

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERDE GERİLME YIĞILMALARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bekir KARAHALİL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

AĞUSTOS 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERDE GERİLME YIĞILMALARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bekir KARAHALİL
503091223**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cemal BAYKARA

AĞUSTOS 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503091223 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bekir KARAHALİL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİYLE FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELERDE GERİLME YIĞILMALARININ İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Cemal BAYKARA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Uğur GÜVEN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mehmet PALABIYIK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **14 Ağustos 2012**
Savunma Tarihi : **24 Ağustos 2012**

ÖNSÖZ

Tanımlı bir fonksiyona bağlı olarak elastisite modülünün malzeme üzerinde yüzeyden yüzeye değiştiği, heterojen kompozit malzemeler olarak da adlandırılabilen Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler üzerinde süreksizlik noktalarında gerilme yığılmaları incelenmiş ve aynı süreksizliğe sahip homojen malzeme için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılarak malzeme özelliğinin derecelendirilmesinin, fiziksel özelliklerde neden olduğu değişim gözlemlenmiştir.

Çalışmanın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında yardımlarından ve anlayışından dolayı danışmanım sayın Doç. Dr. Cemal Baykara'ya ve desteklerinden dolayı Gürhan Çetin'e, Nihan Kırmızı'ya ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos 2012

Bekir Karahalil
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı	3
2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMENİN MODELLENMESİ	5
2.1. Sonlu Eleman Gösterimi	5
2.2. Derecelendirilmiş Sonlu Eleman Formülasyonu.....	6
3. ORTASINDA DAİRESEL DELİK BULUNAN PLAKADA ÇİFT EKSENLİ YÜK ALTINDA GERİLME YIĞILMASI FAKTÖRÜ	9
3.1. Üstel Fonksiyon ile Tanımlanmış Elastisite Modülü ile Derecelendirilmiş Plakanın Analizi	9
3.1.1. Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Koşulları	10
3.2. Güç Fonksiyonu ile Tanımlanmış Elastisite Modülü ile Derecelendirilmiş Plakanın Analizi	21
4. ORTASINDA ELİPTİK DELİK BULUNAN PLAKADA ÇİFT EKSENLİ YÜK ALTINDA GERİLME YIĞILMASI FAKTÖRÜ	27
4.1. Eliptik Delikli Plaka İçin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması.....	27
5. ORTASINDA DELİK BULUNAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PLAKALARA, DELİK BOYUTLARINDA FARKLI MALZEMELER BAĞLANMASI SONUCU ORTAYA ÇIKAN GERİLME DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ.....	47
5.1. Ortasında Dairesel Delik Bulunan Plakaya Ek Malzeme Bağlanması Sonucu Ortaya Çıkan Gerilme Değerlerinin İncelenmesi.....	47
5.2. Ortasında Eliptik Delik Bulunan Plakaya Ek Malzeme Bağlanması Sonucu Ortaya Çıkan Gerilme Değerlerinin İncelenmesi.....	56
6. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PLAKADA DELİK ÇEPERİNİN YÜK ALTINDA YER DEĞİŞTİRMESİNE İZİN VERİLMEDİĞİ DURUMDA GERİLME DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ.....	61
6.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Dairesel Delikli Plakada Delik Çeperinin Yük Altında Yer Değiştirmesine İzin Verilmediği Durumda Gerilme Değerlerinin İncelenmesi.....	61
6.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Eliptik Delikli Plakada Delik Çeperinin Yük Altında Yer Değiştirmesine İzin Verilmediği Durumda Gerilme Değerlerinin İncelenmesi.....	63
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65

KAYNAKLAR.....	67
-----------------------	-----------

KISALTMALAR

FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SCF	: Stress Concentration Factor

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Ortasında dairesel delik bulunan fonksiyonel derecelendirilmiş plaka için analiz sonuçları(üstel fonksiyon)	19
Çizelge 3.2: Ortasında dairesel delik bulunan fonksiyonel derecelendirilmiş plaka için analiz sonuçları(güç fonksiyonu).....	25
Çizelge 4.1: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri($a/b=5$)	33
Çizelge 4.2: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri($a/b=2$)	37
Çizelge 4.3: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri($a/b=5$)	40
Çizelge 4.4: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri($a/b=2$)	44
Çizelge 5.1: Üstel fonksiyon ile derecelendirilmiş plakaya homojen malzemeler bağlanması sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri(MPa)..	51
Çizelge 5.2: Güç fonksiyonu ile derecelendirilmiş plakaya homojen malzemeler bağlanması sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa).	55
Çizelge 5.3: Fonksiyonel derecelendirilmiş eliptik delikli plakaya homojen malzemeler bağlanması sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri(MPa)	59
Çizelge 6.1: Denklem 3.1 ile derecelendirilmiş plakada delik çeperinin sabit tutulması durumunda delik çeperindeki gerilme değerleri (MPa)	62
Çizelge 6.2: Denklem 3.10 ile derecelendirilmiş plakada delik çeperinin sabit tutulması durumunda delik çeperindeki gerilme değerleri (MPa)	62
Çizelge 6.3: $a/b=5$ için delik çeperinin sabit tutulması durumunda ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa)	63
Çizelge 6.4: $a/b=2$ için delik çeperinin sabit tutulması durumunda ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa)	64

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Homojen seramik kaplama ve malzeme üzerinde meydana gelen çatlaklar (Özarslan, 2007).	1
Şekil 2.1: FDM lerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi: (a)homojen olmayan elastisite modülü, (b) örnek alan, (c) derecelendirilmiş eleman, (d) homojen eleman. Burada "." sembolü: Eleman üzerindeki her bir nodu, "x" sembolü: Gauss örnek noktasını ve "o" sembolü: Malzeme özelliğinin alındığı örnek noktayı göstermektedir (Paulino G. H. ve Kim J., 2007).....	5
Şekil 3.1: Ortasında dairesel delik bulunan plakada çift eksenli gerilme durumu (Sadd, 2009).	9
Şekil 3.2: Simetrik 1/4 sonlu elemanlar modeli.	10
Şekil 3.3: Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı.	11
Şekil 3.4: Normalleştirilmiş elastisite modülü - normalleştirilmiş yarıçap grafiği. ..	13
Şekil 3.5: $\ln \Sigma_0 - t$ grafiği.	14
Şekil 3.6: $\eta = -2$, $t=0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	14
Şekil 3.7: $\eta = -1$, $t=0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	14
Şekil 3.8: $\eta = 1$, $t=0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	15
Şekil 3.9: $\eta = 2$, $t=0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	15
Şekil 3.10: $\eta = -2$, $t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	15
Şekil 3.11: $\eta = -1$, $t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	16
Şekil 3.12: $\eta = 1$, $t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	16
Şekil 3.13: $\eta = 2$, $t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	16
Şekil 3.14: $\eta = -2$, $t=1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	17
Şekil 3.15: $\eta = -1$, $t=1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	17
Şekil 3.16: $\eta = 1$, $t=1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	17
Şekil 3.17: $\eta = 2$, $t=1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.	18
Şekil 3.18: $t=0.2$ için analitik değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	20
Şekil 3.19: $t=0.6$ için analitik değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	20
Şekil 3.20: $t=1$ için analitik değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	21
Şekil 3.21: Düzgün dağılmış basınç altındaki içi boş silindir kesiti (Sadd, 2009). ...	22

Şekil 3.22: Silindirik kesit için ağ yapısı.	23
Şekil 3.23: $n < 0$ için elastisite modülünün radyal koordinat ile değişimi.	24
Şekil 3.24: $n > 0$ için elastisite modülünün yarıçap ile değişimi.	24
Şekil 3.25: Güç fonksiyonu indisine bağlı olarak analitik değerlerin ve analiz değerlerinin karşılaştırılması.	26
Şekil 4.1: Eliptik delikli plakada tek eksenli iki gerilme halinin süperpozisyonu (Berlo,2009).	28
Şekil 4.2: Eliptik delikli plaka için delik çeperindeki ağ yapısı.	30
Şekil 4.3: $k = -0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	31
Şekil 4.4: $k = -0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	31
Şekil 4.5: $k = -0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	31
Şekil 4.6: $k = 0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	32
Şekil 4.7: $k = 0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	32
Şekil 4.8: $k = 0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	32
Şekil 4.9: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=5$).	34
Şekil 4.10: $k = -0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	35
Şekil 4.11: $k = -0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	35
Şekil 4.12: $k = -0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	35
Şekil 4.13: $k = 0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	36
Şekil 4.14: $k = 0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	36
Şekil 4.15: $k = 0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	36
Şekil 4.16: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=2$).	37
Şekil 4.17: $k = -0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	38
Şekil 4.18: $k = -0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	38
Şekil 4.19: $k = -0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	39
Şekil 4.20: $k = 0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	39
Şekil 4.21: $k = 0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	39
Şekil 4.22: $k = 0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	40
Şekil 4.23: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=5$).	41
Şekil 4.24: Çift eksenli yük altında eliptik delikli plakada gerilme yığılması bölgesi ($k=0.6, n=1$).	41
Şekil 4.25: $k = -0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	42
Şekil 4.26: $k = -0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	42
Şekil 4.27: $k = -0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	42
Şekil 4.28: $k = 0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.	43
Şekil 4.29: $k = 0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.	43
Şekil 4.30: $k = 0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.	43
Şekil 4.31: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=2$).	44
Şekil 5.1: Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı.	48
Şekil 5.2: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.2, n=-2$, (b) $t=0.2, n=-1$	48
Şekil 5.3: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.2, n=1$, (b) $t=0.2, n=2$	49
Şekil 5.4: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.6, n=-2$, (b) $t=0.6, n=-1$	49
Şekil 5.5: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.6, n=1$, (b) $t=0.6, n=2$	49
Şekil 5.6: Gerilme dağılımları, (a) $t=1, n=-2$, (b) $t=1, n=-1$	50
Şekil 5.7: Gerilme dağılımları, (a) $t=1, n=1$, (b) $t=1, n=2$	50
Şekil 5.8: $n=-0.4$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.	52
Şekil 5.9: $n=-0.3$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.	52
Şekil 5.10: $n=-0.2$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.	53
Şekil 5.11: $n=-0.1$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.	53
Şekil 5.12: $n=0.1$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.	53

Şekil 5.13: $n=0.2$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.....	54
Şekil 5.14: $n=0.3$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.....	54
Şekil 5.15: $n=0.4$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.....	54
Şekil 5.16: $k=-0.8$, $n=0.1$ (çelik ek parça).	57
Şekil 5.17: $k=-0.8$, $n=1$ (çelik ek parça).	57
Şekil 5.18: $k=-0.4$, $n=0.1$ (çelik ek parça).	57
Şekil 5.19: $k=-0.4$, $n=1$ (çelik ek parça).	57
Şekil 5.20: $k=0.4$, $n=0.1$ (çelik ek parça).....	58
Şekil 5.21: $k=0.4$, $n=1$ (çelik ek parça).....	58
Şekil 5.22: $k=0.8$, $n=0.1$ (çelik ek parça).....	58
Şekil 5.23: $k=0.8$, $n=1$ (çelik ek parça).....	58

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE FONKSİYONEL DERCELENDİRİLMİŞ MALZEMELERDE GERİLME YIĞILMALARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bir sistem, bir mekanizma, bir makina parçası vb. bir bütünün parçası olacak herhangi bir elemanın, üzerine gelecek yükü, sahip olduğu hacmin bütününe eşit olarak dağıtması konstrüksiyon ile uğraşan bilim adamları, mühendisler, teknik elemanlar vb. herkes için ulaşılmak istenen ideal bir durumdur. Fakat istenilen bu durum hemen hemen hiç bir zaman gerçekleşmez. Çünkü makina tasarımında gerilme yığılmasının oluşacağı tasarım gereksinimlerinden kaçınmak mümkün değildir. İki parçayı birbirlerine bağlama gereksinimi, yuvarlanmalı yatağın mile oturması için milde fatura açılması gereksinimi, milde kama yuvası açılması gereksinimi, sızdırmazlık elemanı için yuva açılması vb. aklımıza gelebilecek bütün gereksinimler, elemanlar üzerinde süreksizlik bölgeleri oluşturular. Elemanlar yük altına girdiği anda eleman üzerinde kuvvet akışı bu süreksizlik bölgelerinde yoğunlaşacak şekilde gerçekleşir. İşte bu şekilde süreksizliklerden dolayı kuvvetlerin bir bölgede yoğunlaşmasına gerilme yığılması adı verilir. Malzemeler üzerinde gerilme yığılması gerilme yığılması faktörü ile ölçülür. Gerilme yığılması faktörü malzemeye, malzeme boyutuna bağlı değildir, yalnızca geometriye bağlıdır.

Tasarım aşamasında bir parça üzerinde gerilme yığılmasının oluşacağı bölgelerin yükün yönüne göre tahmin edilmesi ya da bir sonlu elemanlar programı kullanarak analiz yapıp gerilme yığılmasının nerede oluştuğunun görülmesi mümkündür. Geometri kaynaklı gerilme yığılmasını azaltmak amacıyla geometride bazı değişiklikler yapılabilir, literatürde benzer geometrik önlemleri görmek mümkündür. Tasarımcının gerilme yığılmasının önüne geçmek için yapabilecekleri, geometrik değişikliklerle sınırlıdır. Bu değişikliklerin yetersiz kaldığı durumlar için özellikle son yirmi yılda fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) üzerinde çalışmalar artmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), tanımlanmış bir fonksiyona bağlı olarak malzeme özelliğinin, malzeme üzerinde bir yüzeyden diğer yüzeye farklılık gösterdiği, heterojen kompozitlerdir. Bilinen kompozit malzemelerde olduğu gibi birden fazla, elastisite modülü kendi içinde değişmeyen homojen malzemedan oluşan yapılar değildirler.

Bu çalışmada, iki boyutlu ortasında dairesel ve eliptik delikler bulunan plakaların fonksiyonel olarak derecelendirilerek homojen duruma göre plaka üzerinde gerilme yığılması ve yığılmanın oluştuğu bölgede meydana gelen değişimler incelenmiştir. Dairesel delikli plaka için derecelendirme işlemi güç fonksiyonu ve literatürde analitik çözümü elde edilmiş üstel bir fonksiyona göre delik merkezi koordinat başlangıcı kabul edilerek radyal yönde yapılmıştır. Eliptik delikli plaka için ise iki

farklı üstel fonksiyona göre iki farklı eliptik delik geometrisine sahip malzemeler üzerinde derecelendirme yapılmış fakat derecelendirme işlemi bir koordinata göre değil eliptik delik geometrisine göre yapılmıştır.

Çalışma ile homojen durumda çift eksenli yük altında delik çeperlerinde ortaya çıkan gerilme yığılması faktörlerinin fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede nasıl değiştiği görülmüştür.

Sonrasında üzerlerinde çalışılan bu plakalara delik geometrisinde çelik ve elastisite modülü 200×10^6 GPa olan ek homojen malzemeler bağlanarak gerilme değerleri ve gerilme bölgelerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

Son bölümde delik çeperinde harekete izin verilmeyerek çift eksenli gerilme altında fonksiyonel derecelendirilmiş plakada gerilme değerleri incelenmiş ve homojen malzeme bağlama durumuyla karşılaştırma yapılmıştır.

Çalışmanın tümünde Ansys sonlu elemanlar programı kullanılmış, derecelendirme işlemleri Ansys programının elastisite modülünün sıcaklığa bağlı olarak girilebilmesine izin veren özelliği sayesinde yapılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı kurulurken plane 183 2 boyutlu eleman kullanılmıştır. Ek homojen malzeme bağlanması sırasında Ansys programındaki malzemeler arası boşluğa ve kaymaya izin vermeyen “bonded” komutu kullanılmıştır.

ANALYSES OF STRESS CONCENTRATION FOR FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS BY FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

It is an idea that to distribute all the loads which is applied to a part equally to the volume of it for whom interested in mechanical design. But this is an idea which is very hard to reach. Because there are many requirements for mechanical design such as opening a rabbet on a shaft for bearing, bonding of two parts with screws, keyway on shaft, holes, cavities etc.. These requirements bring discontinuities on structures. And then when the parts loaded, discontinuities attracts the load flow on their area. That attraction is called stress concentration. The magnification of the stress at geometric discontinuities can be expressed by the elastic stress concentration factor (SCF) which is the ratio of maximum stress at the discontinuity to nominal stress(applied stress). Stress concentration factor doesn't depend on material of the part or the size of the part only depends on the geometry of the part.

It is possible for a designer to guess where will be the stress concentration area or to see the stress concentration area by structural analyses and make some modifications to decrease stress concentration factor on structure. But for the situations that it is not enough the functionally grade material (FGM) concept introduced. The concept of functionally graded materials (FGMs) was first introduced in the 1980s by a group of material scientists in Japan.

Functionally graded materials are heterogeneous composite materials, in which the material properties vary continuously as a known function of the spatial position from one interface to the other. Since its introduction in 1980s functionally graded materials have been used extensively in thermal barrier coatings of gas turbine engines and rocket nozzles and smart structures. Graded nanocomposites have also been used in biological implants, MEMS coatings, sensors and wear resistant coatings. Graded materials have been manufactured by a variety of processes including centrifugal molding suspension of particles in polymer matrix, pressureless sintering, spark plasma sintering and laser melt injection.

In this study the effect of the material property inhomogeneity on the stress concentration factor (SCF) and the stress concentration areas due to a circular hole and elliptical hole in functionally graded plates is numerically investigated. Also at the last sections hole formed inclusions inserted in functionally graded materials and the stress results investigated under biaxially loads. After inclusion work, a different way is tried which a fixed support defined to the hole profile instead of a rigid inclusion. For both circular and elliptical hole forms two different functions used for gradation process on two dimensional plate. Young's modulus was varied in both intensity and gradation depth in the in plane x and y coordinate directions with gradation originating on and following the shape of the hole form.

Power function and an exponential function which has two parameters define stiffness at the hole perimeter and the decay rate of Young's modulus away from the hole are used for gradation of plate with circular hole.

The analyses with the circular hole are all executed on 40x40 mm two dimensional plate, but $\frac{1}{4}$ symmetrical model is used to save time and decrease finite element quantity. The ratio of the radius of circular hole and half length of the plate was 1/10 at all time.

All the stress concentration factor results obtained by finite element method, compared with the closed form analytical function results from literature. Kummer's function is solved to obtain the stress results of exponential function for given parameter values by using Matlab programme. Young's modulus versus radial coordinate graphs presented to show gradation depth and decay rate over functionally graded plate. Also some screen captures from the analyses are given.

After that figures and graphs are given which include stress concentration factor results for different parameter values of both functions comparing with analytical results and homogeneous form results. At the end of work on functionally graded plate with circular hole, the effect of inhomogeneity of material to the stress concentration factor discussed.

For the plate with elliptical hole two functions, one of them is the modified version of the other one which is taken from the literature, used for gradation of the plate. The gradation of plate is followed the shape of the elliptical hole. And two different plate and hole geometries analysed. For both conditions the ratio of major axis of elliptical hole to the half length of the plate was 1/10.

Superposition rule implemented to get stress concentration factor result of homogeneous plate under biaxial loads for both geometries. By changing the parameter values for both functions, stress concentration factors less and more than homogeneous plate stress concentration factors under biaxially loads are obtained. Again young's modulus versus x axis which is parallel and coincident to major axis of elliptical hole graphs are given.

In these graphs it is possible to see how gradation depth and the Young's modulus at the hole profile changed by modification of the other function. Then figures including stress concentration factor results for two functions and two geometries are given. Some values are compared with an other work from the literature and discussed.

Finally at the last section inclusions inserted to the hole forms and bonded to the rest of the plate then stress values evaluated under same biaxially loads. The bonded command doesn't let parts be apart and slide on each other. Two different materials, steel and a rigid material which had 200×10^6 GPa Young's modulus used as an inclusion. By using two different materials which had huge difference between elasticity modulus, the change in stress values for different inclusions investigated. Also the effect of the elasticity modulus differences between plate and the inclusion discussed.

After that work, a fixed support defined to the hole profile instead of rigid inclusion. Under same conditions with same hole geometries and plates analyses made and compared with the results which already obtained with the rigid inclusion.

The finite element model built up with Ansys finite element programme workbench interface. 8 noded plane 183 two dimensional finite element is used for establishing mesh. For all geometries, map mesh is used and to obtain more accurate results hole areas meshed more intensive then the other areas towards the outer boundary of the plate.

Initially, for all cases, analyses made on homogeneous plate to reach most accurate mesh structure. Defining Young's modulus depending on thermal condition ability of the programme is used for functionally gradation.

