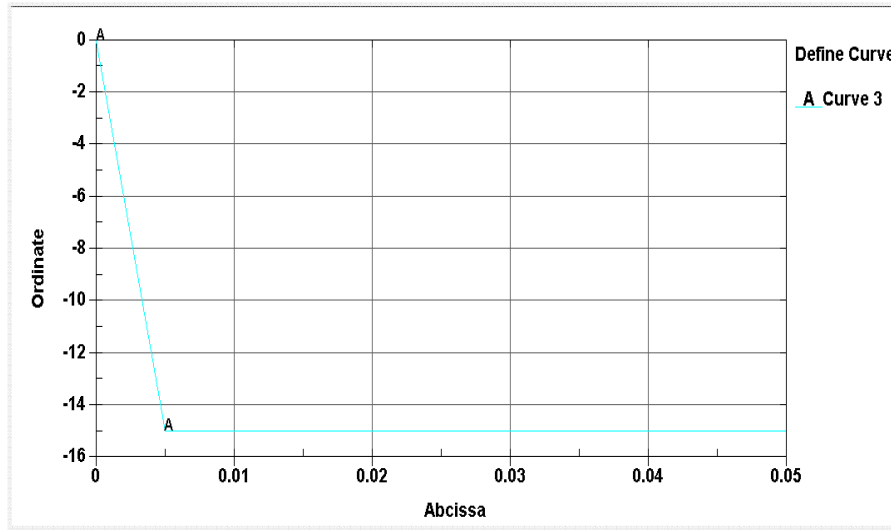


Resim 3.6: Deney safhası öncesi sonlu eleman modeli (2)

Oluşturulan sonlu eleman modeli ANSYS yazılımında 319547 tetra, 7700 kabuk elemanı ve 66925 düğüm noktası ile ağ yapısına dönüştürülmüştür. (Resim 3.5 ve 3.6) Simülasyon uygulamasında gerçek bir malzemedekine benzer düzensizlik yaratılmasını sağlamak için tetra eleman seçilmiştir. Bu sayede kompleks geometriler daha hızlı bir şekilde modellenebilmektedir.

3.2 Sınır Koşullarının Analiz Yazılımında Tanımlanması

Deneysel aşamada elde edilen sınır koşullarının yazılım programında tam olarak tanımlanması hayati öneme sahiptir. Bu bilgilerin LS Prepost programının uygun menü pencereleri kullanılarak yazılım programına adım adım girişi yapılmıştır. Bu bilgiler yardımıyla kırma simülasyon deneyinde tüm parçaların birbiriyle temas etmesi sağlanmaktadır. (Resim 3.7-9)



Resim 3.7: Kırılma için 15 mm yer değiştirme tanımlaması

NewID	RefBy	Pick	Add	Accept	Delete	Default	Done	
<input type="checkbox"/> Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting								
*MAT_MODIFIED_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY_(TITLE) (2)								
TITLE								
<input type="text"/>								
1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	IDEL
	4	7.850e-009	2.000e+005	0.3000000	200.00000	1000.00000	0.1800000	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	YP	EPSTHIN	EPSMAJ	NUMINT
	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0

Resim 3.8: Mekanik özellikler giriş ekranı

Use *PARAMETER (Subsys: 1) Setting

*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_(ID/TITLE/MPP) (1)

CID	TITLE	MPP1	MPP2
0			
IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK
0	200		3
INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMB
2	1.0005		0
UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE
	0	1.0	0
1	SSID	MSID	SSID
0	0	5	0
2	FS	FD	DC
0.0100000	0.0100000	0.0	0.0
3	SFS	SFM	SSI
0.0	0.0	0.0	0.0

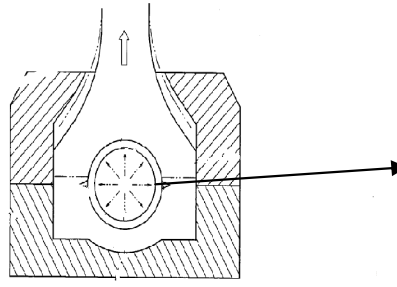
Resim 3.9: Kırma deneyinde tüm parçaların birbiriyle temas etmesi

Simülasyon uygulaması sürecinde, deneysel çalışmalarda elde edilerek Tablo 2.4'te toplanan değerler (Akma ve kopma gerilmesi, sertlik değeri, parçanın uzama yüzdesi vb.) (Bkz. Bölüm 2) sırasıyla yazılım programına malzeme kartlarıyla birlikte yorumlanarak giriş yapılmıştır.

3.3 Bilgisayar Destekli Analiz Sonuçları

Sınır şartları ve deneysel bulguların analiz programına tam olarak girilmesi simülasyon sonuçlarının gerçek deneyle uyumlu olmasını sağlamaktadır. Aksi halde simülasyon deneyi sonuçları eksik veya yanıltıcı olabilmektedir.

Veri giriş işleminin tamamlanmasının ardından sistem LS-DYNA R7.4 v5838 ile çözdürülmüştür. Tek bir simülasyon deneyinin yaklaşık çözüm süresi modern bir bilgisayar yardımıyla 8-24 saat arasında değişmektedir. Simülasyon deneyi başladığı andan itibaren, kurulan düzenekte biyel kolu Y-ekseninde hareket edemezken, kırıcı takım uygulanan 160.000 kg.'lık kuvvetin etkisiyle aynı eksen üzerinde 15 mm aşağı doğru hareket etmeye çalışır. Bu şekilde biyel kolu başlık kısmından geçmeye çalışır.



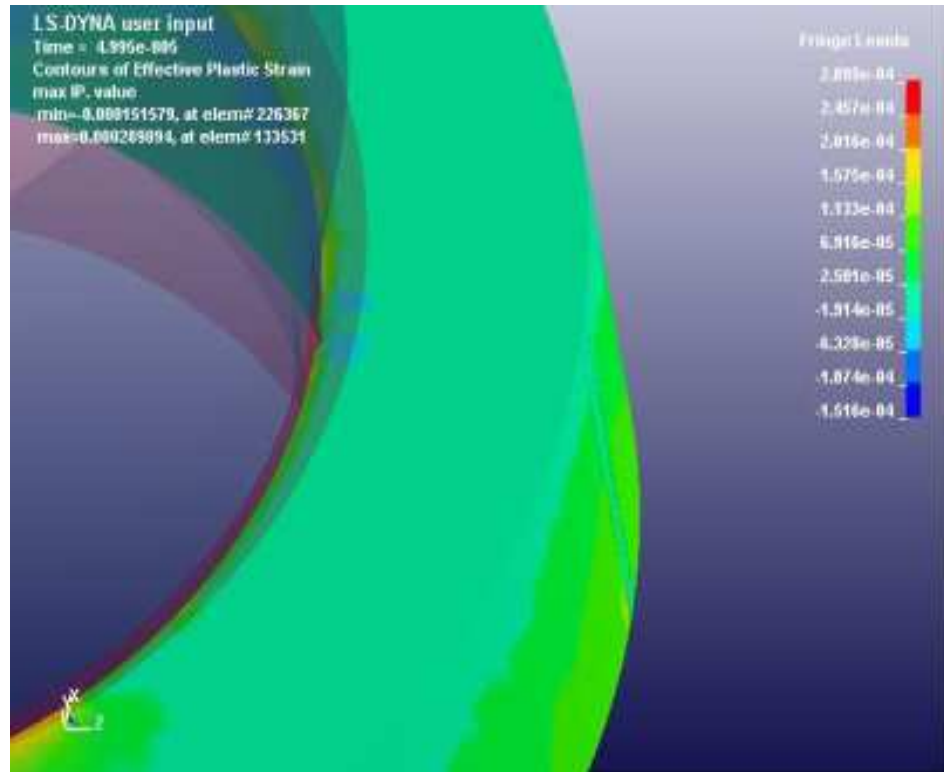
Kırcı takım üzerine uygulanan kuvvet etkisiyle oluşan gerilme eşit şekilde biyel kolu iç çapında dağılmaktadır.

Şekil 3.2: Gerilme yoğunlaşması

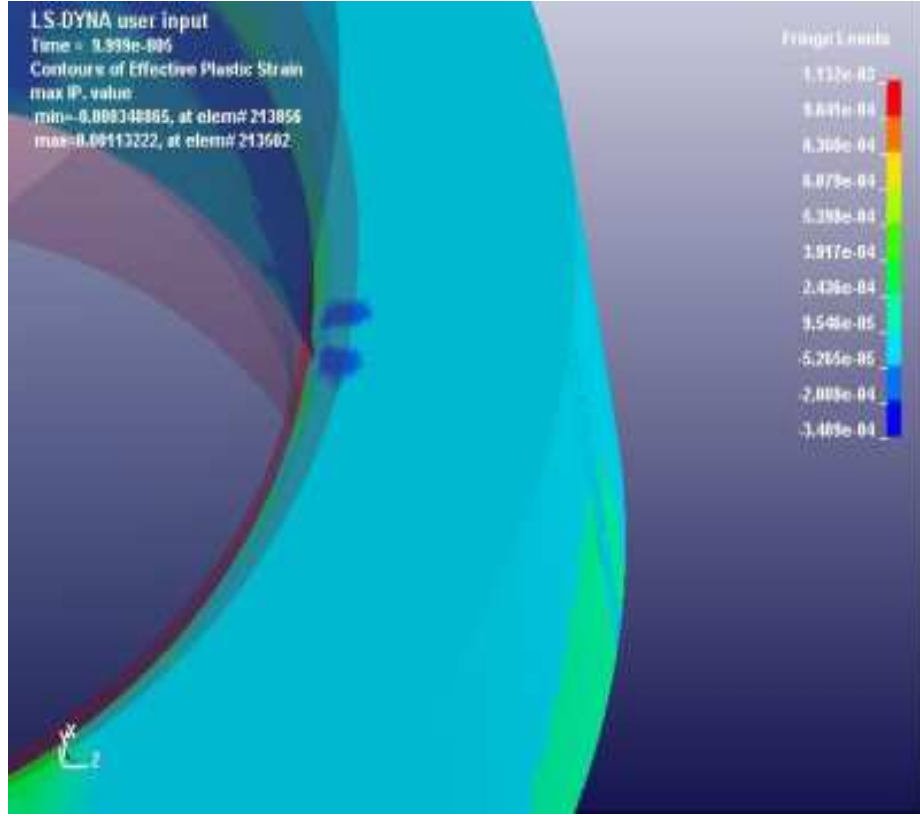
Konik yapılu kırcı takımın çapı ile biyel kolunun iç çapı eşitlendiği andan itibaren, şekil 3.2'deki gibi biyel kolu başlık kısmının iç çapı boyunca gerilme yoğunlaşması oluşur. Oluşan gerilme biyel kolu başlık kısmının iç çapı boyunca eşit olarak dağılır. Bu gerilme yoğunlaşması etkisi artarak devam ettiği için kırılma oluşması kaçınılmaz hale gelir. Gerilme öyle bir noktaya çıkar ki, biyel kolu başlık kısmının mukavemeti bu gerilmeyi kaldıramayacak hale gelir. İşte bu andan itibaren çift taraflı kırılmayı sağlamak üzere tasarlanan kırılma başlangıç çentiklerinde küçük çapta deformasyonlar oluşmaya başlar (Resim 3.10-11) ve bu deformasyonlar önce çatlak başlangıcına (Resim 3.12-13), daha sonra da çatlak ilerlemesine (Resim 3.14-15) neden olarak, sonuçta iki taraflı kırılmayı gerçekleştirir. (Resim 3.16-19)