For the plate with circular hole a cylindrical coordinate system placed at the origin of the hole and then thermal condition defined functionally with the gradation function. After that those temperature values defined equal to the Young's modulus of the material at the material data section of the programme.

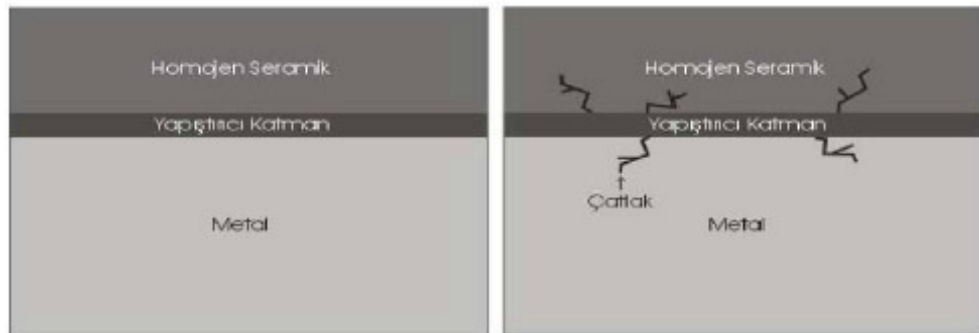
On the other hand thermal expansion coefficient of the material changed to zero which is to remove physical effects of temperature. By this way the plate is functionally graded from the periphery of the circular hole towards the outer boundary.

For the the plate with elliptical hole, it was not possible to implement same way with circular hole. Because the gradation of the elliptical hole followed the shape of the holes' profile. That means gradation function depends on two unknowns because elliptical hole has two axes called major and minor. And Ansys finite element programme is not able to define temperature which depends on two unknowns. For this reason the plate divided into many elliptical formed rings which are enough for gradation depth for given function parameters and thermal condition defined for all the sections manually. And again at the material data section, all temperature values for the rings defined as young's modulus.

1. GİRİŞ

Birçok malzeme sahip oldukları değişken mikroyapıları sayesinde farklı noktalarında farklı malzeme özelliklerine sahiptirler. Örneğin, jeomekanik çalışmalarına göre toprak ve kayaların, hacimleri içerisindeki herhangi bir noktada, nokta üzerindeki yüzeysel jeolojik yük sebebiyle; derinliğe bağlı malzeme özelliği gösterdikleri saptanmıştır. Değişken malzeme özelliği, biyolojik hücreli malzemelerde de görülmektedir. Yapılan deneyler göstermiştir ki insan iskeleti ve dişlerinde ve yumuşak dokusu olan bazı bitkilerdeki biyolojik adaptasyon, en güçlü mikroyapının en yüksek gerilmeye maruz kalan bölgede olacak şekilde gerçekleşmiştir(Özarslan, 2007).

Bilinen kompozit malzemelere örnek olarak havacılık endüstrisinde kullanılan ısıl bariyer kaplamaları sistemin ısı verimliliğinin artırılması amacıyla kullanılırlar. Yüksek sıcaklığa maruz kalan metal yüzeyler sıcaklık dayanımı fazla olan seramik malzeme ile kaplanır ve sistemin sıcaklığa olan dayanımı artırılmış olur. Fakat bu şekilde iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi bazı sorunları da beraberinde getirir. Metal ve seramiğin birleştiği yüzey ayrıca malzeme özelliğinin aniden değiştiği yüzeydir. Metal ve seramiğin ısıl dayanımları birbirinden çok farklı olduğu için bağlanma yüzeyinde yüksek ısıl gerilmeler ortaya çıkar. Bu gerilmeler bağlanma yüzeyinden başlayarak her iki malzemeye de zarar verir ve zamanla malzemelerin birbirlerinden ayrılmasına sebep olur.



Şekil 1.1: Homojen seramik kaplama ve malzeme üzerinde meydana gelen çatlaklar (Özarslan, 2007).

Kompozit malzemelerde malzeme özelliğinin bağlanma yüzeyinde aniden değişmesi dolayısıyla ortaya çıkan bu tür sorunlar sebebiyle mühendislik çalışmalarında *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (Functionally Graded Materials)* adıyla yeni bir sınıf ortaya çıkmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), tanımlanmış bir fonksiyona bağlı olarak malzeme özelliğinin, malzeme üzerinde bir yüzeyden diğer yüzeye farklılık gösterdiği heterojen kompozitlerdir. Bu heterojen kompozitlerin bilim dünyasıyla tanışması ilk olarak 1980'li yıllarda gerçekleşmiştir (Koizumi, 1997). Yüzey gerilmelerini azaltma özelliklerinden dolayı FDM'ler, ortaya çıktıklarından itibaren havacılık, elektronik, enerji, kimya mühendisliği, optik malzemeler ve biyomedikal mühendisliği olmak üzere çok geniş çerçevede uygulama alanı bulmuşlardır. FDM'ler gaz türbini motorlarında ve roket nozüllerinde termal bariyer kaplaması olarak (Koizumi, 1997) kullanılmıştır. Ayrıca derecelendirilmiş nano kompozitler, biyolojik implantlarda (Pompe ve diğ., 2006), mikro elektromekanik sistemlerin (MEMS) kaplanmasında (Witvrouv, Mehta, 2005), sensörlerde (Muller ve diğ., 2003) ve aşınmaya dayanımlı kaplamalarda (Schulz ve diğ., 2003) kullanılmışlardır. Son 20 yılda FDM'ler oldukça ilgi çekmiş ve teorik, sayısal ve deneysel olmak üzere birçok araştırma yapılmıştır. Özellikle ortasında dairesel delik bulunan plakada delik çevresindeki gerilme yığılması faktörünün incelenmesi, literatürde önemli yer tutmaktadır. Dairesel delikli plakalarda fonksiyonel derecelendirme işlemi için genel olarak kullanılan güç fonksiyonuna alternatif olması amacıyla teorik çalışmalarla, derecelendirmeyi sağlayacak farklı fonksiyonlar tanımlanmıştır (Mohammadi ve diğ., 2010). Yine dairesel delikli plakalar için sayısal analiz içeren çalışmalar yapılmıştır. İsoparametrik sonlu eleman formülasyonu kullanılarak tek eksenli gerilme altında delik çevresindeki gerilme yığılması incelenmiş ve elastite modülünün delik çevresinden plaka dışına doğru artmasıyla delik çevresindeki gerilme değerinin düştüğü görülmüştür (Kubair ve Bhanu-Chandar, 2008). Yang ve diğerleri plakayı eşit kalınlıktaki halkalara ayırarak ve bu halkalara homojen malzemeler atayarak elastisite modülünün değişik değerlerinde gerilme değerlerini hesaplamışlardır (Yang ve diğ., 2009).

1.1.Çalışmanın Amacı

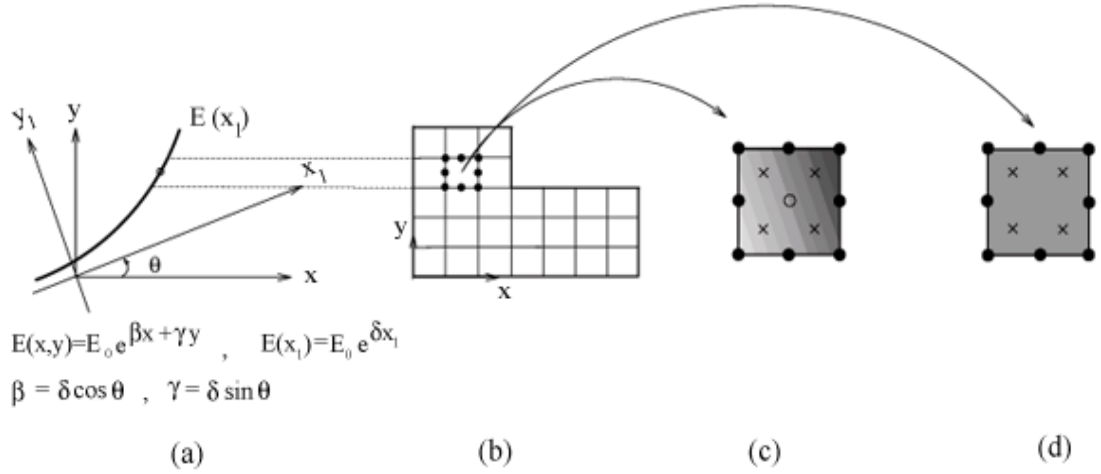
Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler üzerine yapılan çalışmalar genelde, malzeme özelliğinin parça kalınlığı ekseninde lineer fonksiyon, üstel fonksiyon ve güç fonksiyonu olarak değiştiği durumlar için yapılmıştır. Literatürde, malzemede çatlak etkisi, süreksizliklerden dolayı oluşan gerilme yığılmaları gibi konular üzerine kalınlık ekseninde derecelendirme yapılarak FDM'lerin kullanıldığı sayısız çalışma yapılmıştır (Berlo, 2009).

Yapılan bu çalışmada ortasında dairesel delik ve eliptik delik bulunan plaka için ayrı ayrı analiz çalışmaları yapılmıştır. Ortasında dairesel delik bulunan plaka için elastisite modülü radyal koordinata bağlı olarak hem üstel fonksiyon olarak hem de güç fonksiyonu olarak tanımlanmış, elde edilen sonuçlar literatürdeki analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ortasında eliptik delik bulunan plaka için elastisite modülü eliptik deliğin geometrisine bağlı olarak malzeme üzerinde değiştirilmiştir. Hem dairesel delik hem de eliptik delik için çalışmalar yapılarak dairesel delikten, çatlak formuna doğru giderken gerilme değerlerindeki değişimleri kontrol etmek amaçlanmıştır. Son olarak analizlerde kullanılan plakalardaki dairesel ve eliptik delikler farklı özelliklerdeki homojen malzemeler ile doldurularak maksimum gerilmenin değerindeki ve olduğu bölgedeki değişiklikler incelenmiştir.

2. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMENİN MODELLENMESİ

2.1. Sonlu Eleman Gösterimi

Sonlu elemanlar yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme(FDM) modellemesi, derecelendirilmiş veya homojen elemanlar kullanılarak yapılabilmektedir (Santare ve Lambros, 2000). Şekil 2.1 incelendiğinde; şeklin (a) bölümü üstel fonksiyon kullanılarak derecelendirilmiş malzemeyi, (b) bölümü bu malzemedeki L şeklindeki örnek alanı göstermektedir. (c) bölümünde malzeme özelliği sürekli ve düzgün değişken FDM modellenmesini sağlayan derecelendirilmiş eleman ve son olarak da (d) bölümünde adım adım yaklaşım metodunda(step-wise approximation) kullanılan homojen eleman görülmektedir.



Şekil 2.1: FDM lerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi: (a)homojen olmayan elastisite modülü, (b) örnek alan, (c) derecelendirilmiş eleman, (d) homojen eleman. Burada "." sembolü: Eleman üzerindeki her bir nodu, "x" sembolü: Gauss örnek noktasını ve "o" sembolü: Malzeme özelliğinin alındığı örnek noktayı göstermektedir (Paulino G. H. ve Kim J., 2007).

Derecelendirilmiş eleman kullanarak FDM modellemek homojen eleman kullanarak modellemeye göre daha karmaşık ve daha zordur.

Derecelendirilmiş sonlu elemanı bir sonlu elemanlar programına tanımlamak için öncelikle sertlik matrisini çözebilen bir kod paketi yazmak ve programı sonlu elemanlar programına bir alt program olarak okutmak gerekir.

2.2. Derecelendirilmiş Sonlu Eleman Formülasyonu

Bir isoparametrik sonlu elemanı için yük altında yer değiştirme aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$u(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) U_i \quad (2.1)$$

Burada $u(x)$ yer değiştirme bileşenleri matrisi, $N_i(x)$ şekil fonksiyonları matrisi ve U_i elemanın sahip olduğu “n” adet nodun her birinin nodal yer değiştirmesidir. $\varepsilon(x)$, sonsuz küçük birim yer değiştirmeleri bulmak için $N_i(x)$, şekil fonksiyonlarının uygun türevleriyle elde edilen $B_i(x)$ matrisi kullanılır.

$$\varepsilon(x) = \sum_{i=1}^n B_i(x) U_i \quad (2.2)$$

Lineer elastik malzeme özelliğini esas alırsak; bir noktadaki gerilme bileşenleri $\sigma(x)$ birim yer değiştirme ve malzeme özellikleri matrisi ile kolaylıkla bulunabilir.

$$\sigma(x) = c(x) \varepsilon(x) \quad (2.3)$$

Normalde malzeme özelliği her yerde aynı olan malzemeler ile çalışırken $c(x)$ matrisi bileşenleri her bir sonlu eleman için sabit değerlerden oluşurlar. Fakat amaç derecelendirilmiş bir eleman tanımlamak ise $c(x)$ matrisi bileşenlerinden en az biri istenilen bir koordinata bağlı olmalıdır. $c(x)$ matrisi E , elastisite modülü ve ν , poisson oranı bileşenlerinden oluşmaktadır ve genel olarak matris ve bileşenleriyle tanımlanır (Sadd, 2005);

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{12} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$C_{11} = C_{22} = E/(1 - \nu^2) \quad (2.5)$$

$$C_{12} = E\nu/(1 - \nu^2) \quad (2.6)$$

$$C_{66} = E/2(1 + \nu) \quad (2.7)$$

Eleman sertlik matrisi K^e , U_i nodal yer değiştirmeleri f_i nodal kuvvetlere göre tanımlayan lineer fonksiyon olarak tanımlanır.

$$f_i = K^e U_i \quad (2.8)$$

Virtüel işler ilkesine göre nodal kuvvetler tarafından yapılan iş eleman içerisindeki deformasyona eşit olmak zorundadır. Bu iki sonucu birbirine eşitleyerek eleman sertlik matrisi 2.9 denklemindeki gibi yazılabilir;

$$K^e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B^T(x_i, y_i) C(x_i, y_i) B(x_i, y_i) |J(x_i, y_i)| W_i W_j \quad (2.9)$$

Bu denklemde i ve j eleman üzerindeki ilgili Gauss örnekleme noktalarını, J Jacobian matrisi ve W_i ve W_j her bir Gauss noktasının ağırlığını ifade eder.

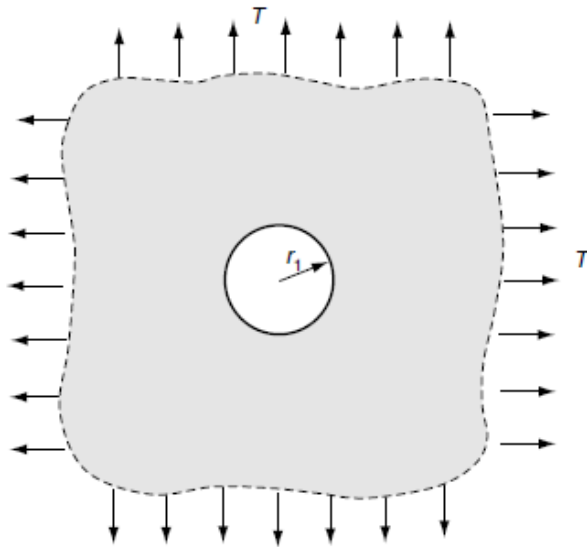
Literatür araştırmalarında, elde edilen sertlik matrisini çözen bir alt program yazıp bu alt programı sonlu elemanlar programına okutup, sürekli değişken bir malzeme yapısı elde edebilen çalışmalara rastlanmıştır (Berlo, 2009). Fakat bu şekilde bir alt programı Ansys sonlu elemanlar programında tanımlayan örneklere rastlanmamıştır. Çalışmanın ilk zamanlarında sürekli değişken malzeme yapısını tanımlayabilmek için çaba sarfedilmiş fakat daha fazla zaman kaybetmemek amacıyla Ansys programının elastisite modülünü sıcaklığa bağlı tanımlayabilme fonksiyonu kullanılarak adım adım yaklaşım (step-wise approximation) metodu kullanılmıştır.

3. ORTASINDA DAİRESEL DELİK BULUNAN PLAKADA ÇİFT EKSENLİ YÜK ALTINDA GERİLME YIĞILMASI FAKTÖRÜ

3.1. Üstel Fonksiyon ile Tanımlanmış Elastisite Modülü ile Derecelendirilmiş Plakanın Analizi

Analiz sonuçlarının tutarlılığını kontrol etmek amacıyla yapılan her çalışma literatürde sunulan analitik değerler, tablolar, formüller vb. kaynaklar ile karşılaştırılmıştır. Literatürde “ortasında delik bulunan homojen malzemeli plakada gerilme yığılması” konusu üzerine birçok çalışma vardır. Bu çalışmalar, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler üzerinde sonlu elemanlar analizi yapmadan önceki aşamada; sonlu elemanlar modelinin hazırlanması, kullanılacak eleman tipi, eleman sayısı, eleman yoğunluğu gibi faktörlerin tanımlanmasında önemli rol oynarlar.

Yapılan bu çalışmada elastisite modülünün delik çeperinden itibaren yarıçap boyunca bir fonksiyona bağlı olarak değişmesiyle, plakada ortaya çıkan maksimum gerilmenin yeri ve değerinin değişimi çözülmüştür. Ortasında delik bulunan plaka için hem üstel olarak değişen hem de güç fonksiyonu olarak değişen elastisite modülü için analiz çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 3.1: Ortasında dairesel delik bulunan plakada çift eksenli gerilme durumu (Sadd, 2009).

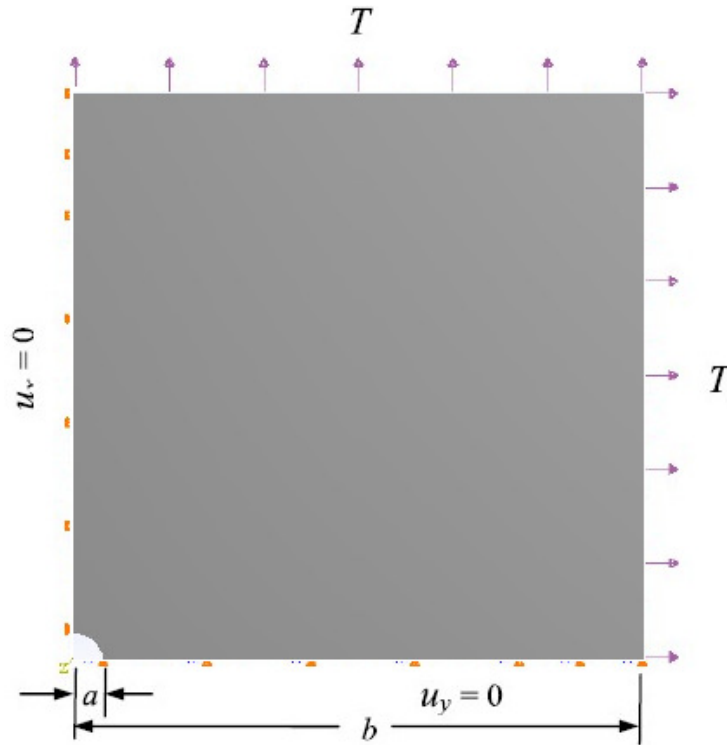
Homojen yapıda çift eksenli düzlemsel T gerilmesine maruz kalmış plakada maksimum gerilme delik çeperinde oluşur ve değeri de tek eksenli gerilme durumlarında ortaya çıkan gerilme değerlerinin süperpozisyonu ile bulunur.

Süperpozisyon işlemi sonrası $\sigma_{max} = 2T$, ve dolayısıyla gerilme yığılması faktörü 2 bulunur (Sadd, 2009).

Bilinen bu analitik değere göre homojen malzemede sonlu elemanlar analizi yapılmış ve uygun sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır.

3.1.1. Sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları

Yapılan çalışmalarda sonlu eleman sayısını azaltmak ve buna bağlı olarak zamandan kazanmak amacıyla 40x40 mm. boyunda plakanın simetrik 1/4 plaka modeli kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modeli şekil 3.2’de gösterilmiştir.

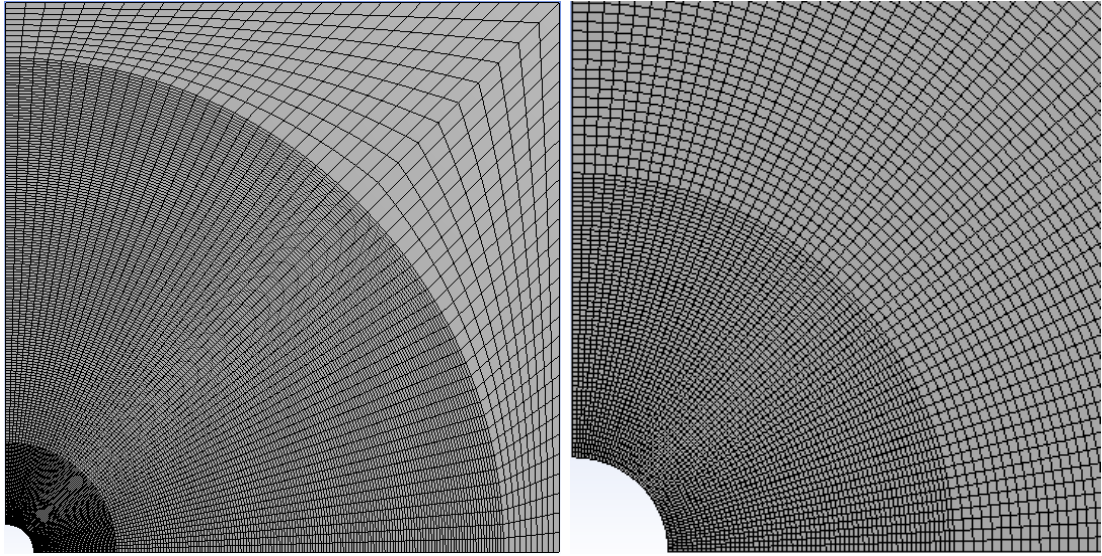


Şekil 3.2: Simetrik 1/4 sonlu elemanlar modeli.

Model üzerinde; $a=1\text{mm}$, $b=20\text{mm}$ ve $T=50\text{ Mpa}$ 'dır. Model üzerinde y ekseninde bulunan kenara x ekseninde, x ekseninde bulunan kenarada y ekseninde yer değiştirme sınır koşulları tanımlanmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ile analizlere başlamadan önce kullanılacak sonlu eleman tipi ve yoğunluğuna karar vermek amacıyla homojen malzeme ile

analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Unutulmamalıdır ki homojen malzemelerde gerilme yığılması faktörü elastisite modülüne veya parça boyutuna bağlı değildir, yalnızca parçanın geometrisine bağlıdır. Bu sebeple homojen malzeme üzerinde analiz yaparken amacımız gerilme yığılması faktörünü bulmak ise malzemenin çelik, alüminyum vb. olması önemli değildir. Herhangi bir malzeme seçilebilir. Analizlerde, 2 boyutlu düzlem sonlu elemanı olan plane183 kullanılmıştır. Analitik değere en yakın sonucu elde etmek amacıyla çeşitli denemeler yapılmış ve delik çeperindeki maksimum gerilme $\sigma_{max} = 100,18\text{MPa}$, buna bağlı olarak da gerilme yığılması faktörü 2,0036 bulunmuştur. Analitik sonuçla karşılaştırıldığında %0,18’lik kabul edilebilir bir hatayla sonuca varıldığı anlaşılmış ve bu modelle fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler için çalışmalara başlanmıştır. Analizlerde kullanılan sonlu elemanlar ağı şekil 3.3’de görülmektedir. Çift eksenli yük altında gerilmenin delik çeperinde yoğunlaşacağı öngörüldüğü için delik çeperinde belirli bölgede sonlu eleman yoğunluğu artırılmıştır.



Şekil 3.3: Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı.

Elastisite modülünün üstel fonksiyona bağlı olarak değiştiği durum için analiz çalışmalarına referans çalışma olarak, Mohsen Mohammadi, John R. Dryden ve Liying Jiang’ın yayınladığı “Stress concentration around a hole in radially inhomogeneous plate” adlı makale kullanılmıştır.

Elastisite modülünün değişimini veren denklemler aşağıdaki gibidir (Mohammadi ve diğ., 2010).

$$E = E_{\infty} \exp[\eta \rho^s] \quad (3.1)$$

$$\rho = r/a \quad (3.2)$$

$$s = -1/t \quad (3.3)$$

Burada;

E : Elastisite modülü

η : Delik çeperindeki sertliği veren parametre

ρ : Boyutsuz yarıçap değeri

r : Radyal koordinat

a : Delik yarıçapı

s : Delik çeperinden itibaren derecelendirme derinliğini veren parametredir.

Ansyes programında elastisite modülünü yukarıdaki gibi bir fonksiyona bağılı olarak tanımlamamızı sağılayan bir komut veya tek adımlık bir işlem yoktur. Programda elastisite modülü sıcaklığı bağılı bir parametre olarak girilebilmektedir. Bu özelliğı kullanabilmek amacıyla elastisite modülünü tanımlayan fonksiyonu aynı şekilde sıcaklığı tanımlamak için kullanmamız gerekmektedir. Sonrasında da mühendislik data kısmında elastisite modülünü her noktada sıcaklığı eşitlenmesi ve de sıcaklığın fiziksel etkisinden kurtulmak amacıyla ısı genleşme katsayısını sıfır olarak tanımlamak gerekmektedir. Bu işlemler sonrasında elastisite modülü radyal koordinata bağılı olarak tanımlanmış olmaktadır.

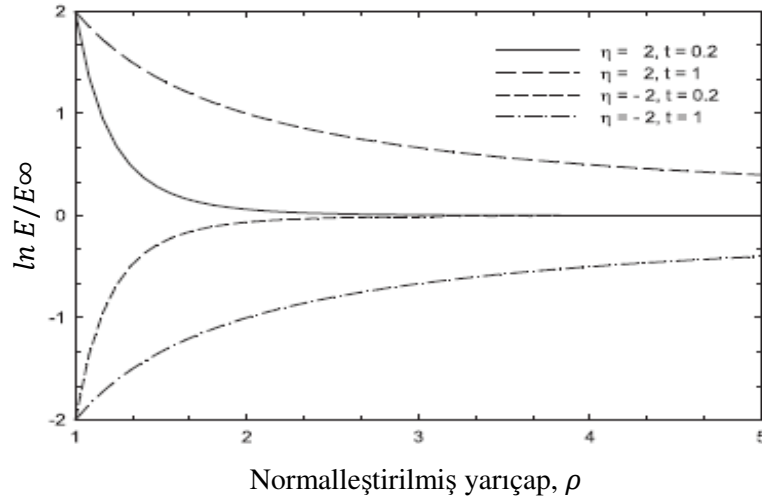
Tanımlama işleminin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla sıcaklık – radyal koordinat grafiğinde elde edilen değerler makalede verilmiş olan normalleştirilmiş elastisite modülü – normalleştirilmiş yarıçap grafiğı, şekil 3.4 ile karşılaştırılmış ve fonksiyonun düzgün çalıştığına karar verdikten sonra analiz işlemine geçilmiştir.

Analiz çalışmalarında delik yarıçapından model sınırına kadar 100 adet sıcaklık değeri, buna bağılı olarak elastisite modülü değeri girilerek malzeme yapısı tanımlanmıştır.

Analiz sonuçlarının doğruluğunu karşılaştırmak için makalede verilen kapalı formdaki gerilme yığılması faktörü formülü kullanılmıştır.

$$K_0 = 2\exp(\eta)\Sigma_0 \quad (3.4)$$

K_0 : Gerilme yığılması faktörü



Şekil 3.4: Normalleştirilmiş elastisite modülü - normalleştirilmiş yarıçap grafiği.

Σ_0 : Normalleştirilmiş gerilme yığılması faktörü

Normalleştirilmiş gerilme yığılması faktörünün çözümü için makalede Kummer fonksiyonun çözümü işaret edilmiştir.

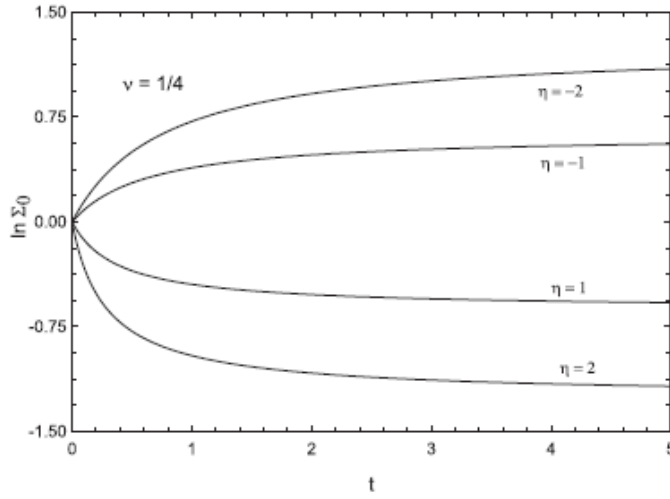
$$\Sigma_0 = \frac{1}{M(-\frac{1+\nu_0}{s}, 1-\frac{2}{s}, \eta)} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’de payda değeri $M(a, b, x)$ Kummer fonksiyonunu tanımlamaktadır. Normalleştirilmiş gerilme yığılması faktörünü elde edebilmek için, Kummer fonksiyonu, verilen değerler için, hazır bir Matlab paket programı kullanılarak çözülmüştür. Bu şekilde elde edilen gerilme yığılması faktörü ile analiz sonuçları karşılaştırılmış ve hata oranları ortaya çıkarılmıştır.

Elde edilen sonuçlar makalede verilen $\ln \Sigma_0 - t$ grafiği ile de karşılaştırılarak analitik olarak bulunan sonuçların grafikteki değerlere yakın olduğu görülmüş böylelikle çözümlerin doğruluğu garanti altına alınmıştır.

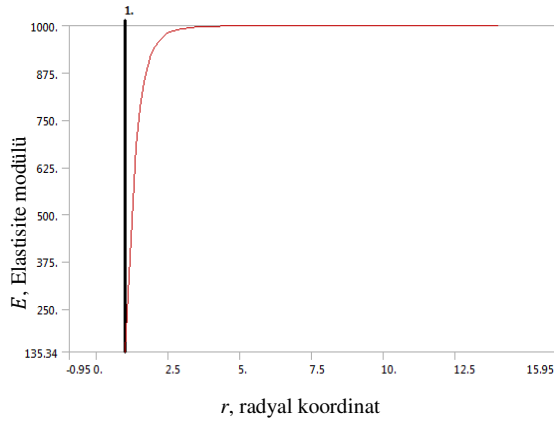
$\ln \Sigma_0 - t$ grafiğinden görüleceği gibi t ’nin 0 – 1 aralığındaki değerleri için gerilme yığılması faktörü daha fazla değişim göstermektedir. Büyük t değerleri için sonuçlar $\pm 5\eta/8$ değerine yakınsamaktadır.

Analizlerde E_∞ değeri 1000 Mpa, poisson oranı, ν ise 0.25 olarak tanımlanmıştır. η ve t değerlerinin değişimi ile model üzerinde elastisite modülünün nasıl değiştiğini görsel olarak göstermek adına bu makale için yapılan analizlerin elastisite modülü değişim grafikleri ve gerilme değerleri ekran görüntüleri olarak şekil 3.6’dan başlayarak gösterilmiştir.

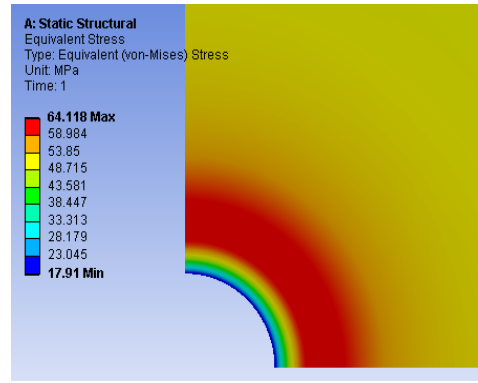


Şekil 3.5: $\ln \Sigma_0 - t$ grafiği.

➤ $\eta = -2, t = 0.2$



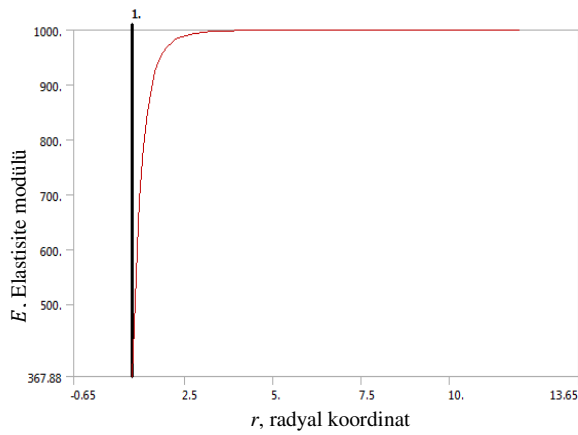
(a)



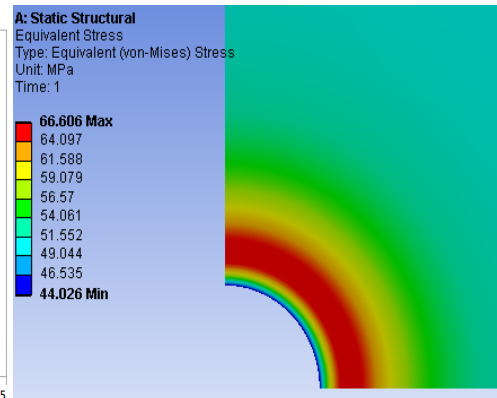
(b)

Şekil 3.6: $\eta = -2, t = 0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = -1, t = 0.2$



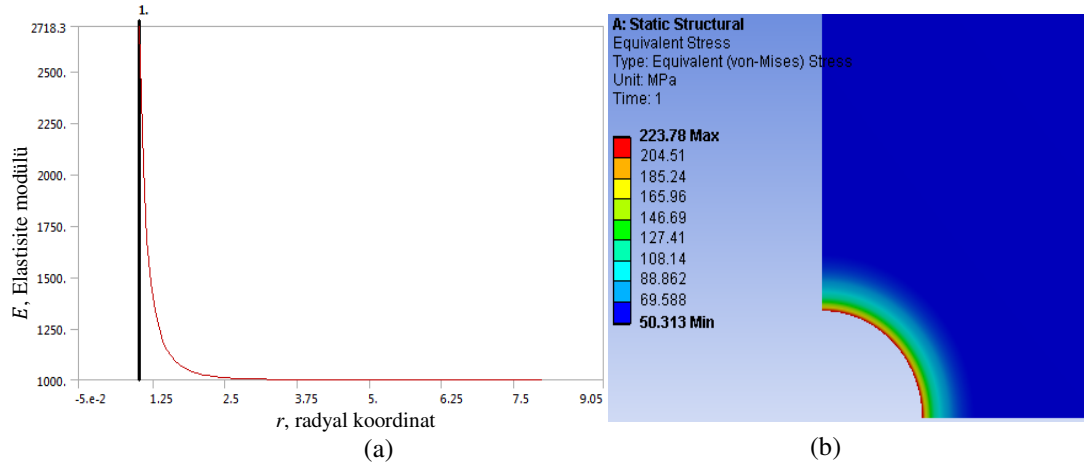
(a)



(b)

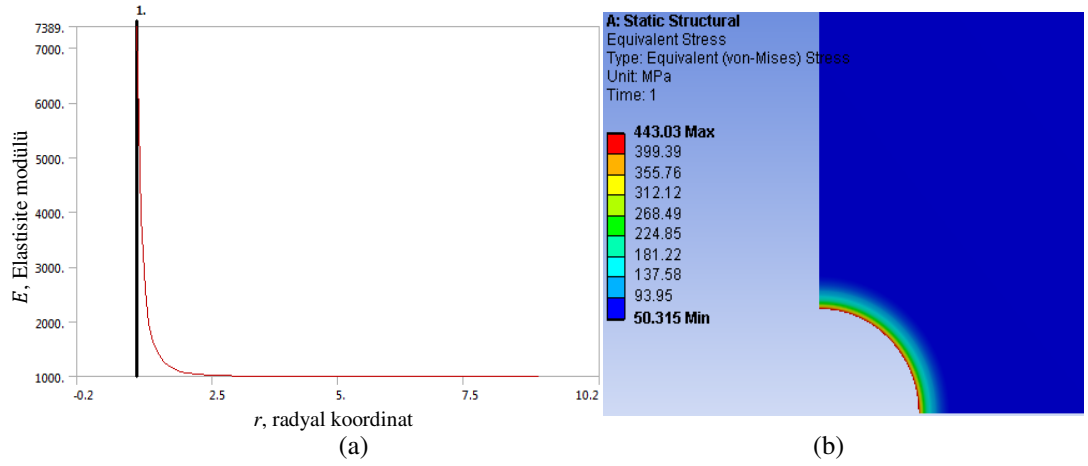
Şekil 3.7: $\eta = -1, t = 0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = 1, t = 0.2$



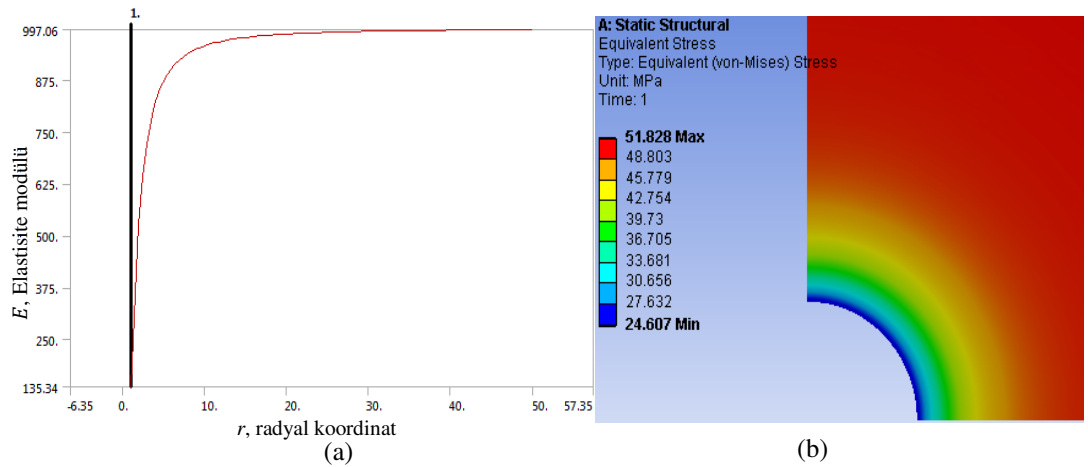
Şekil 3.8: $\eta = 1, t = 0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = 2, t = 0.2$



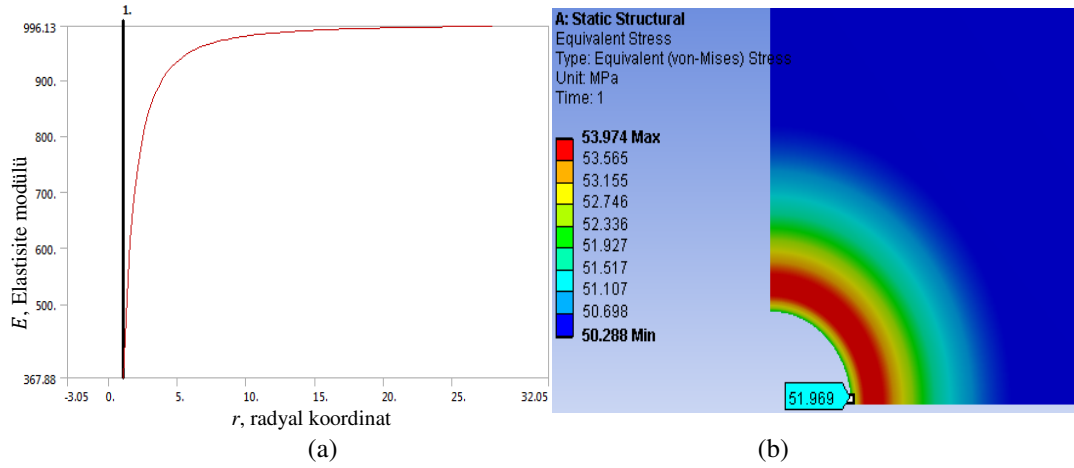
Şekil 3.9: $\eta = 2, t = 0.2$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = -2, t = 0.6$



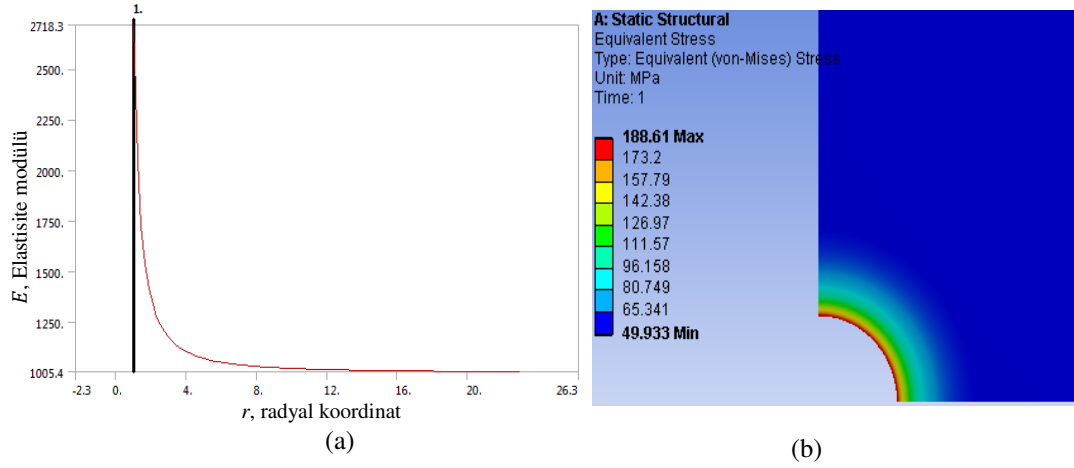
Şekil 3.10: $\eta = -2, t = 0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = -1, t = 0.6$