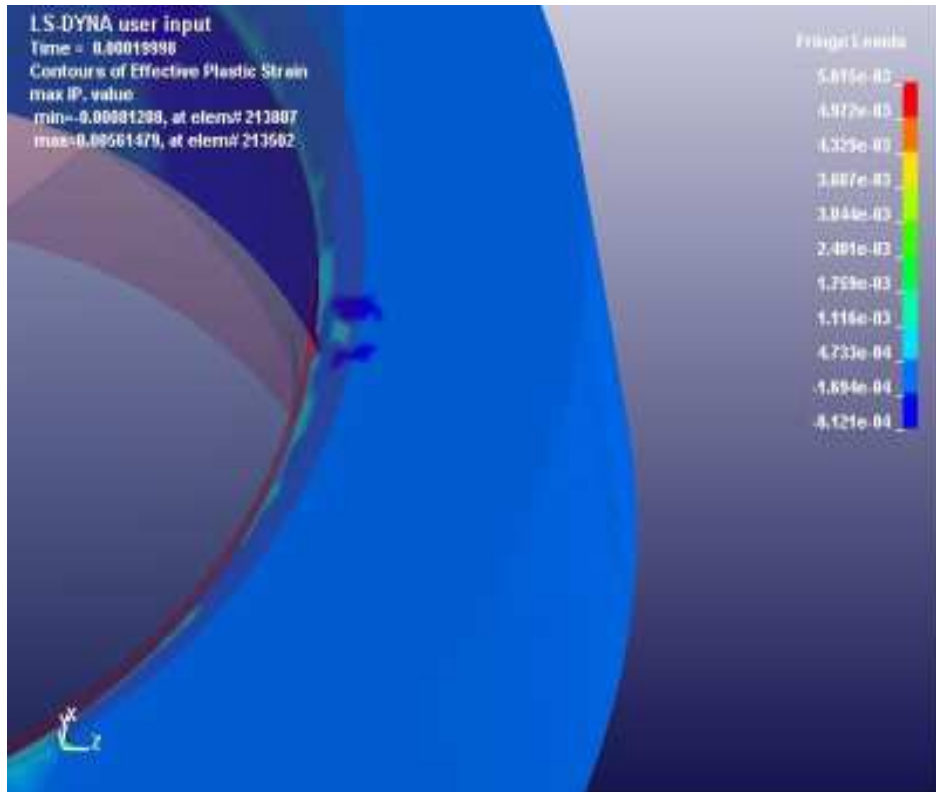
Resim 3.10: Çatlak başlangıcı (1)



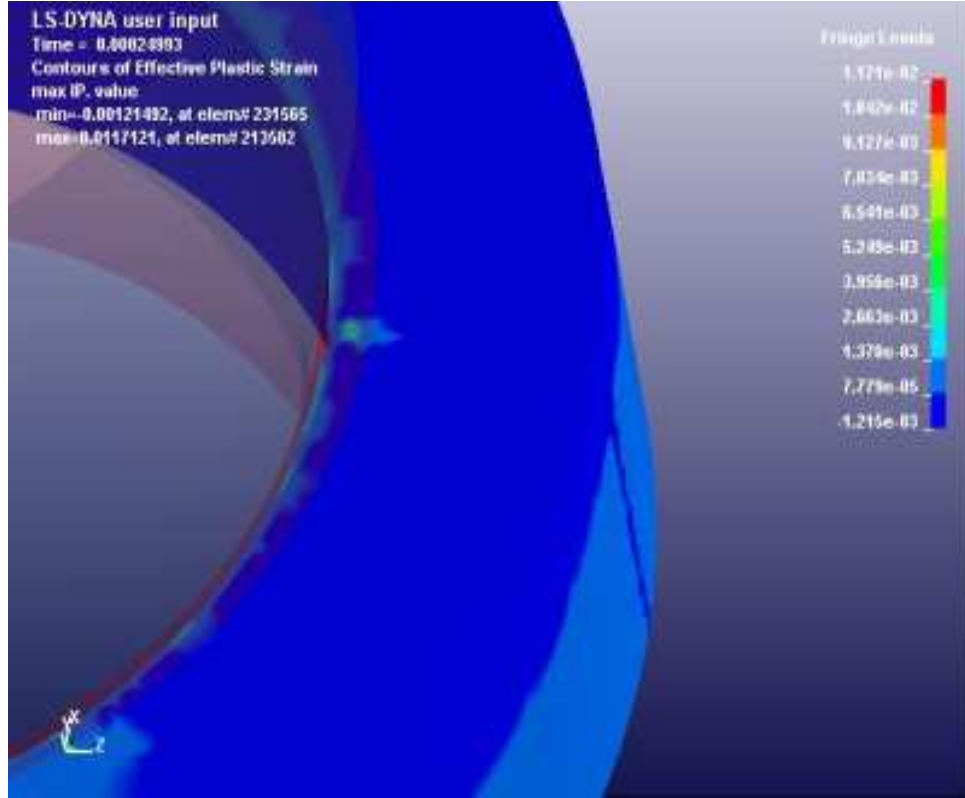
Resim 3.11: Çatlak başlangıcı (2)



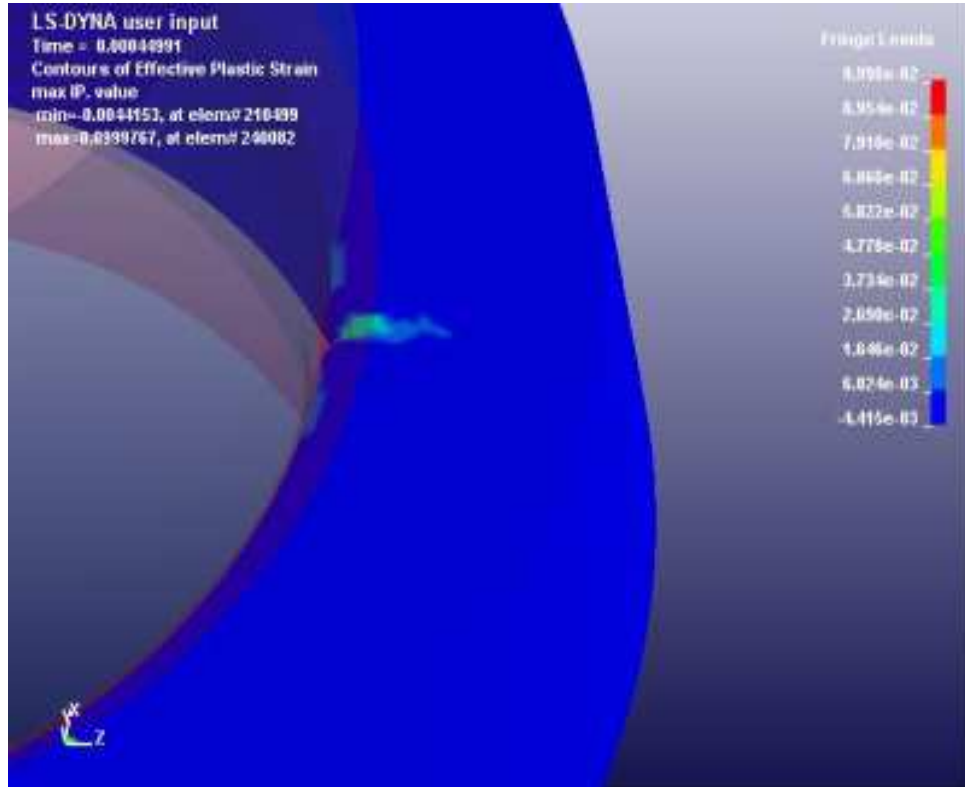
Resim 3.12: Çatlak başlangıcı (3)



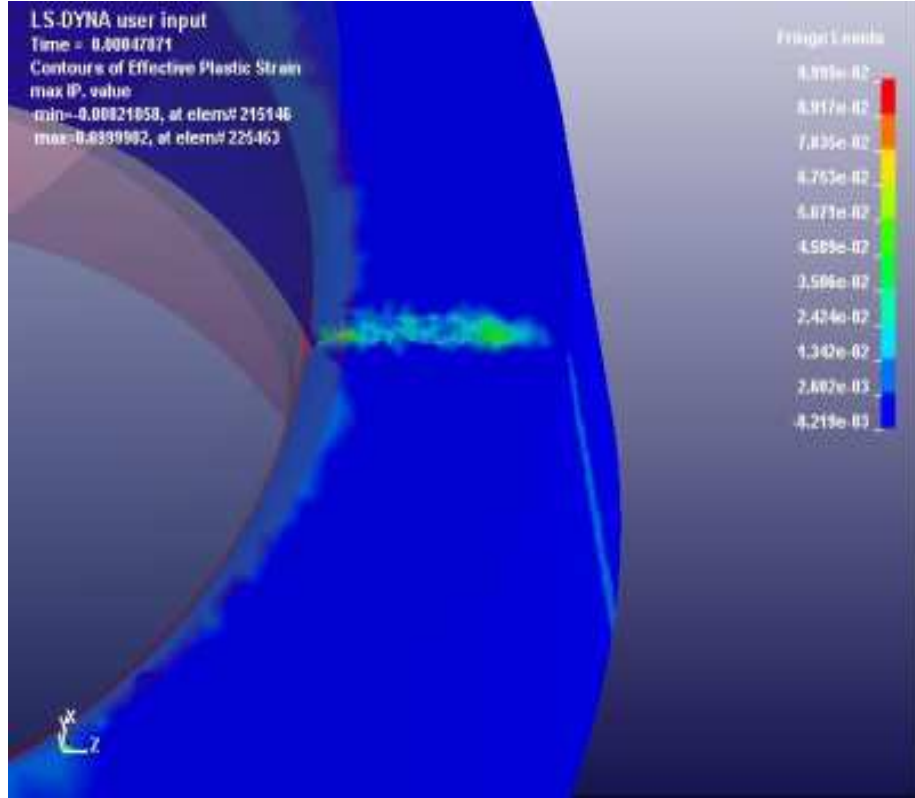
Resim 3.13: Çatlak başlangıcı (4)