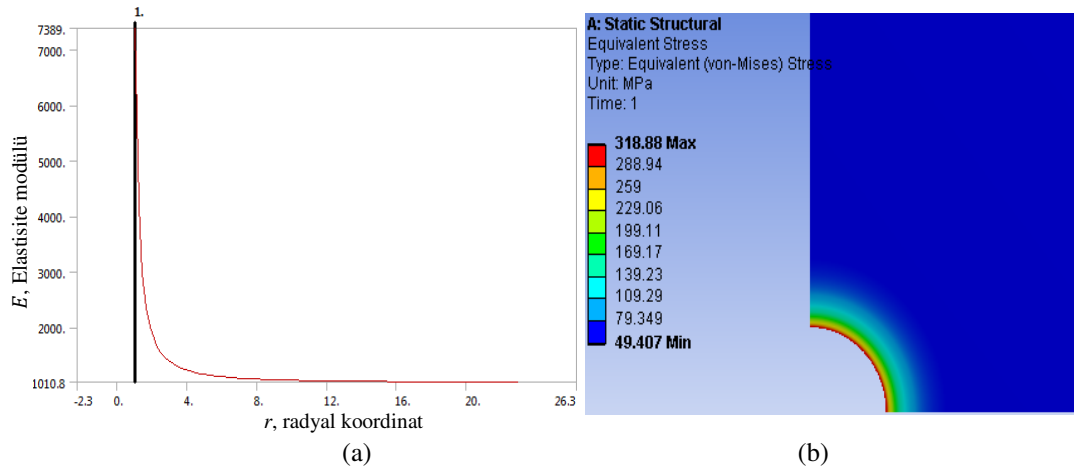
Şekil 3.11: $\eta = -1, t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çevresindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = 1, t = 0.6$



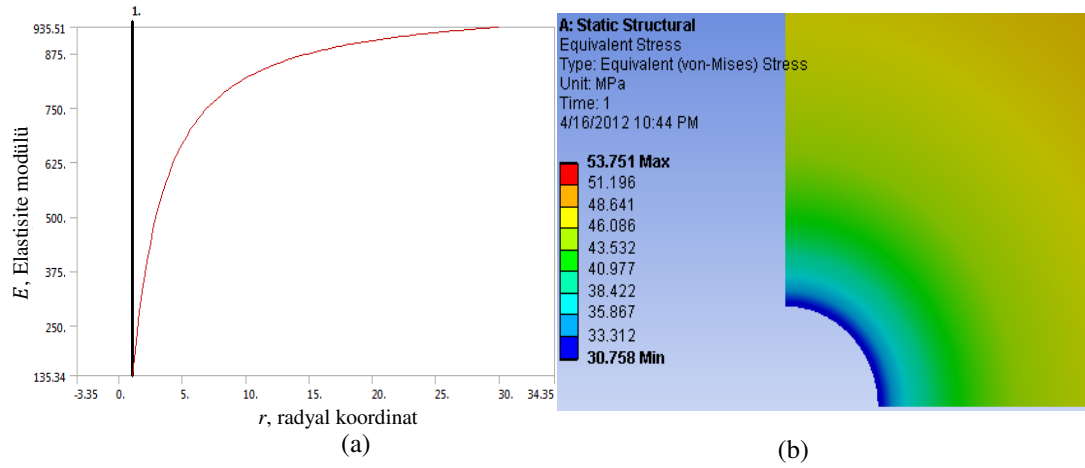
Şekil 3.12: $\eta = 1, t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çevresindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = 2, t = 0.6$



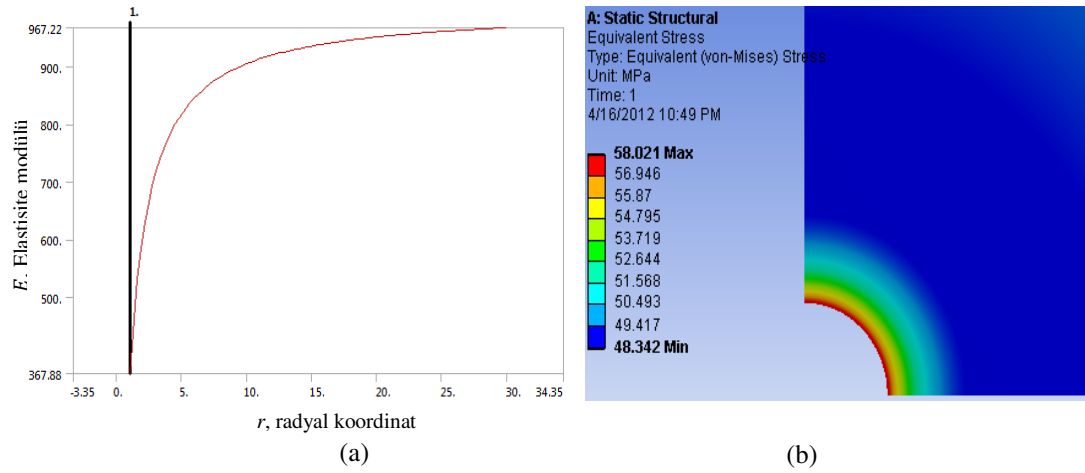
Şekil 3.13: $\eta = 2, t=0.6$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çevresindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = -2, t = 1$



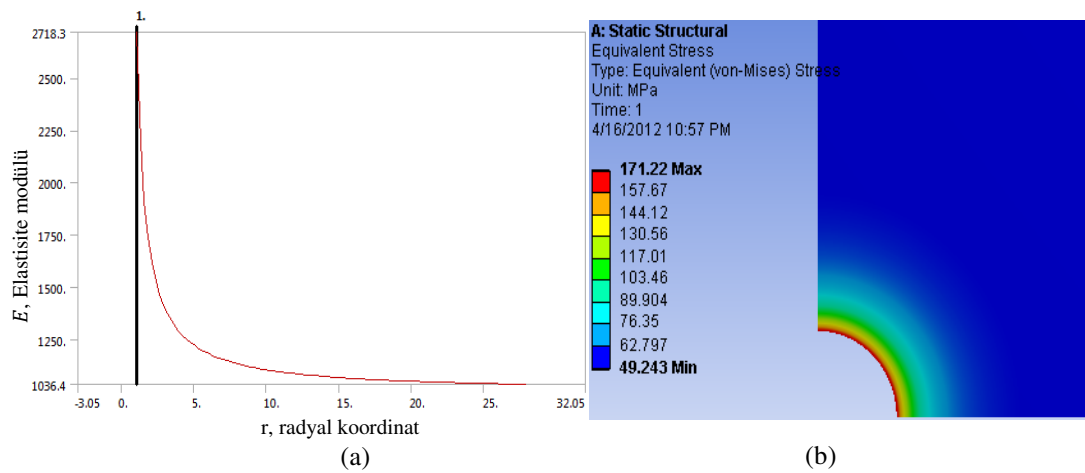
Şekil 3.14: $\eta = -2, t = 1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = -1, t = 1$



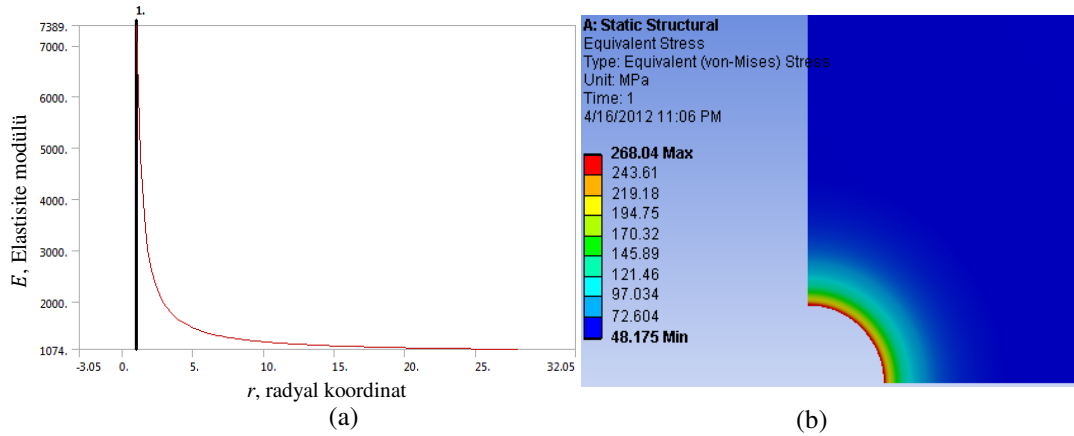
Şekil 3.15: $\eta = -1, t = 1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = 1, t = 1$



Şekil 3.16: $\eta = 1, t = 1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

➤ $\eta = 2, t = 1$



Şekil 3.17: $\eta = 2, t = 1$ durumunda (a) E-r grafiği, (b) Delik çeperindeki gerilme değerleri.

Yukarıdaki grafikler sırasıyla incelenecek olursa η parametresinin delik çeperindeki elastisite modülünün değerini etkilediği, t parametresinin ise elastisite modülünün malzeme üzerindeki dağılımını etkilediği görülebilir. η parametresinin sıfırdan küçük olduğu değerler için elastisite modülü, delik çeperinden dış sınırlara doğru gidildikçe artmaktadır (yüzey yumuşatma), aksi durumda ise delik çeperinden dış sınırlara doğru gidildikçe azalmaktadır (yüzey sertleştirme).

Grafiler $\eta < 0$ ve $\eta > 0$ değerleri için 2 durumda incelendiğinde şu çıkarımlar yapılabilir;

➤ $\eta < 0$

η sabit tutulup t değeri artırılırsa delik çeperindeki gerilme değerinin sürekli arttığı maksimum gerilmenin de önce delik çeperindeki gerilme değerine yaklaştığı, sonrasında delik çeperinde ortaya çıkıp sürekli arttığı görülür. η artırılır (sıfıra yaklaşır) t değeri sabit tutulursa delik çeperindeki gerilme değerinin yine sürekli arttığı maksimum gerilmenin delik çeperinde ortaya çıkana kadar pek değişmediği delik çeperine geldiği noktadan itibaren artışa geçtiği görülür.

➤ $\eta > 0$

Homojen durumda zaten delik çeperinde ortaya çıkan maksimum gerilme yüzey sertleştirme durumunda bütün parametre değerleri için delik çeperinde ortaya çıkar η artarsa maksimum gerilme artar, η sabit kalıp t değeri artarsa maksimum gerilme homojen durumdaki gerilme değerine doğru yaklaşır.

Yukarıdaki şekillerdeki durumlar için elde edilen gerilme yığılması değerleri tablolar

halinde aşağıda verilecektir. Burada unutulmaması gereken bütün gerilme yığılması faktörü değerleri delik çeperindeki gerilme değerleri alınarak elde edilmiştir. Yani önemli olan grafiklerdeki maksimum gerilme değeri değil, delik çeperinde ortaya çıkan gerilme değeridir. Bu sebeple tablo değerleri ekran görüntüleriyle karşılaştırılmak istenirse, delik çeperindeki gerilme değerini hesaba katmak gerekir. Bu sayede homojen malzemedeki duruma göre karşılaştırma yapma olanağı sağlanmaktadır.

Aşağıda verilen çizelge 3.1’de analiz sonuçlarında elde edilen delik çeperindeki gerilme yığılması faktörlerinin, $M(a,b,x)$ Kummer fonksiyonunun çözülmesi sonucu elde edilen analitik değerler ile karşılaştırılması görülmektedir.

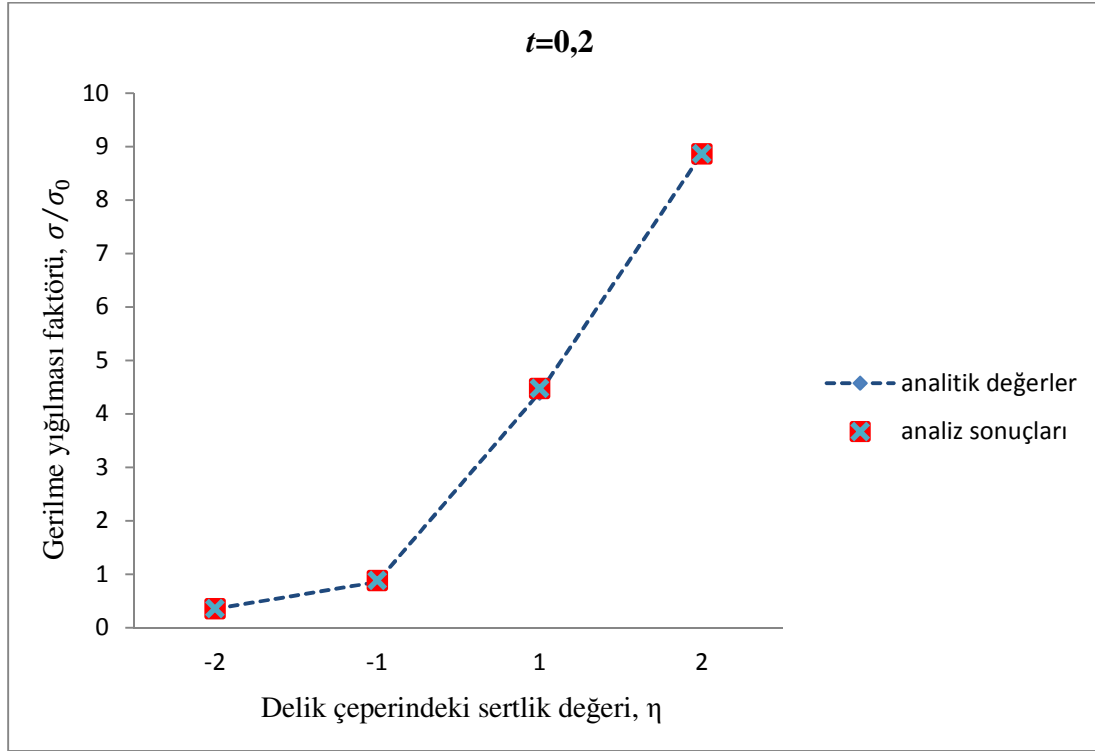
Çizelge 3.1: Ortasında dairesel delik bulunan fonksiyonel derecelendirilmiş plaka için analiz sonuçları(üstel fonksiyon).

t	η	σ/ T analitik değerler	σ/ T analiz sonuçları	% hata oranı
0.2	0	2	2.0036	0.18
	-2	0.352	0.358	1.76
	-1	0.856	0.88	2.80
	1	4.393	4.475	1.88
	2	8.857	8.86	0.04
0.6	-2	0.472	0.492	4.26
	-1	1	1.039	3.90
	1	3.726	3.772	1.24
	2	6.424	6.377	0.72
	-2	0.555	0.615	10.81
1	-1	1.083	1.16	7.11
	1	3.475	3.424	1.46
	2	5.67	5.36	5.45

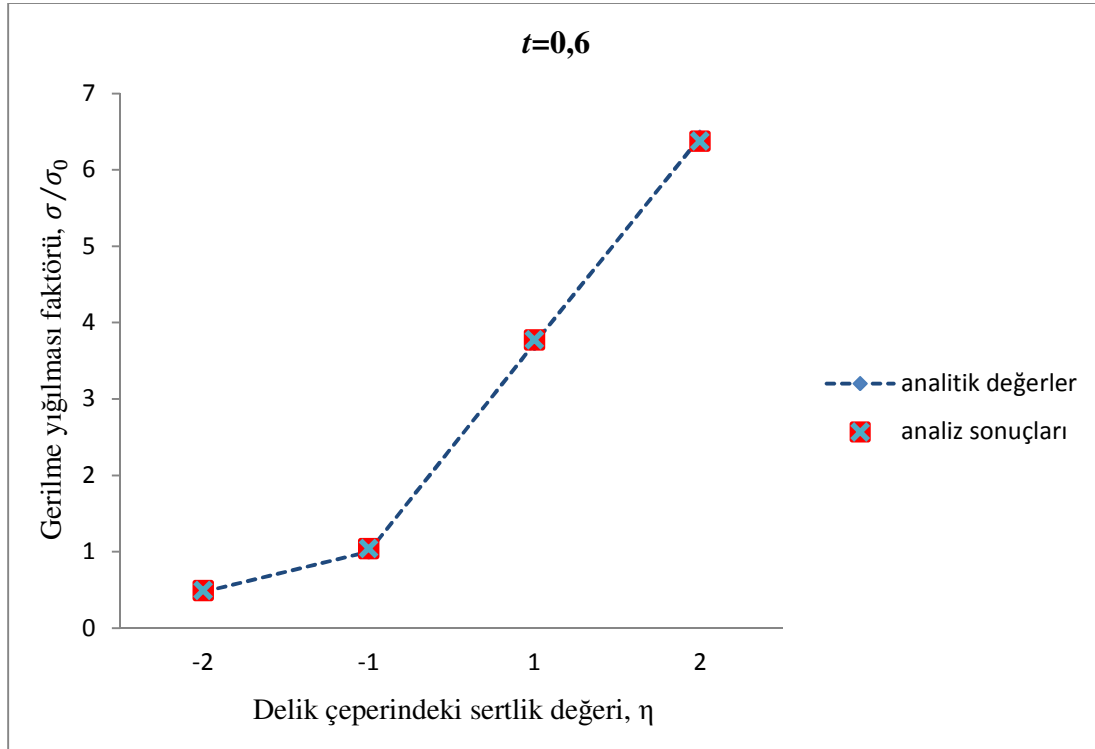
Sonuçta ortaya çıkan bazı hata değerlerinin diğerlerine göre yüksek olmasına rağmen analiz sonuçlarının analitik değerlerle tutarlılık gösterdiğini söylemek mümkündür. Aşağıdaki $t=0.2, 0.6, 1$ değerleri için oluşturulmuş, grafiklerde yüzey sertleştirme ve yüzey yumuşatma durumlarında gerilme yığılması faktörünün homojen duruma göre nasıl değiştiği rahatlıkla görülmektedir.

Derecelendirme derinliğinin en yüksek olduğu durumda yani $t=0.1$ iken en büyük hata oranı yüzey yumuşatmanın en fazla olduğu durumda ortaya çıkmıştır. Önceki grafiklerde verilen elastisite modülü – radyal koordinat değişim grafiklerinde görüleceği gibi $t=1$ olduğunda derecelendirme derinliği analizlerde kullanılan plaka

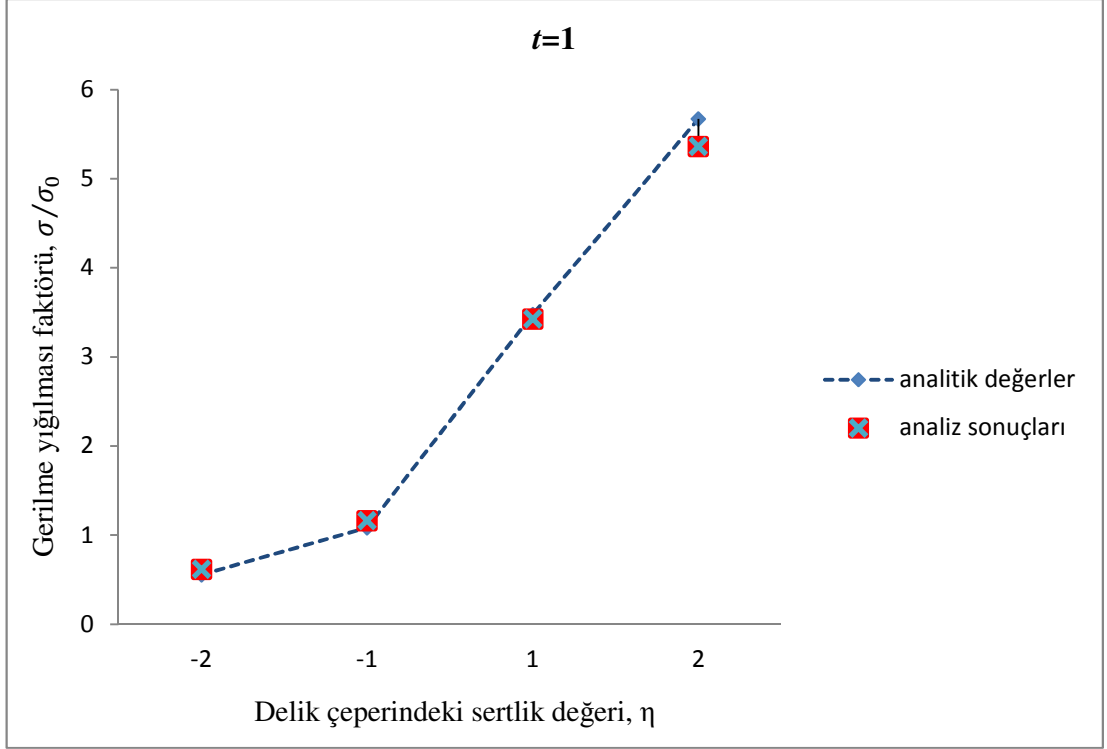
boyutunu aşmaktadır. Malzeme üzerinde elastisite modülünün temel elastisite modülüne yakınsamaması hata oranlarında artışa sebep olmuştur.



Şekil 3.18: t=0.2 için analitik değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 3.19: t=0.6 için analitik değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 3.20: $t=1$ için analitik değerler ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

3.2.Güç Fonksiyonu ile Tanımlanmış Elastisite Modülü ile Derecelendirilmiş Plakanın Analizi

Ortasında dairesel delik bulunan plakada üstel fonksiyon ile elastisite modülünün tanımlanmasından sonra aynı plaka üzerinde bu sefer de literatürde sıkça geçen güç fonksiyonu (power function) ile elastisite modülünü tanımlayarak analiz çalışmaları yapılmış, gerilme değerleri ve yeri incelenmiştir. Güç fonksiyonu ile yapılan bu çalışma, bilinen bir fonksiyon kullanarak elde ettiğimiz sonuçların doğruluğuna bakarak bir önceki çalışmada elde edilen sonuçların doğruluğundan bir kez daha emin olmamızı sağlamıştır.

Bu çalışmada elde edilen analiz sonuçlarına referans olması amacıyla Martin Howard Sadd'ın Theory: Elasticity, Applications and Numerics (2009) kitabının homojen olmayan elastisite(Nonhomogeneous Elasticity) bölümünde içi boş silindir kesit için çıkarmış olduğu analitik denklemler kullanılmıştır. İçi boş silindir kesiti şekil 3.21'de gösterilmektedir.

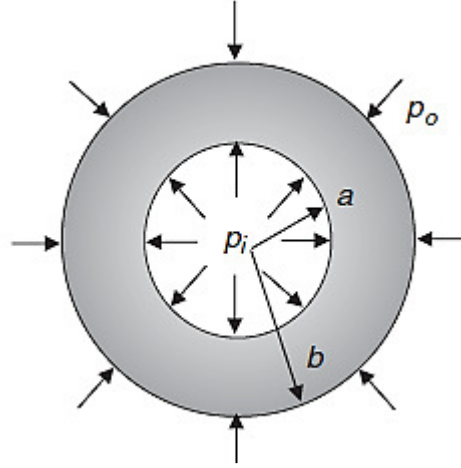
Kesit üzerinde gösterilen parametreler şunları ifade etmektedir.

p_i : iç basınç

p_0 : dış basınç

a : silindir iç çapı

b : silindir dış çapı



Şekil 3.21: Düzgün dağılmış basınç altındaki içi boş silindir kesiti (Sadd, 2009).

Kitapta ifade edilen genel gerilme denklemlerinde iç basıncın $P_i = 0$ olduğu durum için düzenlemeler yapıldığında aşağıdaki radyal ve teğetsel gerilme denklemleri elde edilmektedir.

$$\sigma_r = -\frac{P_0 b^{\frac{2+k-n}{2}}}{b^k - a^k} \left[r^{\frac{-2+k+n}{2}} - a^k r^{\frac{-2-k+n}{2}} \right] \quad (3.6)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{P_0 b^{(2+k-n)/2}}{b^k - a^k} \left[\frac{2+kv-nv}{k-n+2v} r^{(-2+k+n)/2} + \frac{2-kv-nv}{k+n-2v} a^k r^{(-2-k+n)/2} \right] \quad (3.7)$$

$$k = \sqrt{n^2 + 4 - 4nv} > 0 \quad (3.8)$$

$$K = \sigma_\theta(a)/T \quad (3.9)$$

Burada k sabit bir sayıyı, n ise güç fonksiyonu indisini ifade etmektedir. Çalışmada çift eksenli çekme gerilmesine maruz kalan plaka kullanıldığı için dış basıncı tanımlayan p_o yerine, kullanılan çekme gerilmesini $-T$ olarak yazılarak denklemler probleme göre tanımlanmış olur.

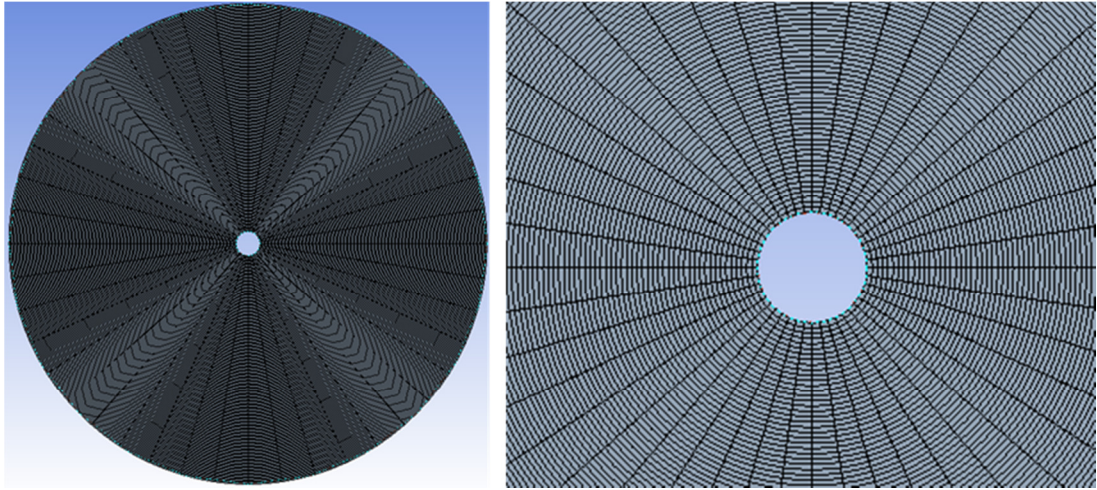
Elastisite modülünün radyal koordinata göre değişimini sağlayacak olan güç fonksiyonu denklemi aşağıdaki gibidir.

$$E_{(r)} = E_0 \left(\frac{r}{a} \right)^n \quad (3.10)$$

Denklemden r , radyal koordinatı tanımlamaktadır.

Dairesel delikli dikdörtgen plakada analiz yapıp çıkan sonuçları analitik değerlerle karşılaştırmadan önce hem denklemleri hem de kurulacak sonlu elemanlar modelini test etmek amacıyla şekil 3.21’de gösterilen kesit üzerinde analiz yapılmış, sonuçların tutarlılığı teyit edilmiştir. Öncelikle model üzerindeki sonlu elemanlar yoğunluğuna karar vermek amacıyla, ilk analiz homojen malzeme üzerinde yapılmıştır. Homojen malzeme tanımlamak için güç fonksiyonu denkleminde $n=0$ vermek yeterlidir. Çeşitli denemeler sonucu $n=0$ için analitik değere en yakın gerilme yığılması katsayısı 2,0092 bulunmuştur. Analitik denklem çözümündeki sonuç ise 2,005 çıkmıştır. İki sonuç karşılaştırıldığında % 0,2’lik bir hata ortaya çıktığı görülmüş ve bu hatanın kabul edilebilir bir hata olduğuna karar verilmiştir. Silindirik kesit için kullanılan ağ yapısı şekil 3.22’de gösterilmiştir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tanımlarken kullanılan parametre değerleri $b/a = 20$, $\nu = 0.25$ ve $E_0 = 200$ GPa, $T = 50$ MPa şeklindedir.

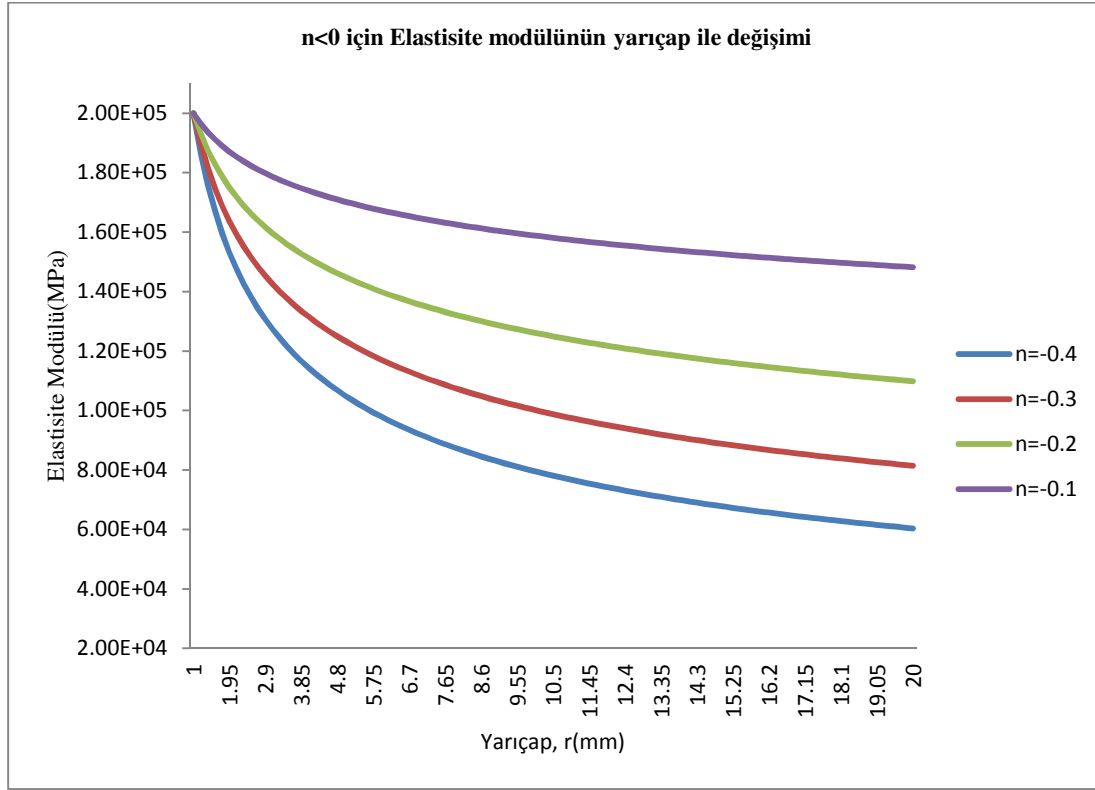


Şekil 3.22: Silindirik kesit için ağ yapısı.

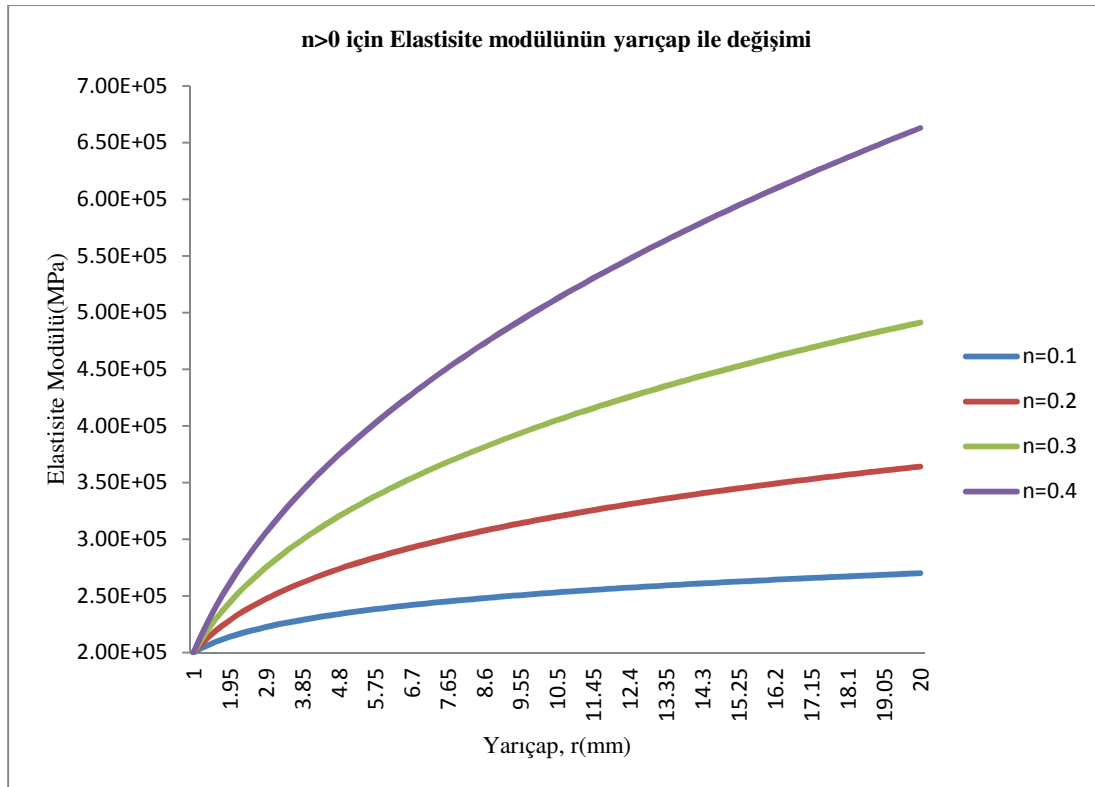
Sonlu eleman yoğunluğunun yeterli olduğuna karar verilip $n=-0,3$, $n=0,1$, $n=0,4$ değerleri için fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tanımlanıp analizler yapılmıştır ve gerilme yığılması faktörleri sırasıyla 2,8564, 1,7698, 1,1738 olarak bulunmuştur. Analitik çözümler sonucu yine sırasıyla 2,8526 (% 0,13 hata), 1,7657(% 0,23 hata), 1,1703(% 0,3 hata) değerleri bulunmuştur. Bu sonuçlar yeterli görülüp diğer analiz çalışmaları dikdörtgen kesitli plaka üzerinde yapılmıştır.

Dikdörtgen kesitli plaka için analiz çalışmalarında üstel fonksiyon için kullanılan modelin ve ağ yapısının aynısı kullanılmıştır, yalnızca elastisite modülünü tanımlamak için güç fonksiyonu girilmiştir. Güç fonksiyonu kullanıldığında farklı

$n < 0$ ve $n > 0$ değerlerinde elastisite modülünün radyal koordinat ile değişimini veren grafikler aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 3.23: $n < 0$ için elastisite modülünün radyal koordinat ile değişimi.



Şekil 3.24: $n > 0$ için elastisite modülünün yarıçap ile değişimi.

Grafiklerden görüleceği gibi $n < 0$ değerleri için elastisite modülü delik çeperinden dışarıya doğru azalmakta $n > 0$ değerleri içinse artmaktadır. Üstel fonksiyon ile yapılan çalışmalarda edinilen tecrübeler üzerine, elastisite modülünün delik çeperinden itibaren artmasının delik çeperindeki gerilme yığılmasının azalmasına, tam tersi durumun ise gerilme yığılmasının artmasına sebep olması beklenmektedir. Grafiklerde verilen n değerleri için analitik sonuçlar bulunmuş ve analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak hata oranları çıkarılmıştır. Aşağıda verilen çizelge 3.2’de elde edilen gerilme yığılması faktörleri ve analitik sonuçlara göre hata oranları gösterilmiştir.

Çizelge 3.2: Ortasında dairesel delik bulunan fonksiyonel derecelendirilmiş plaka için analiz sonuçları (güç fonksiyonu).

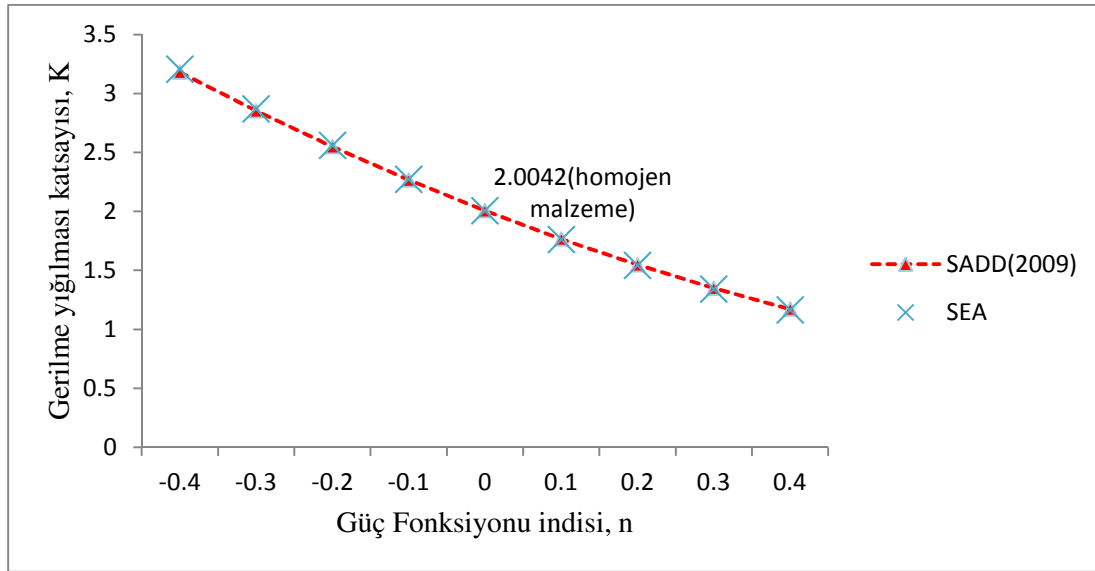
n	K(analitik değerler)	K(SEA)	% hata
-0.4	3.1792	3.203	0.74
-0.3	2.8526	2.8688	0.56
-0.2	2.5482	2.5576	0.36
-0.1	2.2657	2.2696	0.17
0	2.005	2.0042	-0.03
0.1	1.7657	1.7613	-0.24
0.2	1.5473	1.54	-0.47
0.3	1.3491	1.34	-0.67
0.4	1.1703	1.1642	-0.52

Çizelge değerlerine bakıldığında analiz sonuçlarının, analitik değerler ile hemen hemen tam uyumluluk gösterdiği söylenebilir. Grafikler ve çizelge birlikte yorumlandığında delik çeperinden itibaren elastisite modülü ne kadar artarsa, $n = -0.4$ ’de olduğu gibi, analiz sonucunda delik çeperindeki gerilme değeri de o kadar büyük çıkmaktadır. Aynı şekilde delik çeperinden itibaren elastisite modülü ne kadar çok azalırsa, $n = 0.4$ ’de olduğu gibi, analiz sonucunda delik çeperindeki gerilme değeri o kadar küçük çıkmıştır. Ayrıca veriler göstermektedir ki silindirik kesitte elde edilen sonuçlar ile dikdörtgen plaka üzerinde yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar birbirine çok yakındır. Bu da analiz için uygun değer $a/b = 20$ olduğunu göstermektedir.

Elastisite modülünün, üstel fonksiyon ile tanımlandığı çalışmalar; güç fonksiyonu ile tanımlandığı çalışmalar ile karşılaştırdığımızda ilk bakışta güç fonksiyonu ile yapılan çalışmalardaki hata oranlarının çok daha az ve birbirine yakın olduğunu görürüz. Fakat güç fonksiyonun tek değişkene bağlı olduğunu ve derecelendirmenin ayarlanabileceği bir değişkeninin olmadığı gözden kaçırılmamalıdır. Elastisite

modülü – radyal koordinat grafiklerinden görüleceği gibi her n değeri için derecelendirme miktarı aynıdır. Derecelendirme miktarının her durumda aynı olması derecelendirme derinliğinin gerilme değerlerine etkisini görmemizi engeller. Üstel fonksiyon olarak kullanılan denklem 3.1 iki değişken barındırmaktadır. Bunlardan η delik çeperindeki elastiste modülünün değerini belirlerken, s ise derecelendirme derinliğini belirler. Delik çeperindeki elastisite modülünün yalnızca η değerine bağlı olması, s değerinin değişiminden etkilenmemesi, derecelendirme derinliğinin değişimiyle gerilme değerlerinin nasıl değiştiğini inceleme açısından kritiktir. Bu sebeple bilim adamlarının fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeyi tanımlayan çeşitli analitik denklemler üzerinde yaptıkları çalışmalar önemlidir.