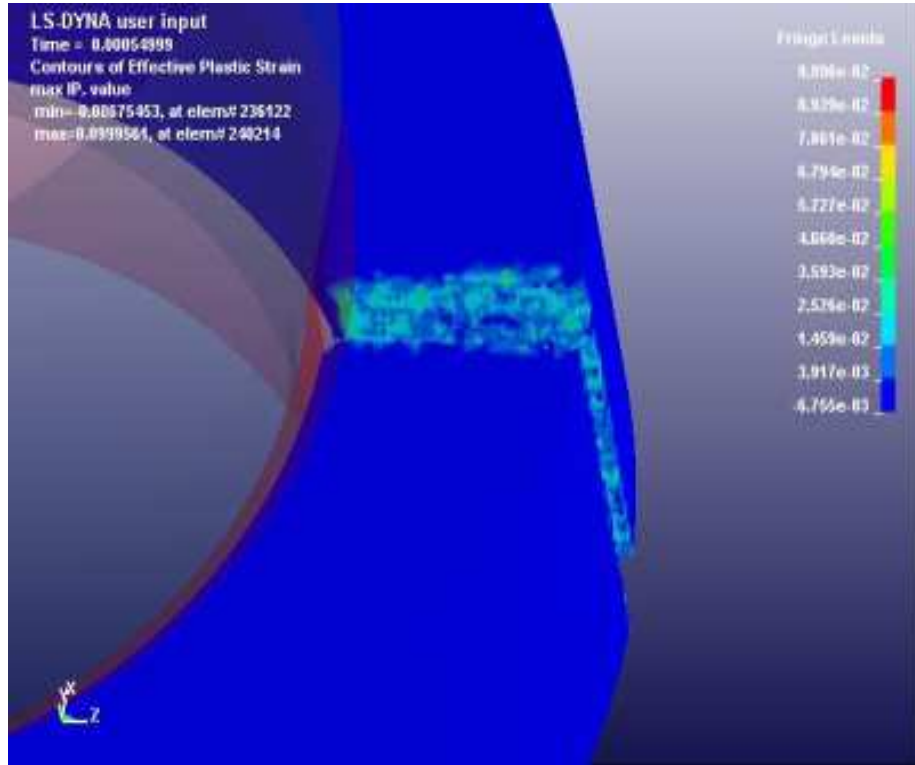
Resim 3.14: Çatlak ilerlemesi (1)



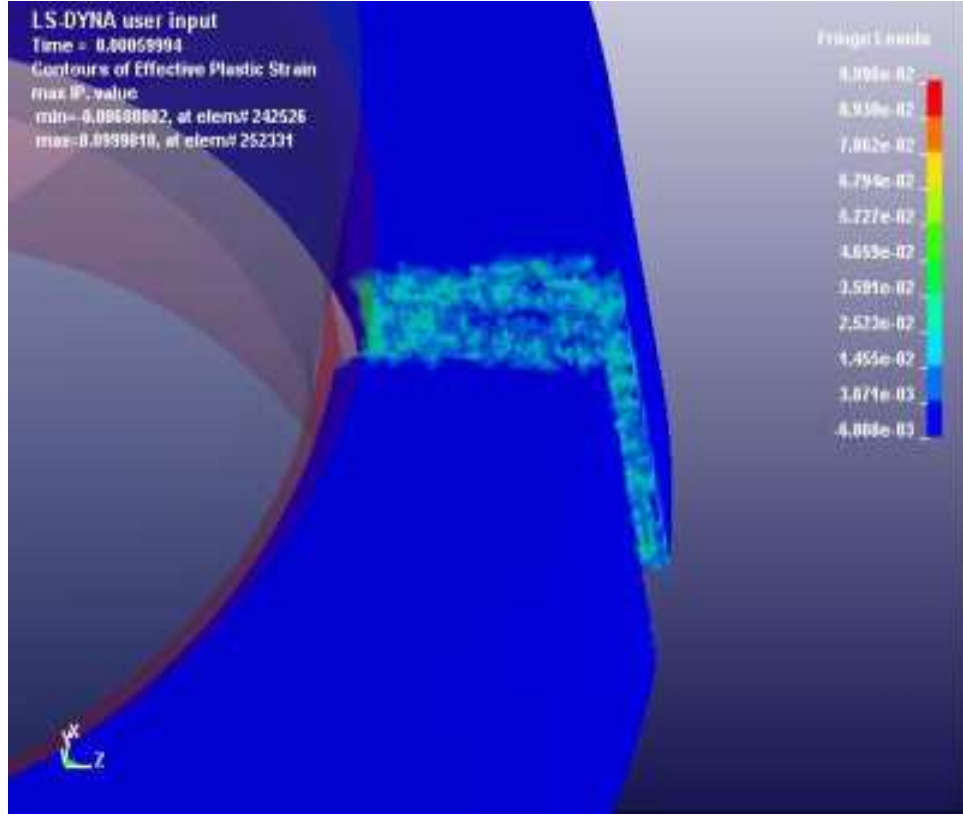
Resim 3.15: Çatlak ilerlemesi (2)



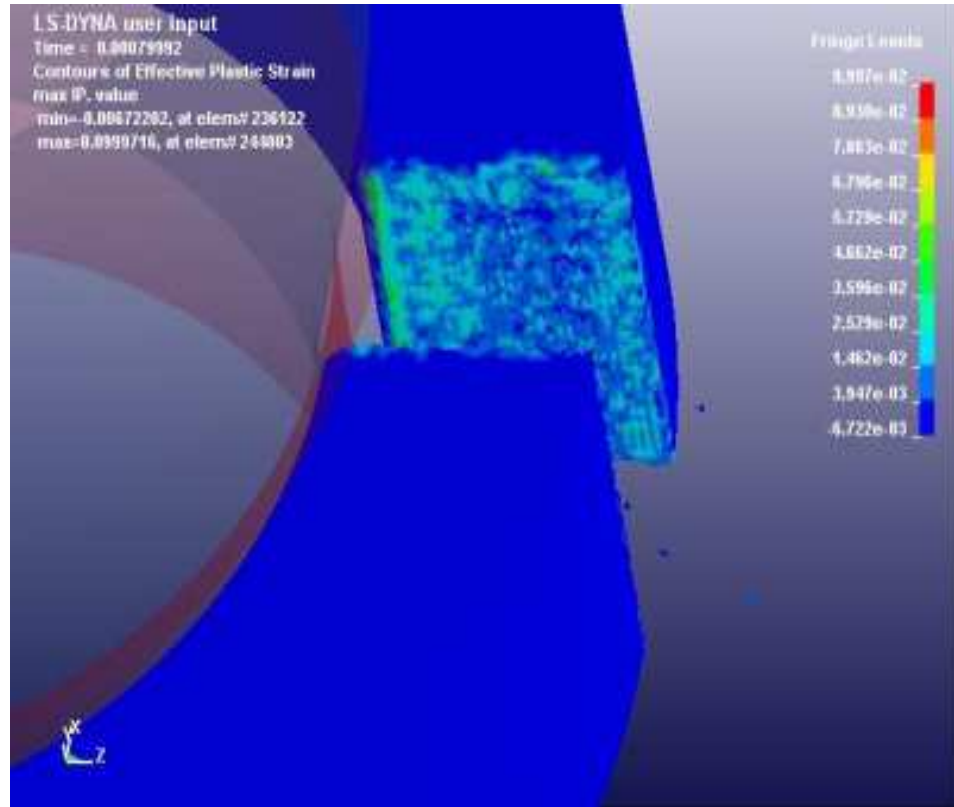
Resim 3.16: Kırılma oluşumu (1)



Resim 3.17: Kırılma oluşumu (2)

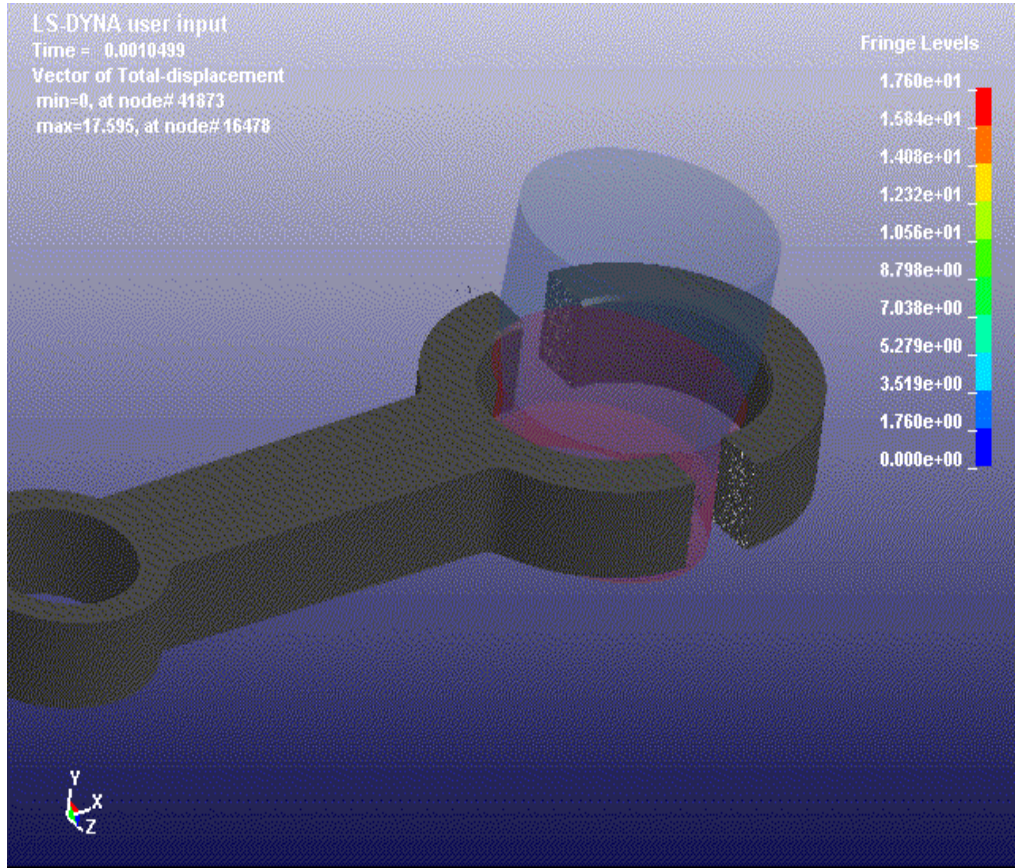


Resim 3.18: Kırılma oluşumu (3)