Çizelge 3.2’de verilen değerlerin grafiksel gösterimi şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25: Güç fonksiyonu indisine bağlı olarak analitik değerlerin ve analiz değerlerinin karşılaştırılması.

Sonraki bölümde, daha karmaşık çözümleri olan, ortasında eliptik delik bulunan plakada, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme tanımlayarak, gerilme yığılmaları incelenmiştir.

4. ORTASINDA ELİPTİK DELİK BULUNAN PLAKADA ÇİFT EKSENLİ YÜK ALTINDA GERİLME YIĞILMASI FAKTÖRÜ

Bu bölümde elastisite modülü derecelendirmesi eliptik delikli plaka üzerinde yapılacaktır. Çalışmada, elastisite modülü değişimini tanımlamak için biri derecelendirme derinliğini, diğeri elastisite modülü değerini tanımlayan iki değişkene bağlı bir üstel fonksiyon kullanılacaktır. Eliptik deliği dairesel deliğe göre daha karmaşık hale getiren unsur, eliptik delikli bir yapıda elastisite modülü değişiminin delik çeperinden dışa doğru elips şeklinde devam etmesidir. Hatırlanacağı gibi dairesel delikli plakada elastisite modülü radyal koordinata bağlı olarak dairesel bir değişim gösteriyordu. Bu değişimi vermek içinse; r parametresine sahip silindirik koordinat tanımlamak yeterli oluyordu. Ama artık daireye göre daha karmaşık bir geometriye sahip eliptik delik söz konusu olduğundan silindirik koordinattan çıkıp, kartezyen koordinatlara geçilmesi gerekmektedir.. Ansys programında kartezyen koordinatlarda çalışmanın zorluğu çalışma içerisinde anlatılmaya çalışılacaktır.

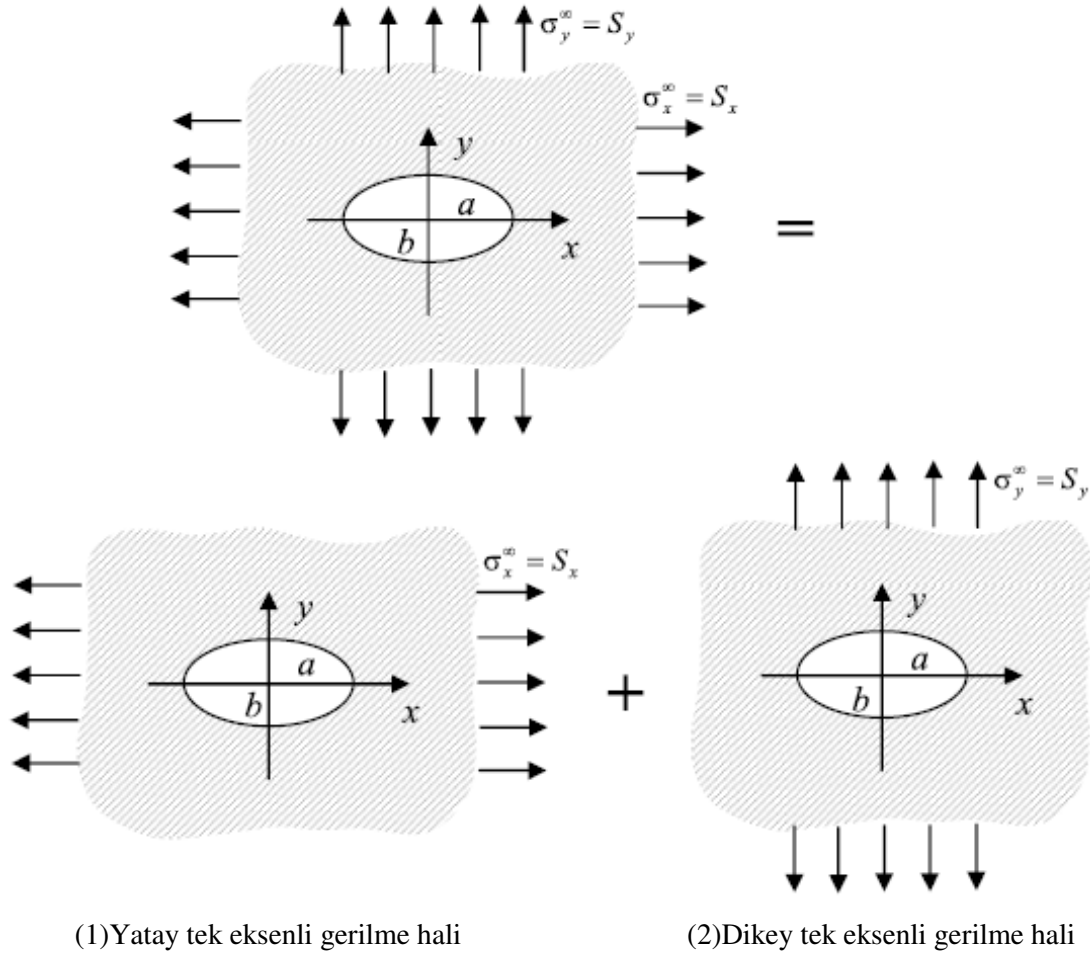
Eliptik delikli plaka için çalışma; çift eksenli yük altında iki farklı geometriyle yapılacaktır.

4.1.Eliptik Delikli Plaka İçin Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Çalışma için yine 40x40mm. boyutlarında, merkezinde eliptik delik bulunan plaka kullanılmıştır. İş yükünün hafifletmek amacıyla yine tam model yerine $\frac{1}{4}$, 20x20mm. boyutlarında simetrik model kullanılmıştır.

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üzerinde analiz çalışmaları yapmadan önce yine model güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla ilk çalışma homojen malzeme üzerinde yapılmıştır. Homojen malzeme üzerinde yapılan analizlerde literatürdeki analitik çözümlere yakınsanmaya çalışılmıştır. Çift eksenli yük altında eliptik delikli plakada homojen malzeme çözümü yatay ve dikey yönlü tek eksenli yüklemelerin süper pozisyonu ile elde edilir.

Süperpozisyon işlemi model olarak şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Eliptik delikli plakada tek eksenli iki gerilme halinin süperpozisyonu (Berlo,2009).

Her bir tek eksenli gerilme hali için analitik çözümler(Sadd, 2009) literatürde şu şekilde çıkarılmıştır;

$$\sigma_\varphi^{(1)}(\varphi) = S_x \left\{ \frac{2m_1 + 1 - 2\cos 2\varphi - m_1^2}{m_1^2 - 2m_1 \cos 2\varphi + 1} \right\} \quad (4.1)$$

$$\sigma_\varphi^{(2)}(\varphi) = S_y \left\{ \frac{2m_2 + 1 - 2\cos 2(\varphi - \frac{\pi}{2}) - m_2^2}{m_2^2 - 2m_2 \cos 2(\varphi - \frac{\pi}{2}) + 1} \right\} \quad (4.2)$$

Burada $m_1 = \frac{a-b}{a+b}$, $m_2 = \frac{b-a}{a+b} = -m_1$ ve φ x ekseninden saat yönünün tersine doğru olan açı ölçüsüdür.

Yukarıdaki iki denklem için $m = m_1 = -m_2$ alınacak olursa;

$$\begin{aligned} \sigma_\varphi(\varphi) &= \sigma_\varphi^{(1)}(\varphi) + \sigma_\varphi^{(2)}(\varphi) \\ &= S_x \left\{ \frac{2m+1-2\cos 2\varphi - m^2}{m^2 - 2m \cos 2\varphi + 1} \right\} + S_y \left\{ \frac{-2m+1+2\cos 2\varphi - m^2}{m^2 - 2m \cos 2\varphi + 1} \right\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Eşit eksenel kuvvetler uygulandığı için $S_x = S_y = S$ alınarak, sınır teğetsel gerilmesi denklem 3.14'deki hale gelir.

$$\sigma_{\varphi}(\varphi) = S \left\{ \frac{2(1-m^2)}{m^2 - 2m \cos 2\varphi + 1} \right\} \quad (4.4)$$

Eliptik delik parametrelerinden $b > a$ olması durumunda maksimum gerilme değeri $\varphi = \pi/2$ noktasında ortaya çıkar.

$$\sigma_{max} = \sigma_{\varphi}(\pi/2) = S \left\{ \frac{2(1-m^2)}{m^2 + 2m + 1} \right\} = -S \left\{ \frac{2(m-1)}{m+1} \right\} = 2Sb/a \quad (4.5)$$

Bu durumda $b/a=2$ iken $\sigma_{max} = 4S$, $b/a=5$ iken $\sigma_{max} = 10S$ değerleri elde edilir.

Elde edilen bu analitik değerlerden sonra sıra sonlu elemanlar modelini kurmaya gelmiştir. Fakat gözden kaçırılmaması gereken nokta; analiz çalışmalarında şekil 4.1'deki model göz önüne alındığında analitik çıkarımda olduğunun aksine eliptik deliğin büyük eksenini a , küçük eksenini b alınmalıdır. Yani çalışmalarda $a/b > 1$ 'dir.

Öncelikle sonlu eleman yoğunluğunu uygun şekilde ayarlayabilmek ve analitik çözüm ile karşılaştırabilmek adına homojen malzeme üzerinde analiz yapılmıştır. Çalışmada $a/b=5$ ve $a/b=2$ olmak üzere iki farklı geometri üzerinde analiz yapılmış ve çift eksenli yük için $T = 1MPa$ tanımlanmıştır. Homojen malzeme üzerinde yapılan analizler sonucu sırasıyla σ_{max} değerleri $10,088 MPa$ ve $4,0164 MPa$ bulunmuştur. Analitik değerlerle karşılaştırıldığında sırasıyla %0,88 ve %0,41'lik hata payları olduğu görülmüştür. Yine bu hata payları, referans alınan Berlo(2009) çalışmasında sırasıyla %0,98 ve %1,7'dir. Hata paylarının daha düşük olması, bu çalışmada kullanılan ağ yapısındaki (şekil 4.2) elemanların delik çevresinde daha yoğun olması ve sayılarının fazla olmasından dolayı olabilir ayrıca farklı sonlu elemanlar programları kullanılması da bir etken olabilir.

Eliptik geometriye bağlı elastisite modülü derecelendirmesi yapmak için iki farklı denklem ile çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan ilk kullanılan denklem ve eliptik deliğin r parametresini veren ifade aşağıdaki gibidir(Berlo, 2009).

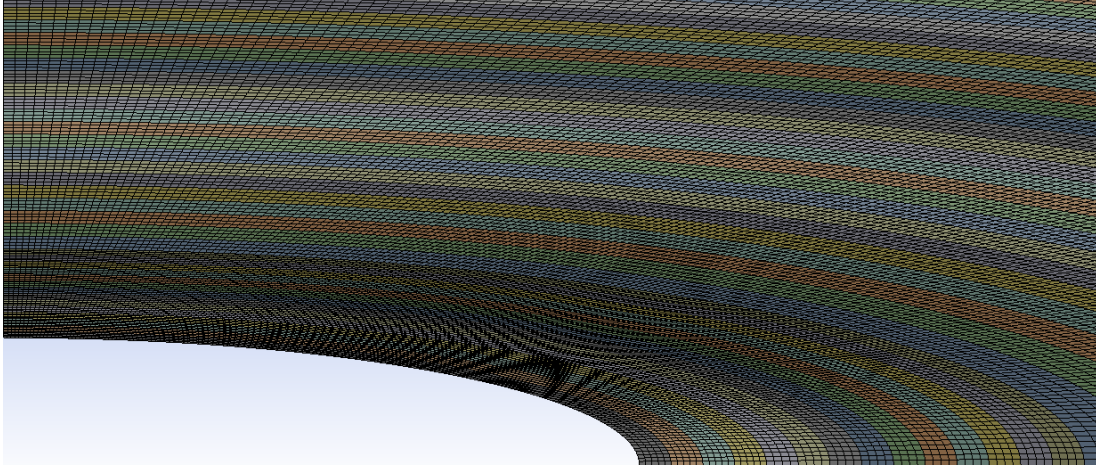
$$E = E_0 \left[1 + k e^{-n \left[\left(\frac{r}{a} \right) - 1 \right]^2} \right] \quad (4.6)$$

$$r = \sqrt{\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}} \quad (4.7)$$

Burada;

k : elastisite modülünün değerini belirleyen parametre

n: derecelendirme derinliğini veren parametredir.

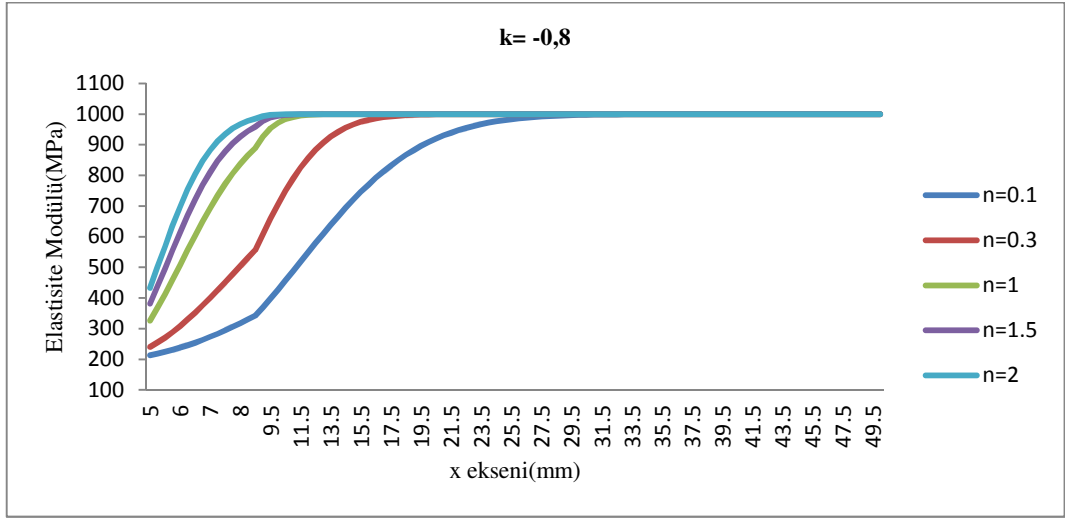


Şekil 4.2: Eliptik delikli plaka için delik çevresindeki ağ yapısı.

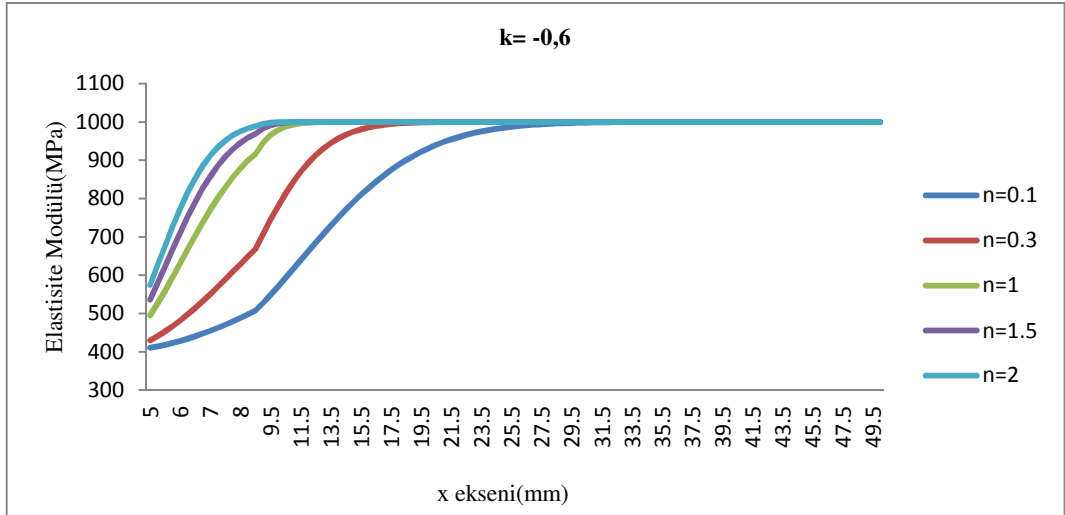
Çalışmalarda $E_0 = 1GPa$ alınmıştır. r parametresi görüldüğü gibi hem x hem de y olmak üzere iki değişkene bağlıdır. Dairesel deliğe göre malzeme derecelendirmesindeki zorluk bu noktada ortaya çıkmaktadır. Fonksiyonel derecelendirmeyi sağlayan denklemin bir kod paketine yazılarak Ansys programına okutulmaması nedeni ile çalışmaları adım adım derecelendirme metoduyla yapmak gerekmiştir, bu sebeple eliptik geometriye bağlı bir derecelendirme yapabilmek için plakanın bir bölümünü eliptik halkalar olarak tanımlama gereklidir. Eliptik halka olarak ne kastedildiği Şekil 4.2'deki renkli halkalardan rahatlıkla görülebilmektedir. Çalışmalarda $a/b=5$ için $50 \times 50mm$. boyutlarında $\frac{1}{4}$ model $a/b=2$ içinse $20 \times 20mm$. boyutlarında $\frac{1}{4}$ model kullanılmıştır. $50 \times 50mm$.'lik plaka için eliptik geometrinin büyük ekseninin $46.5mm$ olduğu, $20 \times 20mm$. 'lik plaka içinse eliptik geometrinin büyük ekseninin $19.5 mm$. olduğu halkalara kadar, büyük ekseninde $0.5mm$. 'lik artışlarla eliptik halkalar oluşturulmuştur. Her bir halka için denklem 4.6 Excel programında çözdürülmüş bulunan değer o halkanın sıcaklık değeri olarak programa girilmiş ve yine mühendislik data kısmında sıcaklık elastisite modülüne eşitlenmiştir. Unutulmamalıdır ki sıcaklığın fiziksel etkisinden kaçınmak için ısıl genleşme katsayısını sıfıra eşitlemek gereklidir. Poisson oranı, $\nu=0.3$ alınmıştır.

Elastisite modülünün değerini belirleyen k parametresinin sıfırdan küçük ve büyük olduğu değerler için farklı derecelendirme derinliğini veren n parametresi değerlerinde analiz çalışmaları yapılmıştır ve Berlo'nun da elde etmiş olduğu bazı sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Parametre değerlerine göre elastisite modülü - x eksenini değişim grafikleri ve gerilme yığılması faktörü çizelgeleri aşağıda verilmiştir.

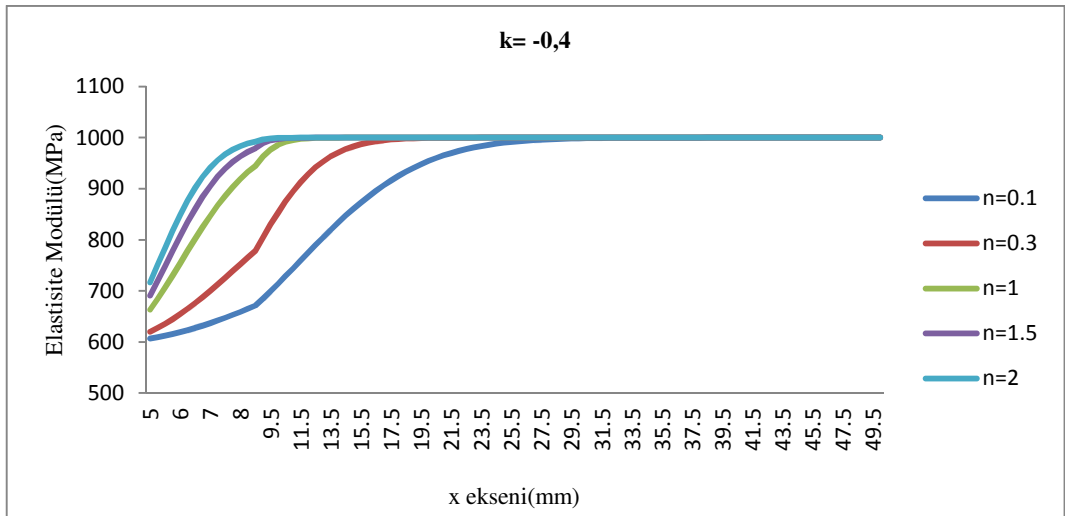
➤ $a/b = 5$



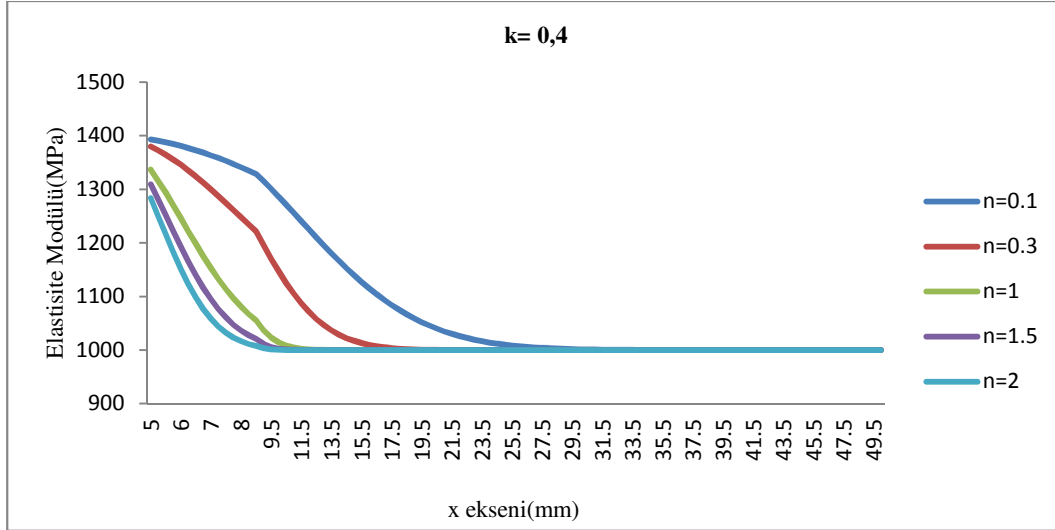
Şekil 4.3: $k=-0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.