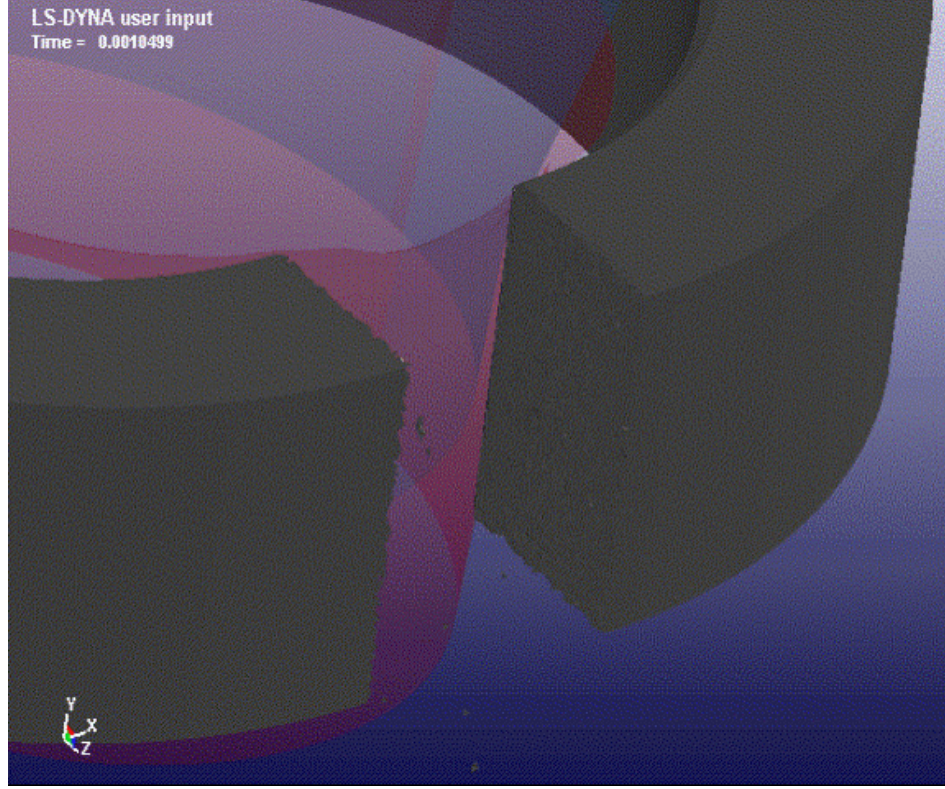


Resim 3.19: Kırılma oluşumu (4)

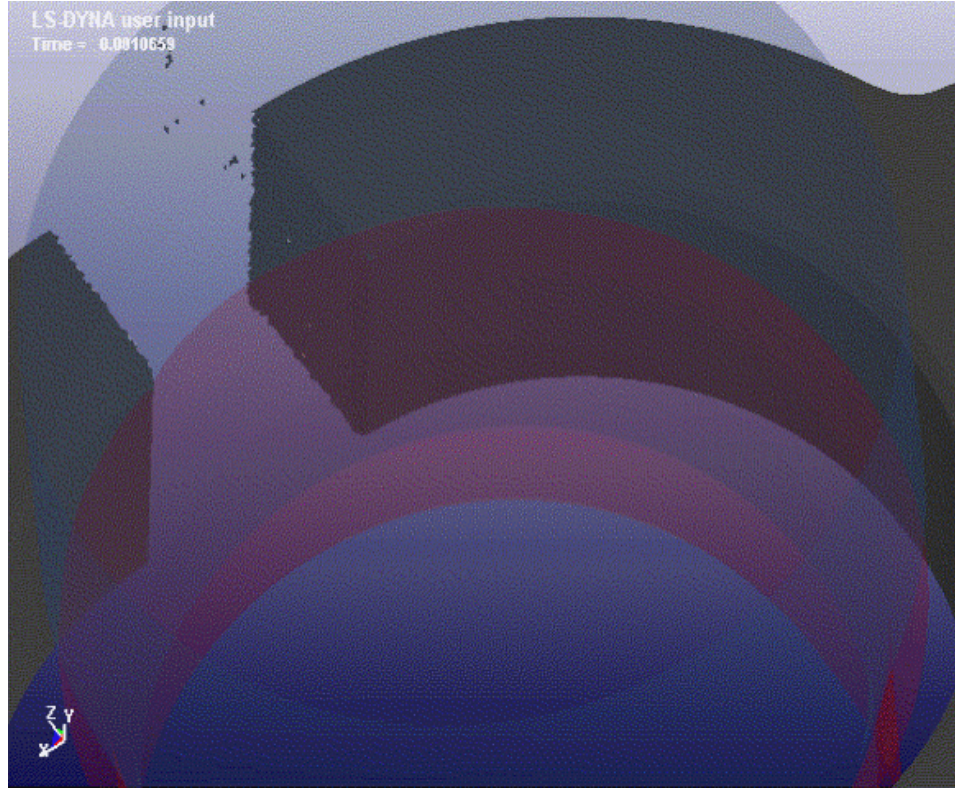
Simülasyon deneylerinin sonunda meydana çıkan kırılma gerçek deneylerde elde edilen bulgularla tıpatıp örtüşmektedir. Kırılma yüzeyleri de aynen gerçek deneylerde olduğu gibi pürüzlü yapıda görülmektedir. Bu bulgu kırılma simülasyonunda kullanılan malzeme bileşimi ve mekanik özelliklerin yazılım programına uygun şekilde giriş ve tanımlama yapıldığını göstermektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda olduğu gibi simülasyon deneylerinde de kırılma ve pürüzlü yüzeyler oluşmuştur. Bu noktada şunu da not etmek gerekir ki, simülasyonda kullanılmak üzere seçilen kırıcı takım malzemesi deneylerde hiç bir deformasyon göstermemiştir. Bu sonucu desteklemek maksadıyla yazılım programının içerdiği fomülasyonlara ilave bir sürtünme katsayısı tanımlanmamıştır.



Resim 3.20: Toplam yer değiştirme vektörü

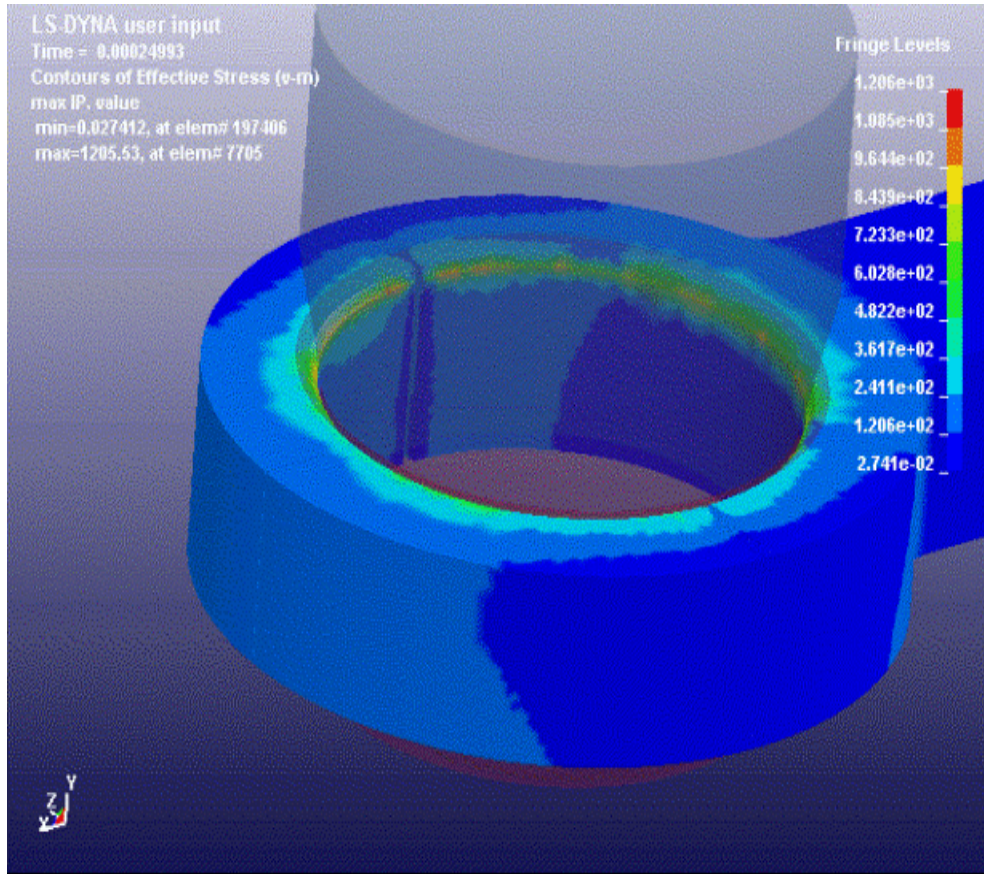


Resim 3.21: Kırılma yüzeyi (1)

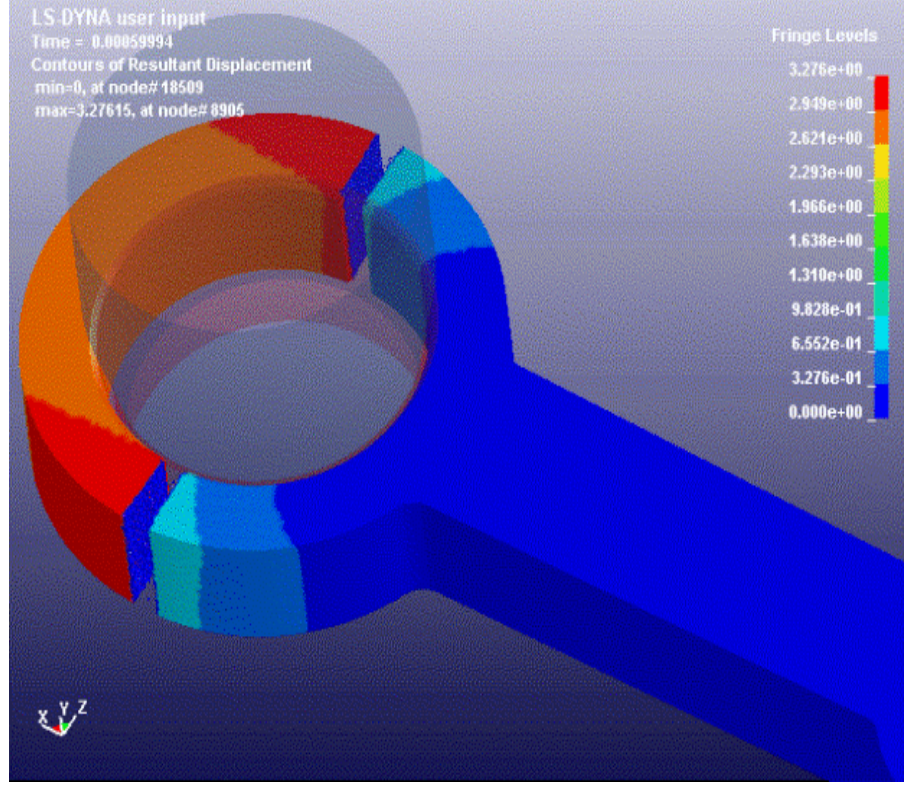


Resim 3.22: Kırılma yüzeyi (2)

Yazılım programına tanımlanan sertlik, uzama yüzdesi, akma ve kopma gerilmesi değerleri ile, programa aktarılan malzeme özellikleri pürüzlü ve gevrek kırılma oluşumunun gerçek nedenini oluşturmaktadır. Bu değerlerin değiştirilmesi sonucunda farklı sonuçlar elde edilebilir. Bu parametrelerin mantıklı oranlarda değiştirilerek simülasyon deneylerinin yenilenmesi neticesinde daha kırılğan ve gevrek kırılma sonuçlarına ulaşılabilir. (Resim 3.20-22) Kırılma meydana geldikten sonra kırılan yüzeyden ihmal edilebilir miktarda malzeme koptuğu da Resim 3.21-22'de görülmektedir. Benzer sonuçlar mekanik deneyler sırasında da gözlemlenmiştir.