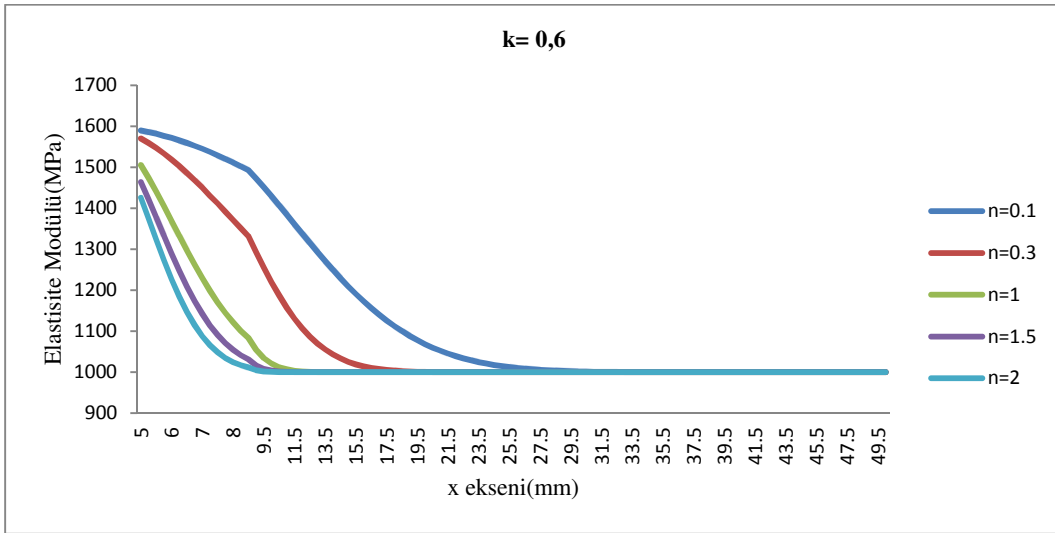
Şekil 4.4: $k=-0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.



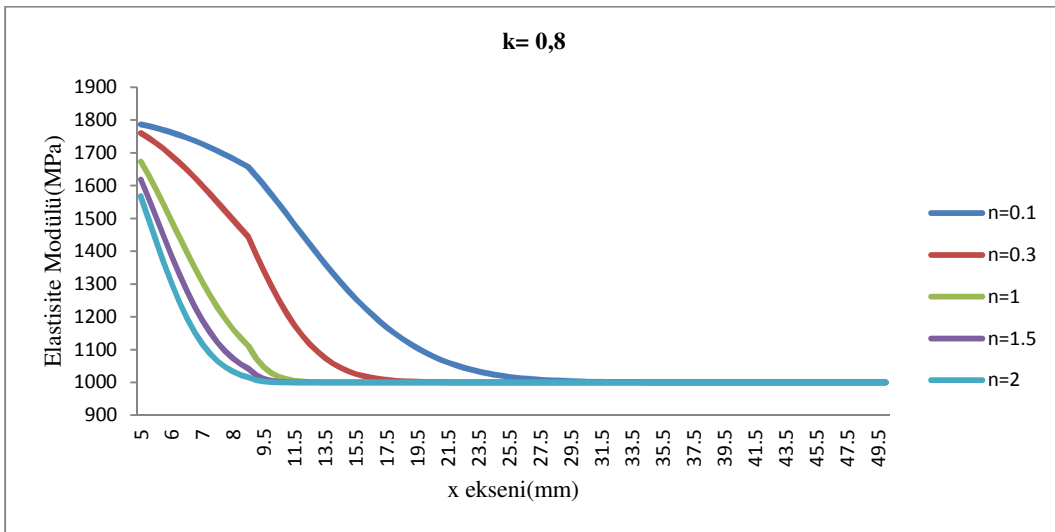
Şekil 4.5: $k=-0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği



Şekil 4.6: k=0.4 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.7: k=0.6 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.8: k=0.8 için elastisite modülü değişim grafiği.

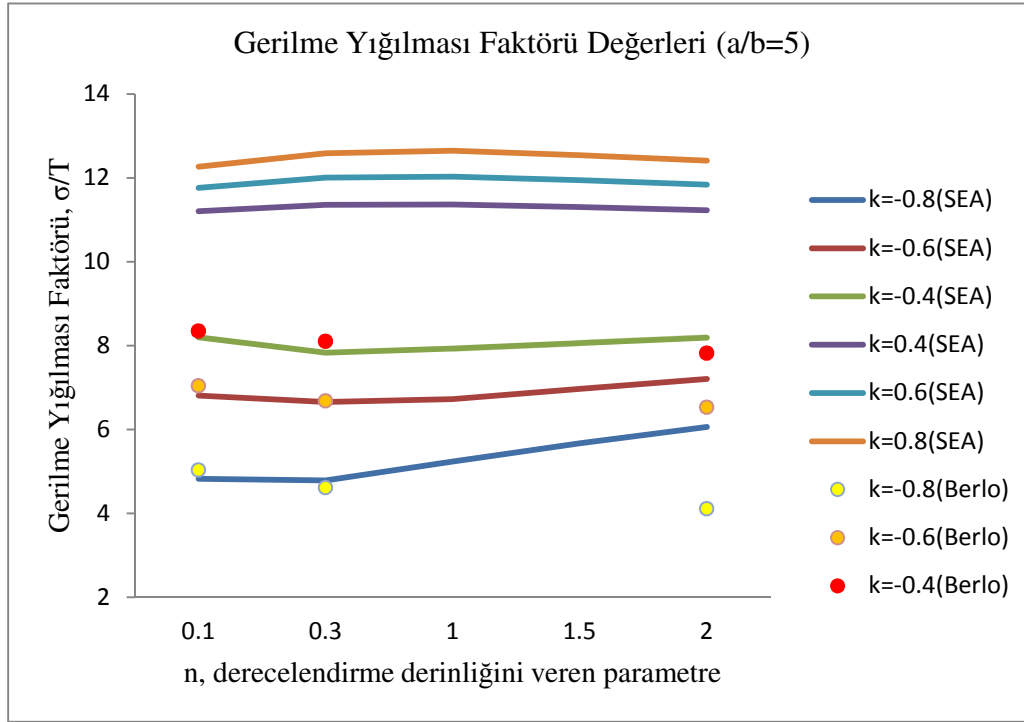
Grafikler incelendiğinde k ve n değerlerinin değişiminin elastisite modülü değerini ve dağılımını nasıl etkilediği rahatlıkla görülebilmektedir, ayrıca doğrular üzerinde belirli noktalarda kırılmalar görülmektedir. Bunun sebebi delik çeperinde daha doğru değerler elde edebilmek amacıyla deliğe yakın belirli bölgede daha küçük boyutlarda eliptik halkalar kullanılmasıdır. $k < 0$ için elastisite modülü delik çeperinden dışarıya doğru gidildikçe artmakta, E_0 değerine yakınsamaktadır. $k > 0$ içinse elastisite modülü delik çeperinden dışarıya doğru azalmakta ve E_0 değerine yakınsamaktadır. Kısacası $k < 0$ için delik çeperi ile x ekseninin kesiştiği noktada gerilme değerinin homojen malzemede olduğundan daha az olması beklenebilir. Ayrıca $k < 0$ ve $n = 0.1, 0.3, 2$ değerleri için Berlo'nun elde ettiği sonuçlar ile çalışma sonuçlarının tutarlılığı incelenecektir. Elde edilen gerilme yığılması faktörleri çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri ($a/b=5$).

k	n	σ/T (SEA)	Referans değerler (Berlo, 2009)	k	n	σ/T
-0.8	0.1	4.8202	5.034	0.4	0.1	11.201
	0.3	4.7812	4.61		0.3	11.359
	1	5.2355	-		1	11.366
	1.5	5.6692	-		1.5	11.3
	2	6.0616	4.105		2	11.222
-0.6	0.1	6.8041	7.037	0.6	0.1	11.761
	0.3	6.6545	6.683		0.3	12.001
	1	6.7234	-		1	12.029
	1.5	6.967	-		1.5	11.942
	2	7.2037	6.528		2	11.835
-0.4	0.1	8.193	8.345	0.8	0.1	12.264
	0.3	7.8325	8.103		0.3	12.586
	1	7.9289	-		1	12.642
	1.5	8.0575	-		1.5	12.539
	2	8.1893	7.814		2	12.408

Sonuçlara göre önce denklemi kullanılan referans değerler ile tutarlılık kontrolü yapılacak olursa: Çizelgeye göre $k=-0.8$, $n=2$ değeri için elde edilen sonuç hariç diğerlerinde referans değerlere yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Bu da fonksiyonel olarak derecelendirmenin tanımlanabildiğini göstermektedir. Çünkü Berlo'nun kullandığı program ve derecelendirme için kullandığı teknik bu çalışmadakilerden farklıdır. Fakat hangi tarafın daha doğru değerlere ulaştığını söylemek analitik sonuçlar

olmadığı için mümkün değildir. Bunun dışında k değeri sıfıra yaklaştıkça homojen malzeme çözümüne yaklaşmakta, sıfırdan uzaklaştıkça homojen malzeme çözümünden uzaklaşmaktadır, bu da dairesel delikteki sonuçlarla karşılaştırıldığında bir tutarlılık olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçların hepsinde, gerilme yığılması eliptik delik ile x ekseninin kesiştiği noktada ortaya çıkmıştır. Çizelge 4.1'deki değerlerin grafik gösterimi şekil 4.9'da verilmiştir.

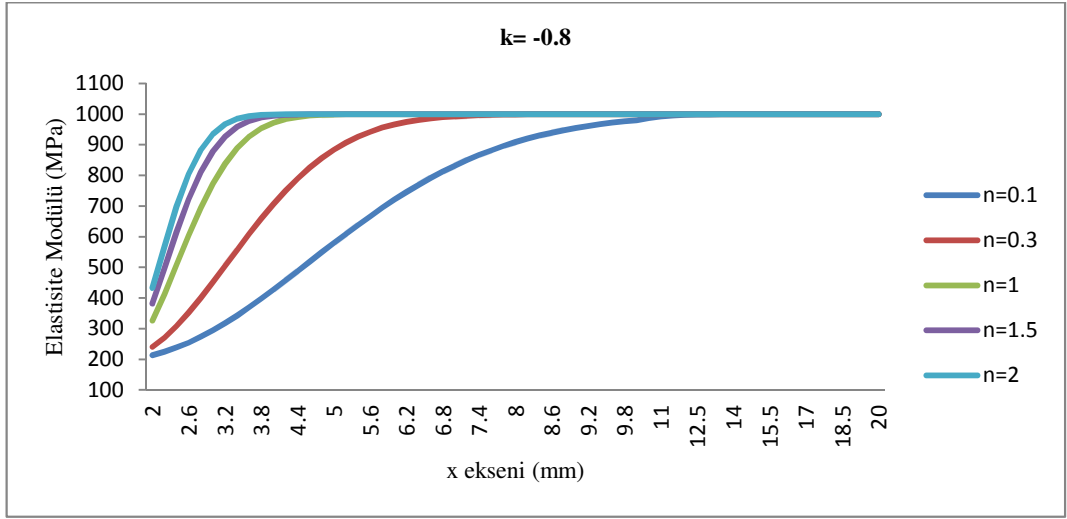


Şekil 4.9: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=5$).

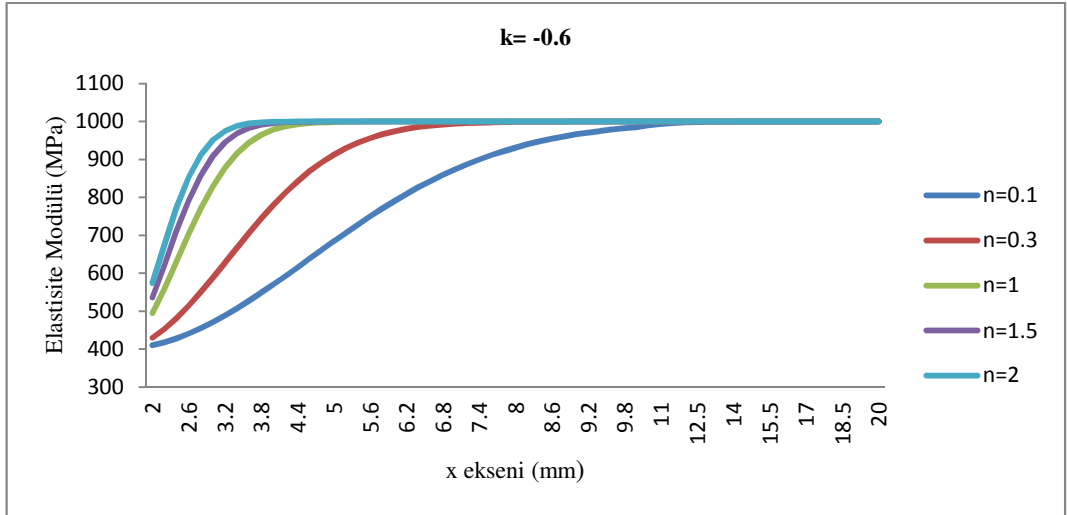
Grafikte görüldüğü gibi derecelendirme derinliği azaldıkça sonuçlar birbirinden uzaklaşmaktadır. Yüzey yumuşatma durumunda k değeri sabitken n değerinin artmasıyla referans değerlerin azaldığı görülmektedir fakat bu çalışmada bulunan değerler artmaktadır. Yine grafikte görüleceği üzere $n=0.1$ ve 0.3 'den sonra doğrularda kırılma meydana gelmektedir. Bunun sebebi olarak, plaka üzerinde derecelendirilen bölgenin $n=0.1$ iken 27,5mm., $n=0.3$ iken 15.5mm., $n=1$ iken 9.5mm. dolaylarında olması ve burdan sonra küçük farklarla derecelendirme derinliğinin azalması olarak gösterilebilir.

Eliptik delikten dairesel deliğe gittikçe gerilme değerlerinde azalma beklenir. Bu azalmayı görebilmek ve çözüm çeşitliliğini artırmak adına $a/b=2$ için de aynı süreçler tekrarlanmıştır. Aşağıdaki grafiklerde elastisite modülü – radyal koordinat grafikleri ayrıca çizelge 4.2 ve şekil 4.16'da elde edilen sonuçlar verilmiştir.

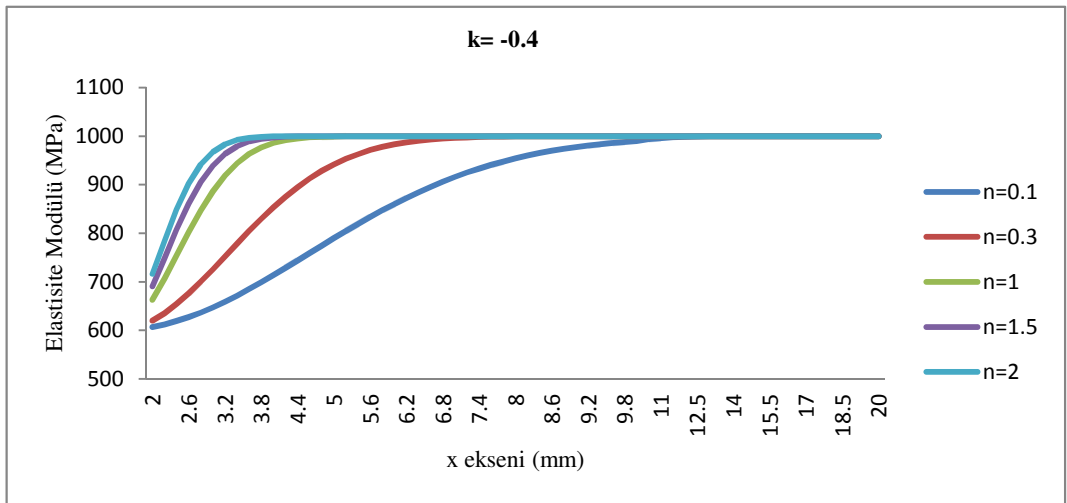
➤ $a/b = 2$



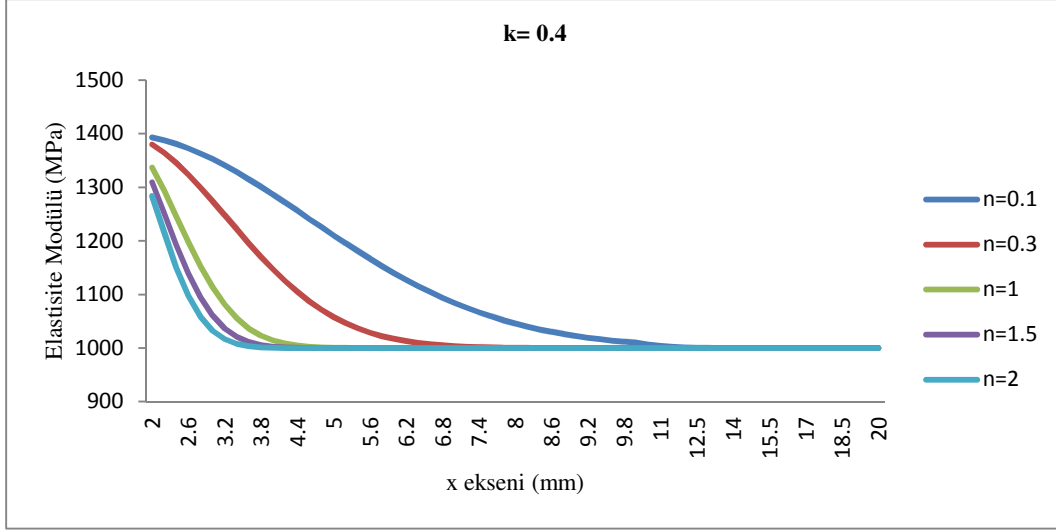
Şekil 4.10: $k=-0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.



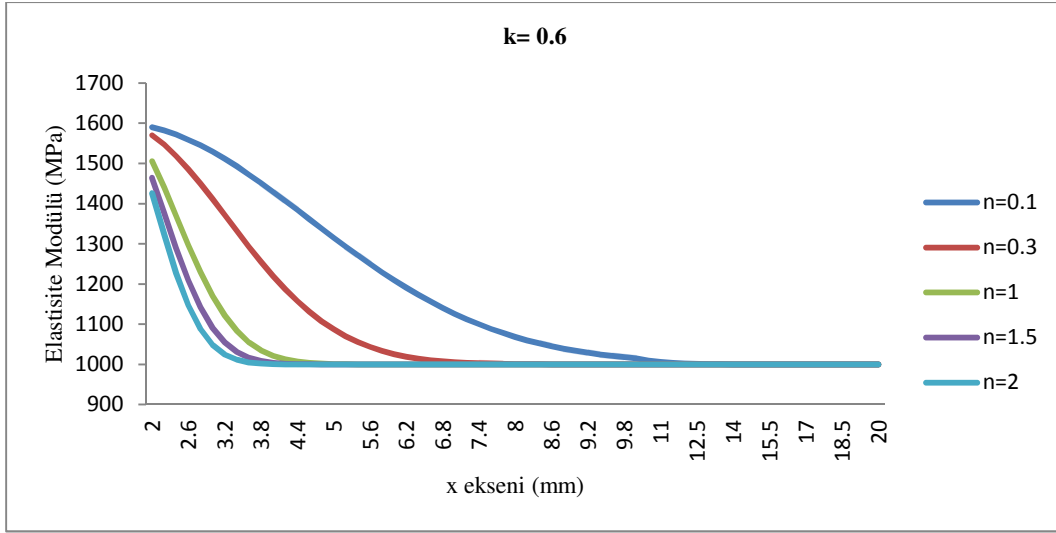
Şekil 4.11: $k=-0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.