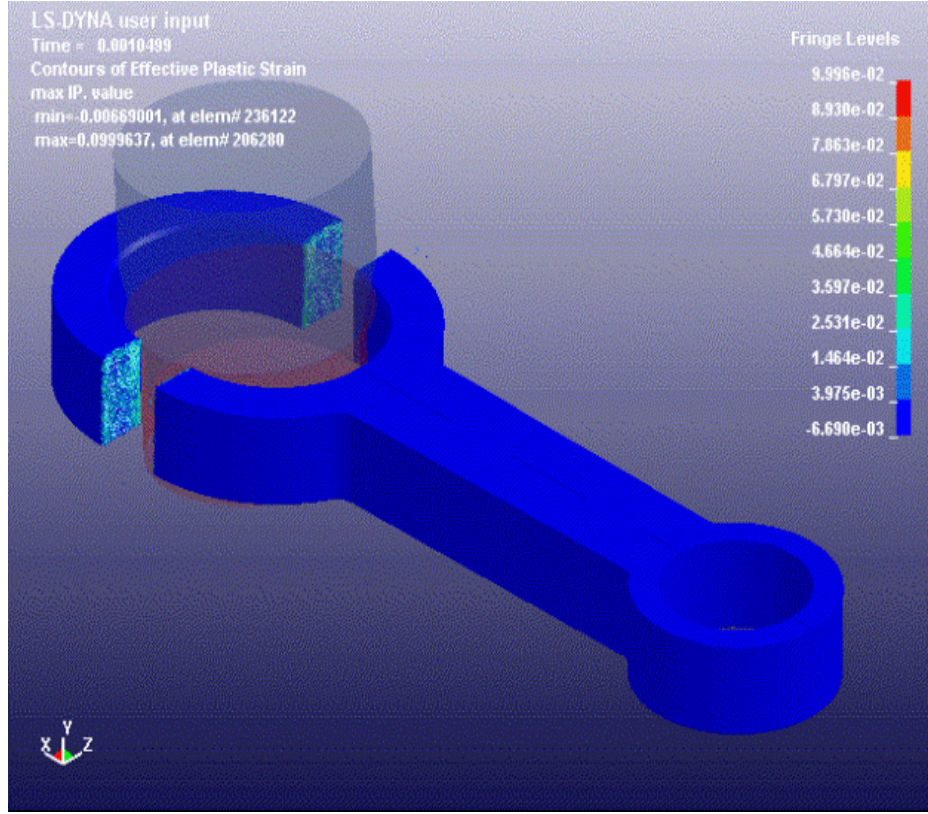
Resim 3.23: Efektif gerilme bölgeleri



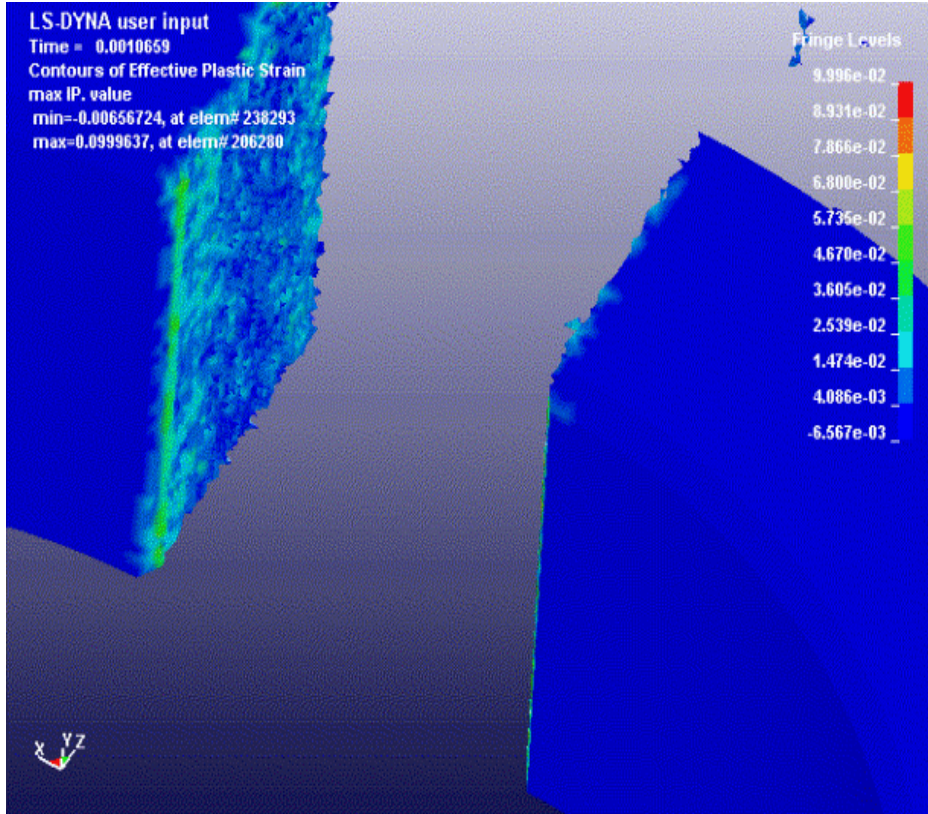
Resim 3.24: Meydana çıkan yer değiştirme bölgeleri

Simölasyon deneylerinde kırıcı takımın aşağı hareketi esnasında biyel kolu başlık kısmında meydana gelen efektif gerilmeler Resim 3.23'te, biyel kolu üzerindeki gerilmelerin malzeme mukavemetini aşması neticesinde oluşan iki taraflı kırılmanın sonucunda oluşan yer değiştirme bölgeleri Resim 3.24'te görölmektedir.

Biyel kolu iç çapının üst kısmında oluşan gerilme değerlerinin yüksek oranda olması, kırıcı takımın ilk anda o bölgede daha baskın olmasından ve başlık kısmının Y-eksenindeki diğer yönde serbest hareket edebilmesinden kaynaklanmaktadır. (Resim 3.24)



Resim 3.25: Efektif plastik gerinme bölgesi (1)



Resim 3.26: Efektif plastik gerinme bölgesi (2)

Deneyler sonucunda ulaşılan bir diğer sonuç ta efektif plastik gerinmelerin meydana geldiği noktalarđır. Resim 3.25-26'da başlangıç çentiğinin bulunduğu noktalarda gerinmelerin en st seviyede oluştuğu grlmektedir. Kural olarak malzemede aktif bir akma varsa, efektif plastik gerinme daha da büyür; yani akma yüzeyinde gerilme durumu oluştuğunda efektif plastik gerinme de artar.

3.4. Deneysel ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

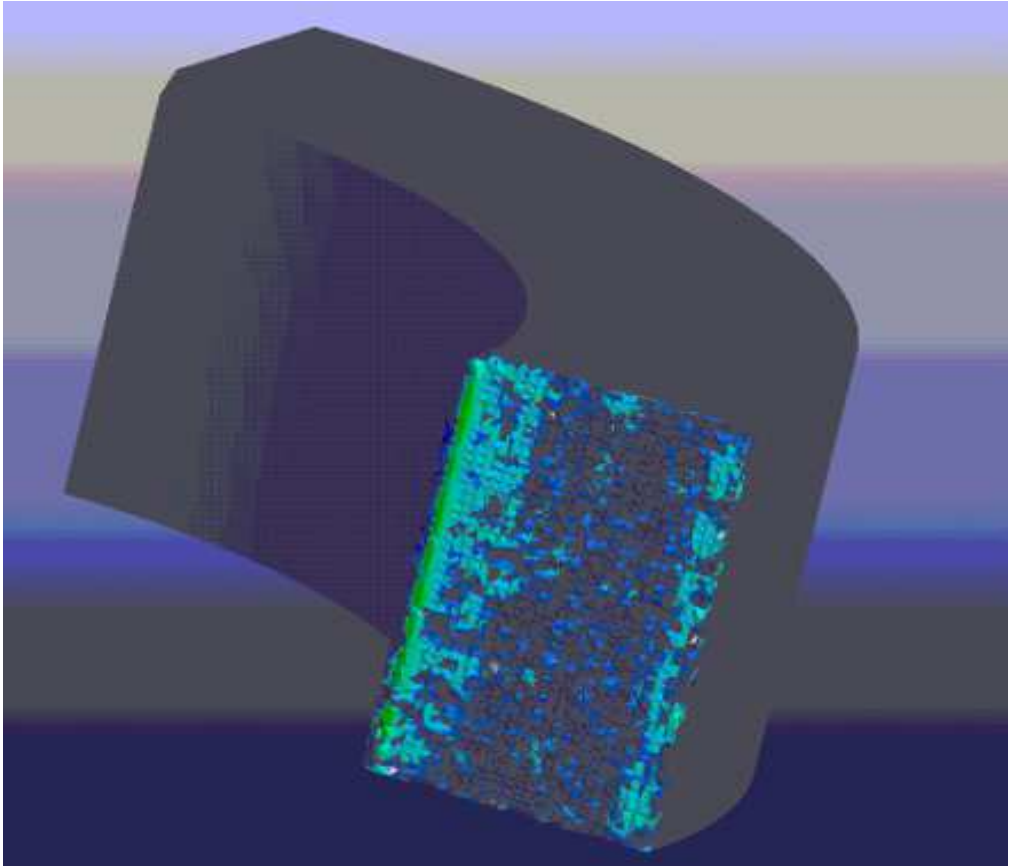
Çalışmanın bu aşamasında Tablo 2.4'te toplanmış olan malzeme mekanik özellikleri yardımıyla, simülasyon ortamında elde edilen yüzeyler ve gerçek deneylerde elde edilen yüzeyler kırılma gerçekleşme zamanları da dikkate alınarak karşılaştırılacaktır. Bölüm 2'de teknolojik olarak kullanılmasının uygun olduğu tespit edilen *Temperlenmiş Martenzitik yapıdaki biyel kolu ile Perlitik yapıdaki C70S6 biyel kollarının* deneysel ve simülasyon analiz sonuçları temelinde ilerleyecektir. Bu malzemelerin kimyasal bileşimlerinin ve ısıl işlemlerle elde edilen mekanik özelliklerin farklı olması kırılma zamanlarının da farklı olarak gerçekleşmesine neden olmuştur. Biyel kollarının sertlik ve tokluk değerlerinin artıp azalması bu sonuca doğrudan etki etmektedir.

3.4.1 Perlitik C70S6 Biyel Kolu Deneysel Bulguları

Resim 3.27-28'de sırasıyla deneylerde ve simülasyon analizlerinde elde edilen yüzeyler grlmektedir. Bu resimlerde kırılma ve gevrek bir kırılma özelliği gözlemlenmektedir. Yapı kırılma ve sürekli olarak gerçekleştiğinden yüzeylerin birbirine oturması da başarılı şekilde gerçekleşmektedir. Resimlerdeki yüzey pürüzlülüğü yapının kırılma bir hal aldığını göstermektedir.



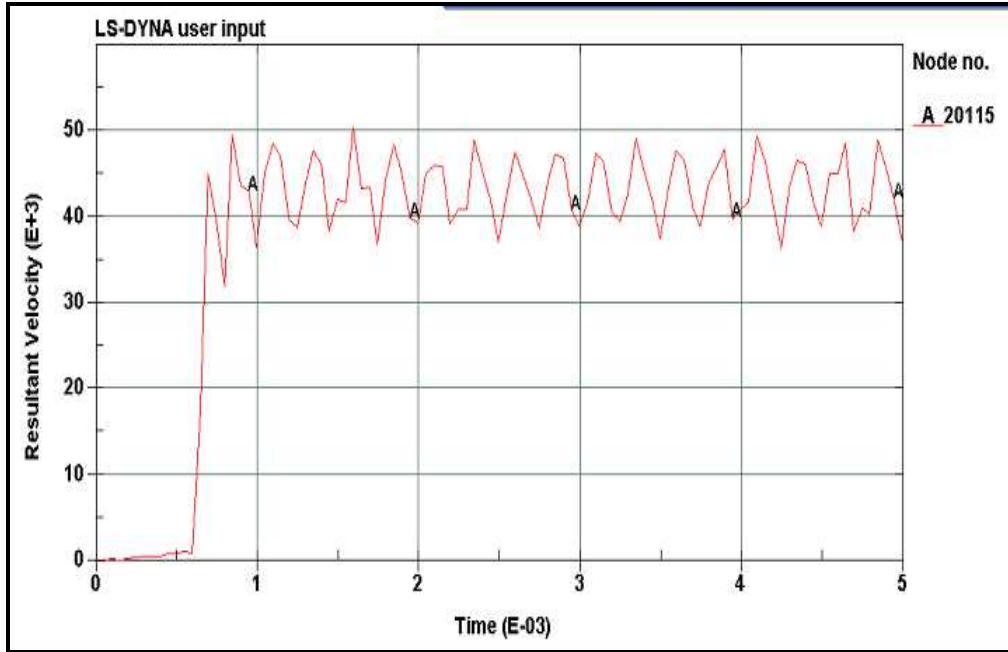
Resim 3.27: C70S6 kırılma yüzeyi



Resim 3.28: C70S6 kırılma yüzeyi (LS-DYNA)

Gerçek deney ortamındaki yüzeyin LS-DYNA programından alınan yüzey örneğinde olduğu gibi kırılğan, düz ve sürekli bir yapıda, kırılma başlangıç çentiklerinin açıldığı noktalardan kırıldığı gözlemlenmektedir.

Tablo 3.1: C70S6 kırılma oluşum zaman tablosu



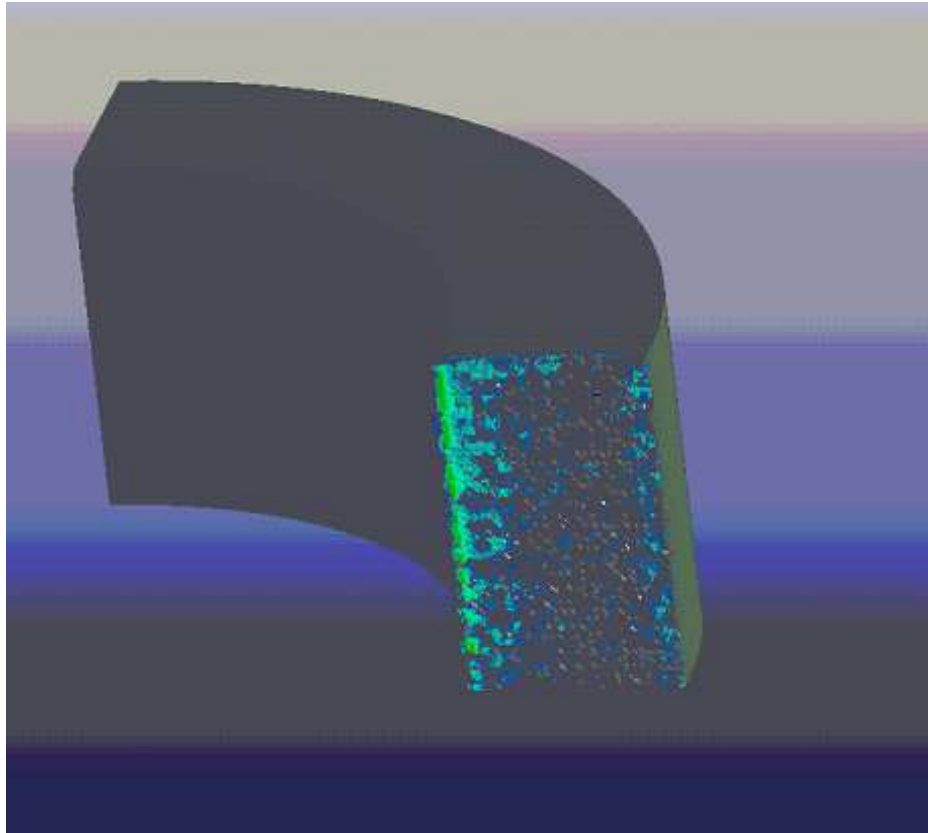
Simülasyon ortamında 160.000 kg.lık kuvvetin uygulanmasıyla biyel kolu başlık kısmı 6×10^{-4} saniyelik bir zaman içerisinde A20115 numaralı düğüm noktasından başlamak üzere tamamen kırılmaktadır. Deney sürecine malzemenin ilk 5×10^{-4} saniyelik mekanik kırılma davranışı tablo 3.1'de görülmektedir.

3.4.2 Temperlenmiş Martenzitik Yapıdaki C70S6 Deneysel Bulguları

Resim 3.29-30'da kırılğan ve gevrek bir kırılma özelliği açık şekilde görülmektedir. Uygulanan ısı işlemler neticesinde 306 HB sertliğe ulaşan temperlenmiş martenzit yapının meknik davranışı perlitik yapıdaki C70S6 malzemesinin gösterdiği mekanik davranışa çok benzemektedir. Simülasyon analiz sonuçları ile gerçek deneylerin sonuçları birbirinin aynısı denecek kadar yakın elde edilmiştir.

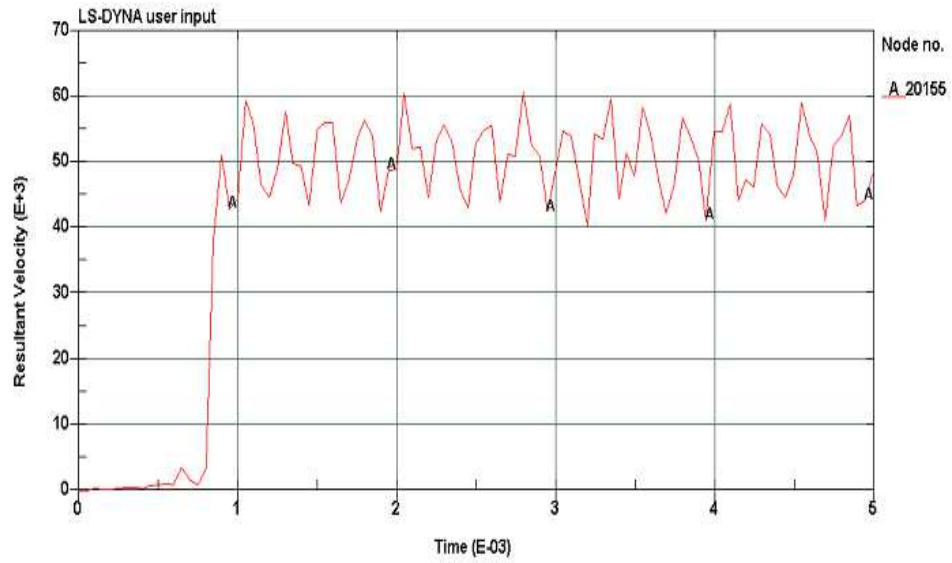


Resim 3.29: Temperlenmiş martenzit C70S6 kırılma yüzeyi



Resim 3.30: Temperlenmiş martenzit C70S6 kırılma yüzeyi (LS-DYNA)

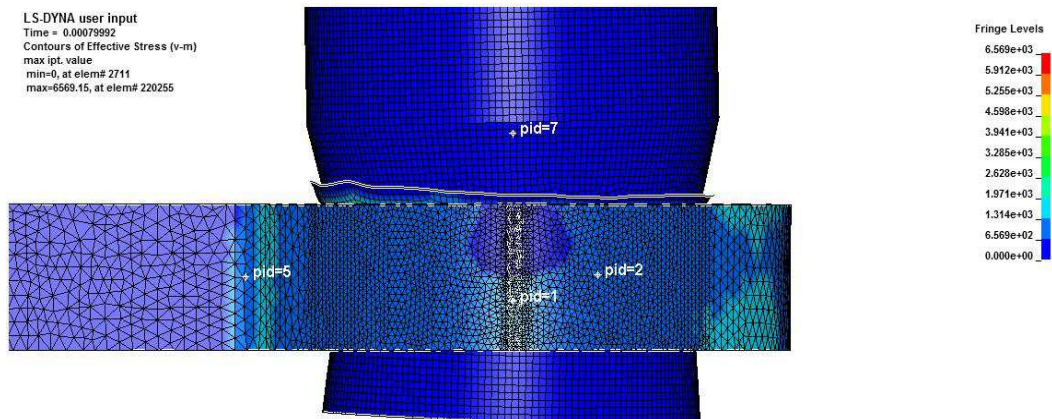
Tablo 3.2: Temperlenmiş martenzit C70S6 kırılma oluşum zaman tablosu



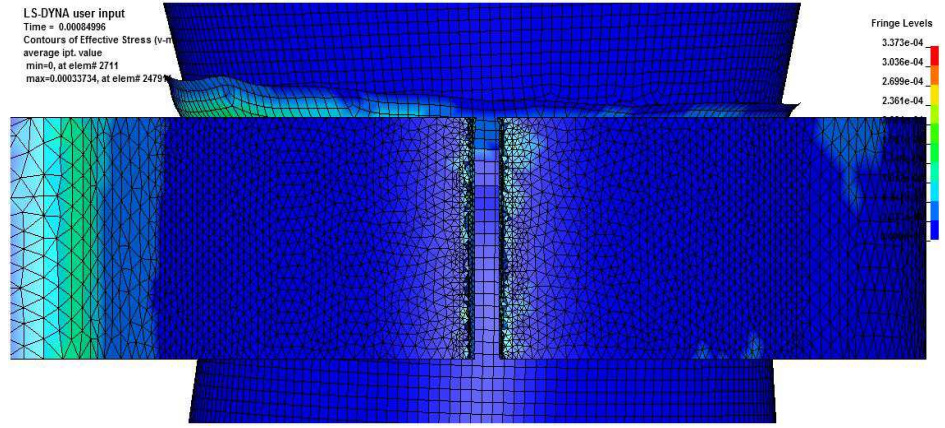
Simülasyon ortamında 160.000 kg.lık kuvvetin uygulanmasıyla biyel kolu başlık kısmı 7.9×10^{-4} saniyelik bir zaman içerisinde A20115 numaralı düğüm noktasından başlamak üzere tamamen kırılmaktadır. (Tablo 3.2) Perlitik malzemeden çok az daha uzun bir sürede kırılma gerçekleşmiştir. Bunun nedeni ise malzemenin sertlik değeri ve kırılma tokluğunun biraz yükselmiş olmasıdır.

3.5 Ls-prepost Kırılma Analiz Sonuçları

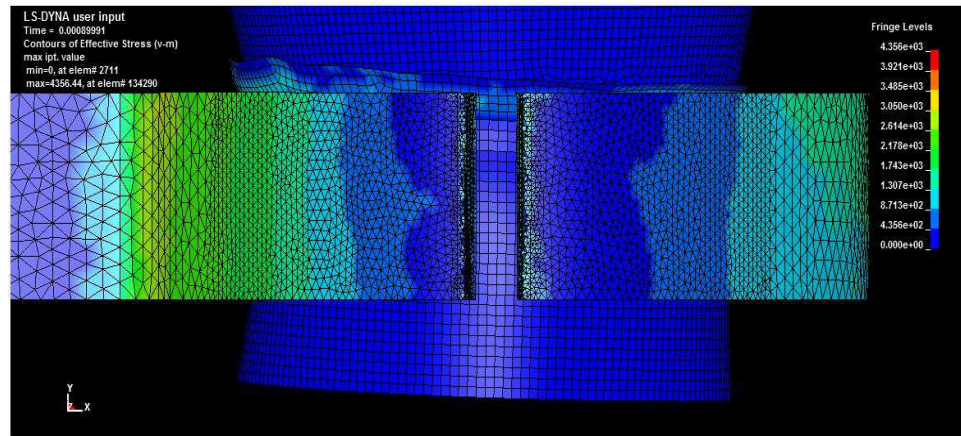
Kırılma başlangıç anında kırılma bölgesindeki efektif gerilmeler resim 3.31'de görülmektedir.



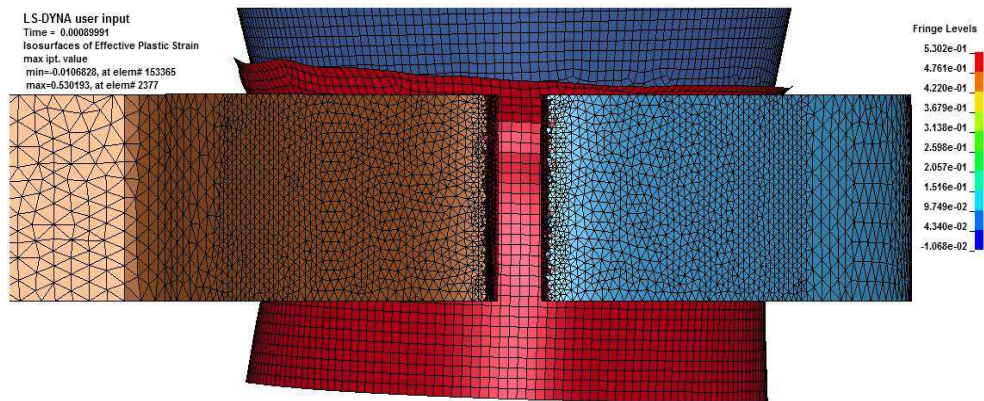
Resim 3.31: Kırılma anı efektif gerilmeler (Ls-prepost)



Resim 3.32: Kırılma sonrası efektif gerilme (1) (Ls-prepost)

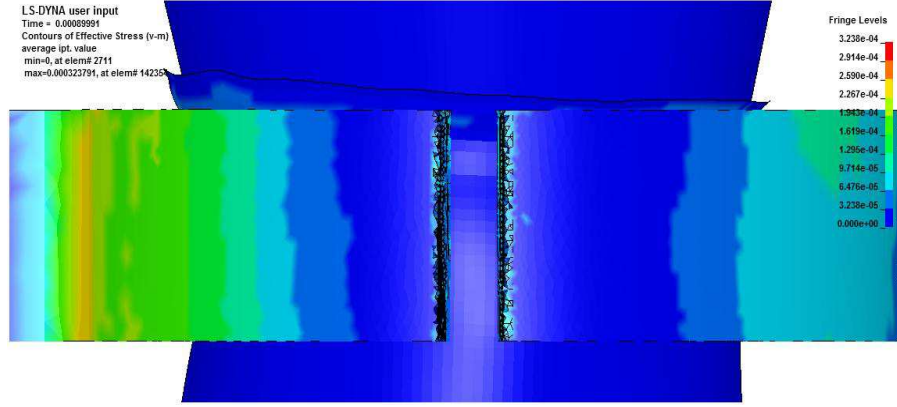


Resim 3.33: Kırılma sonrası efektif gerilme (2) (Ls-prepost)

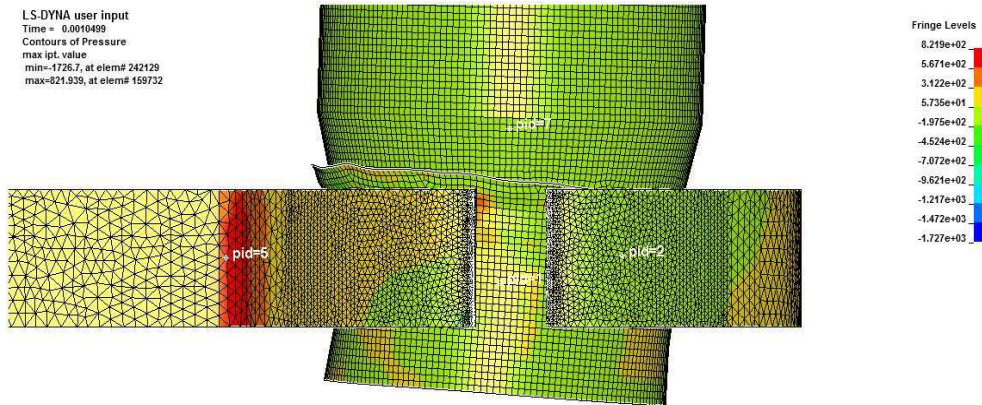


Resim 3.34: Kırılma sonrası efektif plastik gerinme (Ls-prepost)

Kırılma sonrasında biyel kolunun kırılmış parçalarında oluşan efektif gerilme bölgeleri resim 3.32-33'te, plastik gerinmeler ise resim 3.34'te görülmektedir.



Resim 3.35: Kırılma sonrası gerilme bölgeleri (Ls-prepost)



Resim 3.36: Kırılma sonrası basınç dağılımı (Ls-prepost)

Resim 3.35'te kırılma sonrası gerilme bölgeleri ve resim 3.36'da kırılma sonrası basınç dağılımı biyel kolu sonlu eleman modelinin ağ yapısı üzerinde görüntülenmiştir. Analizlerde elde edilen bulgular deneysel sonuçlarda elde edilen bulgularla birebir örtüşmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Gerçek ve simülasyon deneyleri sonucunda çift taraflı ve deformasyonsuz bir kırılma yüzeyi elde edilerek biyel kolu malzemesi için optimum kırılma parametreleri elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde motor biyel kolu üretiminde maliyet ve işçiliğin önemli ölçüde azaltılmasının mümkün hale getirildiği ispatlanırken, temperlenmiş martenzitik yapıdaki biyelin büyük parça ve başlık kısımlarının birbirine mükemmel bir şekilde oturması da sağlanmıştır. Gerçek ve simülasyon deneyleri sonucunda elde edilen temperlenmiş martenzitik C70S6 malzemesinin teknolojik olarak kullanılabilir bir yapı olduğu simülasyon ortamında da gösterilmiştir.

Biyel kolu başlık kısmındaki kırılma, malzemenin mekanik özelliklerinden dolayı arzu edilen şekilde, klevaj yüzeyde ve gevrek olarak gerçekleşmiştir. Bilgisayar destekli analiz sonucu ile kıyaslandığında da optimum kesme hızı ve basınç-kuvvet değerlerinin elde edildiği teyit edilmiştir. Kırılma sonrası yüzeylerin birbirine mükemmel oturması, uygulanan kırma kuvvetinin biyel kolu başlık kısmının iç çapında uniform dağılması neticesinde kırılmanın gevrek şekilde oluşmasıyla sağlanmıştır. Kırılma başlangıç çentiklerinden başlayan kırılma C70S6 çeliğinin kimyasal bileşiminden dolayı gevrek ve deformasyonsuz bir şekilde elde edilmektedir. Bu kırılmanın çatlak gelişimi ve çatlak ilerleme yapısı bilgisayar destekli analiz resimlerinde (Bkz. Bölüm 3) açık şekilde gösterilmiştir.

Yazılım programında çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve bunun sonucunda da *biyel kolu başlık kısmının iki taraflı kırılması* işlemi sisteme tanımlanan başlangıç çentikleri ve deneysel çalışmalarda elde edilen bulguların eksiksiz olarak girişinin yapılmasıyla başarılı bir şekilde simüle edilmiştir.

Simülasyon ortamında 160.000 kg.lık kuvvetin uygulanmasıyla biyel kolu başlık kısmı $6-7 \times 10^{-4}$ saniyelik bir zaman içerisinde A20115 numaralı düğüm noktasından başlamak üzere tamamen kırılmaktadır. Perlitik ve temperlenmiş martenzitik malzemeler sırasıyla daha uzun bir sürede kırılma eğilimi

göstermektedir. Sertlik değeri ile kırılma tokluğunun birbirine yakın değerlerde olmasından dolayı temperlenmiş martenzitik malzemeler perlitik malzemelerinkine yakın bir mekanik davranış göstermiştir.

Tablo 4.1: C70S6 mekanik özellikleri ve kırılma zamanları

Deney Parçası Türü	σ_{Akma} [MPa]	$\sigma_{Maks.}$ [MPa]	Sertlik [HRB]	% ϵ Uzama	Kırılma Zamanı (10^{-4} s)
C70S6 (Perlitik)	644	924	280	10	6
C70S6 (Temperlenmiş Martenzit) Suda su verilmiş	703	1009	306	10	7

Tablo 4.2'de teknolojik olarak kullanılabilen biyel kolu malzemelerinin mekanik özellikleri ve darbeli yük altında elde edilen kırılma zamanları görülmektedir.

4.2 Öneriler

Bilimsel deneyler ile simülasyon analizleri birbirleriyle ancak uygulamada kullanılan parametreler yönünden kıyaslanabilir. Bu çalışma süresince yapılan simülasyon deneylerinde elde edilen yüzeylerin gerçek deneylerde elde edilen yüzeylerle metalografik kıyaslamasının yapılması mümkün değildir. Deneysel çalışmalarda elde edilen gerçek yüzeylerin simülasyon çalışmalarındaki yüzeylerle karşılaştırılabilir hale getirilmesi ancak yazılım programına girilecek parametrelerin çok daha ayrıntılı ve karmaşık hale getirilmesiyle mümkün olabilir. Bu da simülasyon modelinin çok daha karmaşık bir ağ yapısına dönüştürülmesi ile sağlanabilir. Bu şekilde bir işlem, günümüzde kullanılan en modern bilgisayarlarda bile 24 saat sürebilen analiz sürelerinin daha da artmasına ve hatta deneylerin başarısız olmasına neden olabilir. Ayrıca, sonlu elemanlar yönteminde kullanılan matematiksel formüllerde de gerçek hayattakinden bazı farklar olabilir. Örneğin gerçek hayatta olamayan bazı yuvarlama faktörleri ve ihmaller yazılım programlarına aynı kusursuzlukla aktarılamamaktadır.

Deney yapılan malzemenin bileşimindeki Mn oranı artırılırsa malzemenin darbe tokluğu da artırılabilir. Bu da kırılabilir biyel kolları için istenen ve arzu edilen bir durumdur. Bunun yanında, S oranının artırılması malzemenin işlenebilirliğini ve kırılgenliğini artırır. Daha da ötesi, malzeme bileşimindeki C oranının artırılmasının sertlik ve kırılgenlik üzerinde belirleyici bir etkisi vardır. Tokluk ve darbe enerjisi birbirleriyle ters orantılıdır. Bunun yanında, simülasyon çalışmalarında kullanılan malzemelerin bazı mekanik özelliklerinde ve bileşimlerinde yapılacak değişikliklerin elde edilecek sonuçlara da yansyacağı unutulmamalıdır. Bu konu gelecekte biyel kollarının kırılması konusunda yapılabilecek araştırmalar için farklı bir çıkış noktası olabileceği düşünülebilir.

Deneylerde kullanılan kırma parametrelerinin değiştirilmesi durumunda da farklı veriler elde edilebilir. Örneğin kırma kuvveti olarak 40.000 kg. kuvvet uygulandığında malzeme gevrek kırılmayıp akma eğilimi gösterebilir veya kırma işlemini başarısız olabilir.

Biyel kolu başlık kısmının kırılması için uygulanan kuvvetin doğurduğu gerilme biyel kolu başlık kısmının iç çap duvarlarına eşit şekilde dağıtılmıştır. Bu gerilme biyel kolu başlık kısmına açılan çentiklerin de yardımıyla biyel kolu başlık kısmının iki taraflı ve deformasyonsuz kırılmasına olanak sağlamıştır. Başlangıç çentikleri bu safhada çok önemli bir rol oynamış, deformasyonsuz kırılmanın kusursuz şekilde gerçekleşmesine büyük katkı sağlamıştır.

Optimizasyon çalışmalarında elde edilen bulgulardan martenzitik ve perlitik-ferritik yapıdaki C70S6 malzemelerinin sertlik değerleri simülasyon denemesine tabi tutulduğunda sonlu eleman analizi sonuçları bilimsel değer kazanmamıştır. Perlitik-ferritik yapıdaki malzeme akma eğilimi göstermiş, temperlenmiş martenzit yapıdaki biyel kolu ise başlangıç çentiklerine rağmen süreksiz bir kırılma davranışı göstermiştir.

Biyel kolu başlık kısmının tek taraflı olarak kırılmasının engellenmesi amacıyla biyel kolu Y-ekseninde tam olarak sabitlenirken, başlık kısmı kısmen sabitlenmiştir. Aksi halde oluşacak tek taraflı kırılmanın bu çalışmaya hiç bir katkısı bulunmadığı gibi sonuçlarında bilimsel bir değeri olmayacaktır. Özellikle bilgisayar

destekli yazılımda bu tür uygulamalar deneme yanılma yöntemiyle görüldüğünden, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizler deneysel çalışmaları olumlu yönde desteklemiştir.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen akma gerilmesi, maksimum gerilme, sertlik ve uzama yüzdesi değerlerine (bkz. Tablo 2.4) simülasyon deneyleri sonrası elde edilen kırılma zamanları eklenerek Tablo 4.1 oluşturulmuştur. Bu tabloda malzemelerin simülasyon deneyleri esnasında ne kadar sürede kırıldığı LS-DYNA yazılımı vasıtasıyla tespit edilmiştir.

Kırma deneylerinde biyel kollarının kırılmış yüzeylerinin birbirine mükemmel şekilde oturduğu tespit edilmiş, simülasyon sonuçlarında da bu durum teyit edilmiştir. Kırma deneyleri ve simülasyon analizleriyle elde edilen bulguların motor biyel kolunun motor içerisinde kullanılma süresini de artıracığı ve teknolojik alanda da kullanılacağı düşünülmektedir. Elde edilen temperlenmiş martenzitik C70S6 malzemesinin kırılma parametreleri yönünden en optimum biyel kolu malzemesi olduğu tespit edilmiş olmasına rağmen motor içerisinde yorulma davranışının nasıl olacağı incelenmemiştir. Bu konunun ileriki dönemde yeni bir çalışma alanı olacağı değerlendirilmektedir.

Yapılan çalışmaların özgün yönü ise dünya bilim literatüründe bugüne kadar motor biyel kolu kırılma parametreleri ve bunu destekleyen kapsamlı sonlu eleman analizine rastlanmamış olmasıdır. Deneysel ve simülasyon ortamında yapılan çalışmalar birbirini destekler niteliktedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Lee, M.K., Lee, H., Lee, T.S., Jang, H., "Buckling Sensitivity of a Connecting Rod to the Shank Sectional Area Reduction", *Materials an Design* 31: 2796-2803, (2010).
- [2] Fatemi, A., Afzal, A., "Fatigue Behavior and Life Predictions of Forged Steel and Powder Metal Connecting Rods", *MS Thesis* 30-50, Toledo University, (2005).
- [3] Celin, R., Arzensek, B., Kmetec, D., "A Metallographic Examination of a Fractured Connecting Rod", *Materials and Technology* 42: 93-95, Institute of Metals and Technology, (2008).
- [4] James, R.D., "Connecting Rod Evaluation", *Metal Powder Industries Federation*, East Princeton, NJ, United States, (Ocak 2005).
- [5] Gu, Z., Yang, S., Ku, S., Zhao, Y., Dai, X., "Fracture Splitting Technology of Automobile Engine Connecting Rod", *International Journal of Adv. Manufacture Technology* 25: 883-887, (2005).
- [6] Eruslu, O.S., "Finite Element Analysis of Bolted Cold Formed Steel Strips", *Dokuz Eylül Universitesi Doktora Tezi* 20-50, İzmir (2001).
- [7] Zhang, D., Haris, S.J., McCartney, D.G., Pashby, I.R., Powell, J., Shipway, at al., "The Effect of Laser Transformation Notching on the Controlled Fracture of a High Carbon (C70S6) Steel", *Materials Science and Engineering A* 489: 273-284, (2008).
- [8] Zheng, L., Kou, S., Yang, S., Li, L., Li, F., "A Study of Process Parameters During Pulsed Nd: Yag Laser Notching of C70s6 Fracture Splitting Connecting Rod", *Optics&Laser Technology* 42: 985-993, (2010).
- [9] Kubota, T., Ivasaki, S., Isobe T., Koike, T., "Development of Fracture Splitting Method for Case Hardened Connecting Rods", *Yamaha Motor Technical Review*, Japan, (04.06. 2005).
- [10] Kim, H.S., Kim, G.T., Chung, T., Kim, H.S., Hong, S., "Fatigue Characteristics of High Strength C70S6 and SMA40 Steels", *Materials Science and Engineering A* 527: 2813-2818, (2010).
- [11] Shenoy, S., Fatemi, A., "Connecting Rod Optimization for Weight and Cost Reduction", *SAE International* 2005-01-0987, Toledo University, (2005).

- [12] Qinghui, Z., Yunying, W., Wei, J., "The Finite Element Analysis of Connecting Rod of a Diesel Engine", *International Conference On Measuring Technology And Mechatronics*, (2010).
- [13] Zhang, X., Cai, Q., Zhou, G., Chen, Q., Xiong, Y., "Microstructure and Mechanical Properties of V-Ti-N Microalloyed Steel Used For Fracture Splitting Connecting Rod", *Journal of Material and Science* 46: 1789-1795, (2010).
- [14] Ogwuagwu, V.O., "Simulation Study of the Fracture Characteristics of Locally Fabricated Aluminium Bar Used As Connecting Rod in Vibratory Sieves", *Leonardo Journal of Science* ISSN 1583-0223: 93-100, (2007).
- [15] Chen, N., Han, L., Zhang, W., Hao, X., "Enhancing Mechanical Properties and Avoiding Cracks By Simulation of Quenching Connecting Rods", *Materials Letters* 61: 3021-3024, (2007).
- [16] Bariani, P.F., Bruschi, S., "Modelling the Forging and Post-Forging Cooling of C70S6 Conrods", *Journal of Materials Processing Technology* 167: 529-535, (2005).
- [17] Jaju, S.B., Charkha, P.G., "Modeling & Analysis of Connecting Rod of Four Stroke Single Cylinder Engine For Optimization of Cost & Material", *International Journal of Applied Engineering Research* 4: 1277-1285, (2009).
- [18] Gangwani, D.G., Metkar, R.M., "Computer Aided Modelling and Finite Element Analysis of Connecting Rod Fouling on Camshaft of the Engine Of Mahindra and Mahindra Tractor", *Second International Conference on Emerging Trends in Engineering And Technology*, ICETET Nagpur, India, (2009).
- [19] Shenoy, S., Fatemi, A., "Dynamic Analysis of Loads and Stresses in Connecting Rods, Toledo University", *Journal of Mechanical Engineering Science* 220: 615-630, (2005).
- [20] Grass, H., Kremaszky, C., Werner, E., "3-D Fem-Simulation of Hot Forming Processes For the Production of a Connecting Rod", *Computational Materials Science* 36: 480-489, (2005).
- [21] Wang, Q., He, F., "A Review of Developments in the Forging of Connecting Rods in China", *Journal of Materials Processing Technology* 151: 192-195, (2004).
- [22] Griza, S., Bertoni F., Zanon G., Reguly A., Strohaecker T.R., "Fatigue in Engine Connecting Rod Bolt due to Forming Laps", *Engineering Failure Analysis* 16: 1542-1548, (2009).
- [23] Yu, R., "The fracture splitting process of connecting rods", *Process Mater Autoob* 9: 9 -11, (1998).

- [24] Corus Engineering Steel, FRACTIM, "An improved machinable air cooled fracture splittable carbon steel for connecting rods", *Corus Engineering*, (2003).
- [25] Aksoy, Z., Özdemir, Z., Özdemir, T., "Motor Biyel Kollarının Kırılma Parametreleri Üzerine Bir Çalışma", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 16(2): 113-122, (2012).
- [26] Aksoy, Z., Özdemir, Z., Özdemir, T., "A metallographic examination of fracture splitting C70S6 steel used in connecting rods", *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 24(2): 45-58, (2012).
- [27] Türkbaş, O.S., "An examination of different heat treatment effects to the fracture parameters of C70S6 connecting rod", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2012), (In Press).
- [28] Cahoon, C.R., Broughton, W.H., Kutzak, A.R., "The determination of hardness measurement from yield strength", *Metalurgical Transactions*, Volume 2: 1971-1983 (2004).
- [29] Broek, D., "Elementary engineering fracture mechanics", *Kluwer Academic Publishers*, Boston, 13-240 (1982).

EKLER

6.1: Ansys ve Ls-dyna Yazılım CD