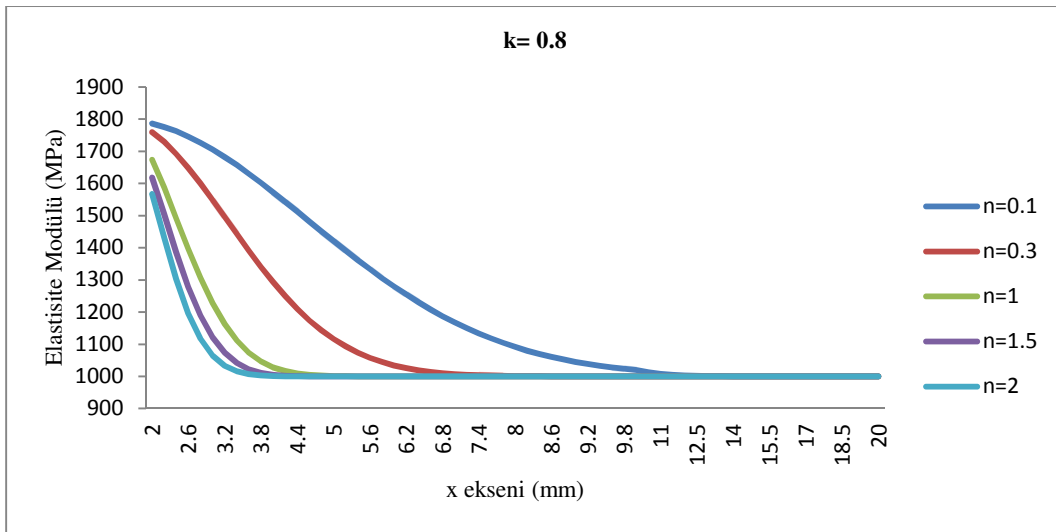
Şekil 4.12: $k=-0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.13: k=0.4 için elastisite modülü değişim grafiği.



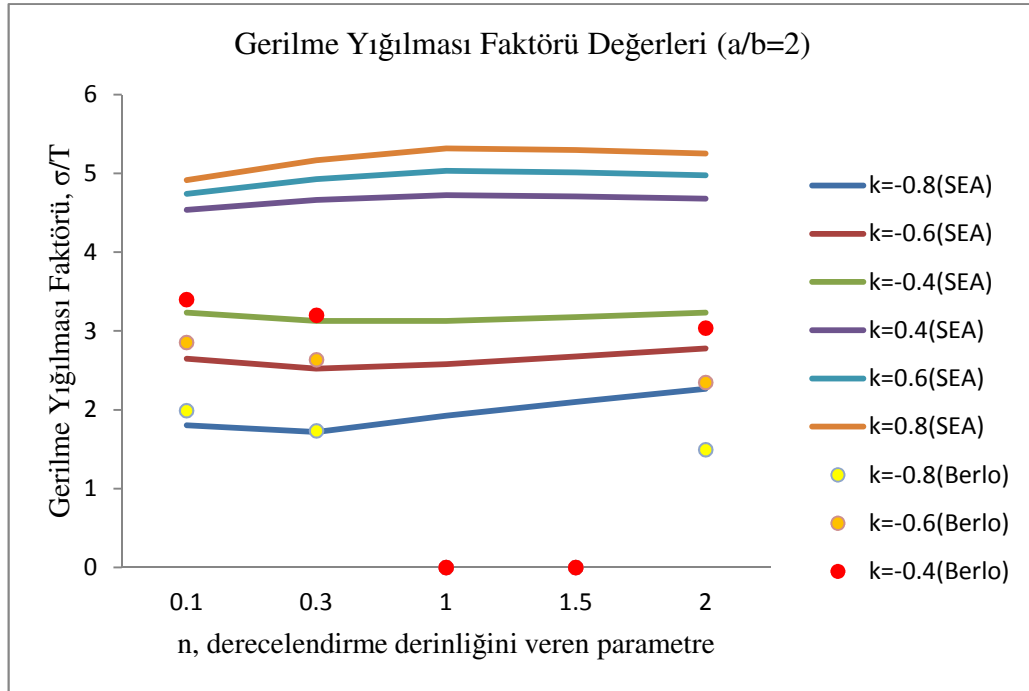
Şekil 4.14: k=0.6 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.15: k=0.8 için elastisite modülü değişim grafiği.

Çizelge 4.2: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri ($a/b=2$).

k	n	σ/T (SEA)	Referans değerler (Berlo, 2009)	k	n	σ/T
-0.8	0.1	1.8051	1.988	0.4	0.1	4.5362
	0.3	1.721	1.735		0.3	4.6627
	1	1.9245	-		1	4.7249
	1.5	2.1007	-		1.5	4.7077
	2	2.223	1.492		2	4.6774
-0.6	0.1	2.6507	2.853	0.6	0.1	4.7386
	0.3	2.5209	2.633		0.3	4.9281
	1	2.5795	-		1	5.0321
	1.5	2.6777	-		1.5	5.013
	2	2.7788	2.345		2	4.9736
-0.4	0.1	3.233	3.397	0.8	0.1	4.914
	0.3	3.127	3.2		0.3	5.165
	1	3.1275	-		1	5.3147
	1.5	3.1774	-		1.5	5.2969
	2	3.2335	3.037		2	5.251



Şekil 4.16: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=2$).

Eliptik deliğin iki eksen arasındaki fark azaldıkça, gerilme değerlerinde azalma beklenmektedir; çünkü eksenler arasındaki farkın azalması demek çatlak geometrisinden dairesel delik geometrisine gidilmesi anlamına gelir. Dairesel delikte de gerilme yığılması faktörünün 2 olduğu hatırlanacak olursa elde edilen değerlerin ikiye yaklaşmış olması beklenecektir. Ayrıca $a/b=2$ iken homojen malzemedeki

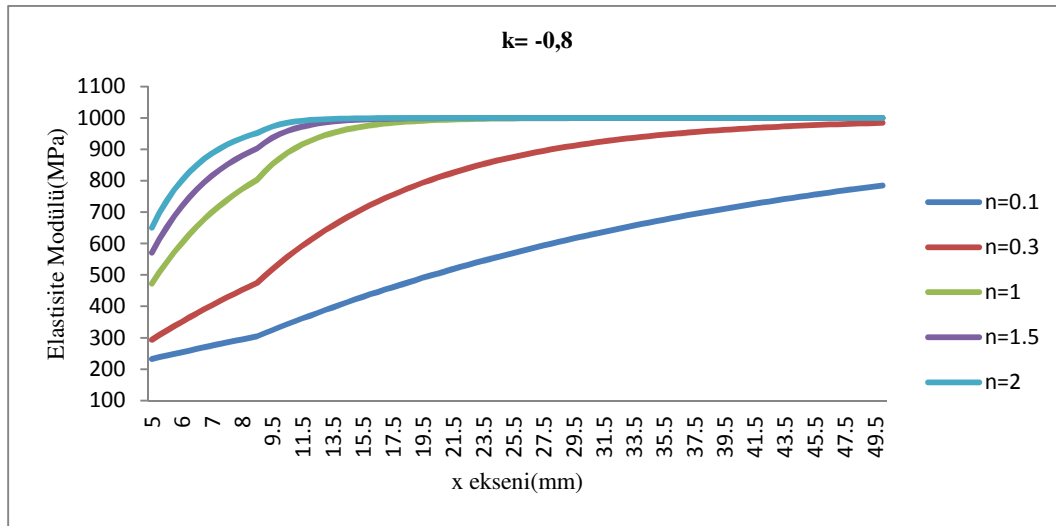
gerilme yığılması faktörünün analitik hesaplardan 4 çıkması gerektiği bilinmektedir. Sonuç olarak elde edilen değerler hem analitik değerlerle hem de Berlo'nun (2009) çalışmasıyla uyumludur.

Denklem 4.6 için yapılan bütün analiz çalışmaları aşağıdaki denklem içinde yapılmıştır ve elastisite modülü dağılımı ve gerilme değerleri incelenmiştir.

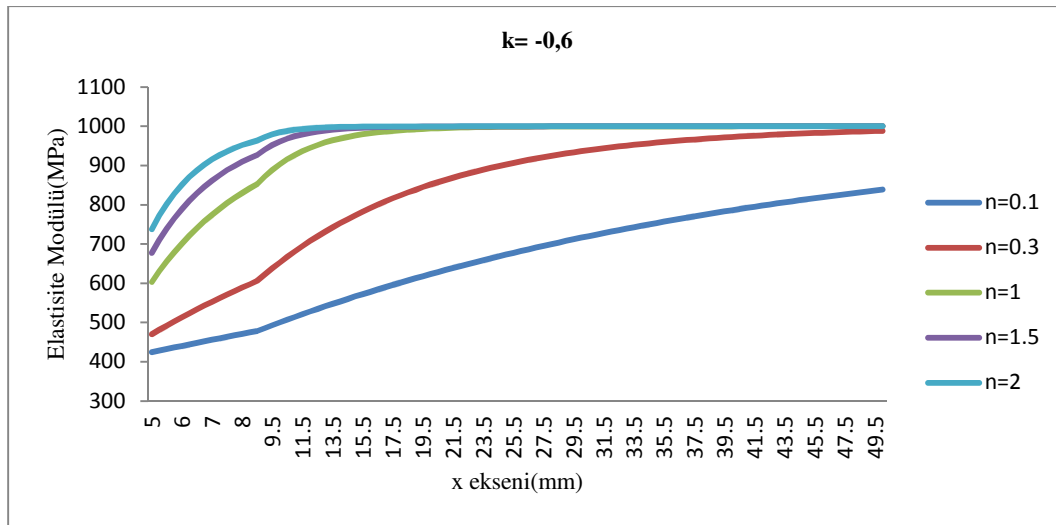
$$E = E_0[1 + ke^{-n(r-1)}] \quad (4.8)$$

Yalnızca denklem değiştirilmiş parametre değerleri ve eliptik delikli plaka geometrisi ve boyutu değiştirilmemiştir. Yine önce $a/b=5$ daha sonra $a/b=2$ için çalışmalar yapılmıştır.

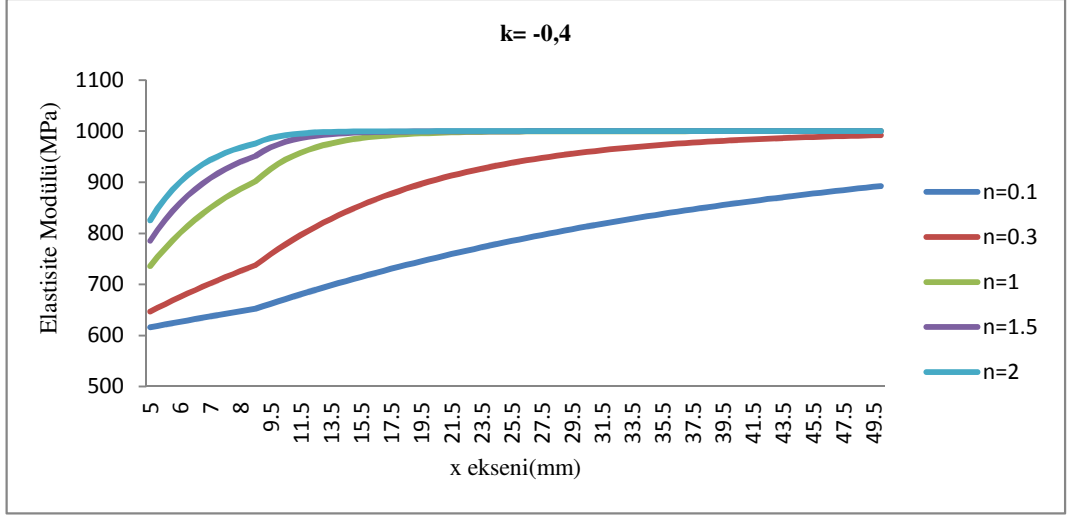
➤ $a/b = 5$



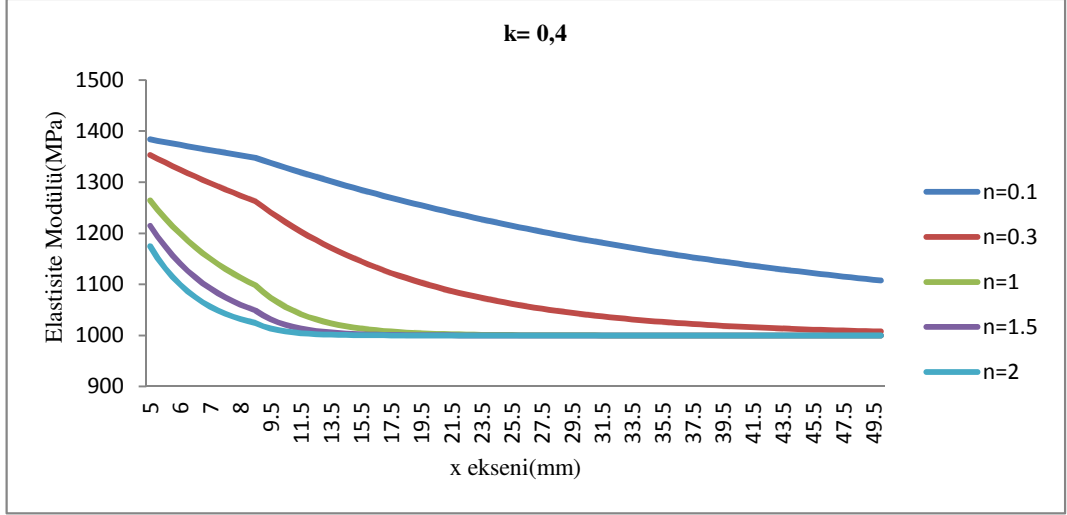
Şekil 4.17: $k=-0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.



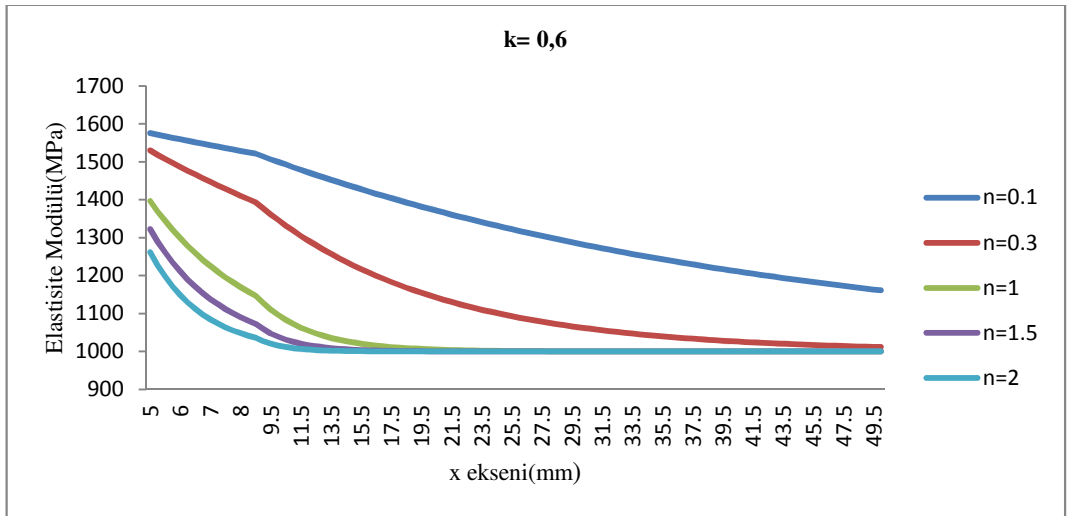
Şekil 4.18: $k=-0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.



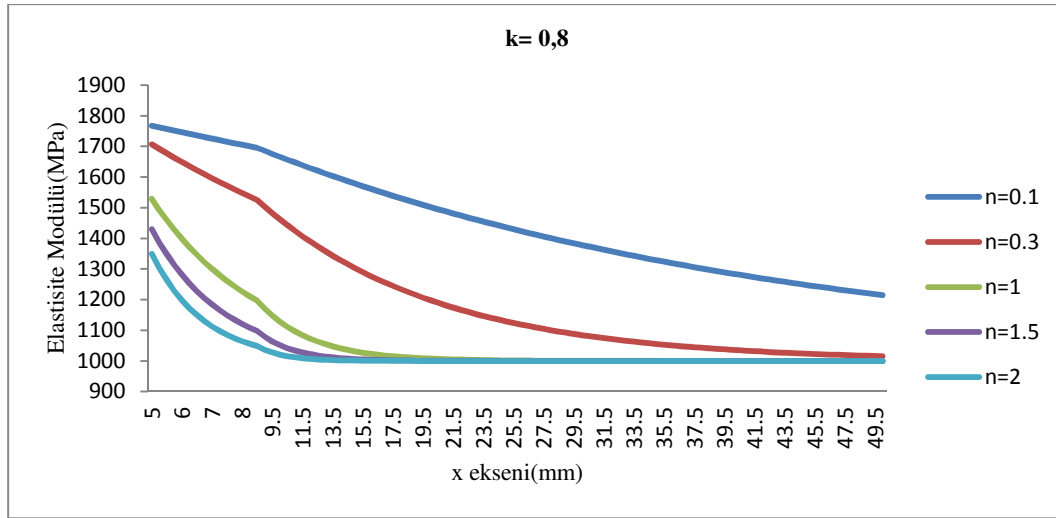
Şekil 4.19: k=-0.4 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.20: k=0.4 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.21: k=0.6 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.22: $k=0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.

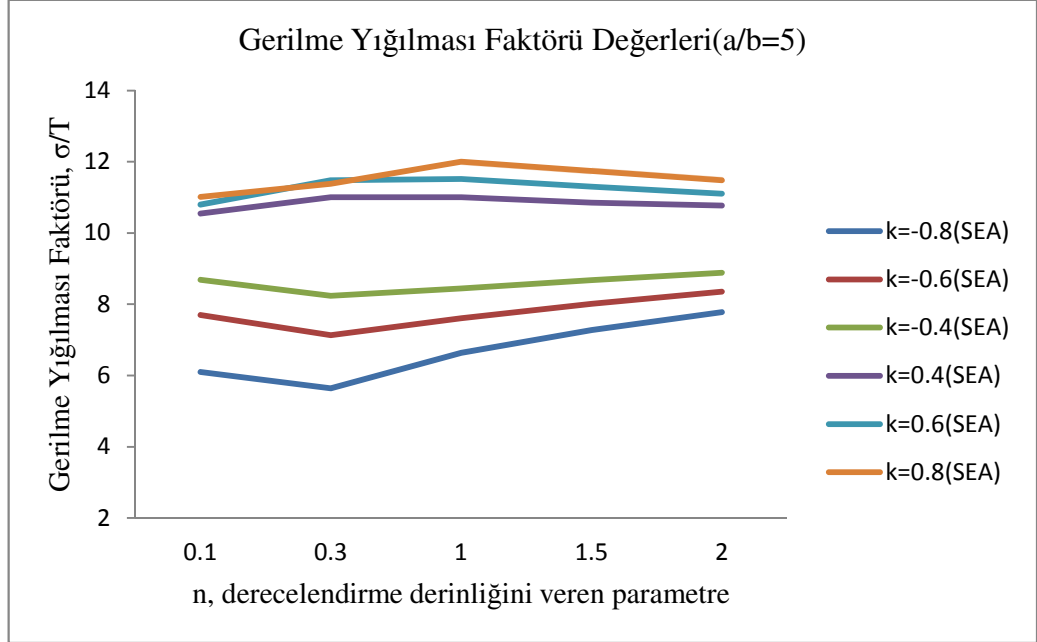
Berlo'nun denkleminde kare ifadesinin kaldırılması denklemin karakterini değiştirmiştir. Grafikler incelendiğinde, ilk göze çarpan $n=0.1, 0.3$ için elastisite modülünün plaka sınırları içerisinde E_0 değerine yakınsayamamasıdır, yani aynı n değerleri için derecelendirme derinliği artmıştır. Bu da fonksiyonel derecelendirme işleminin zorlaşması anlamına gelmektedir. Analiz sonuçları incelendiğinde iki denklem sonuçları arasındaki fark görülecektir.

Çizelge 4.3: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri ($a/b=5$).

k	n	σ/T	k	n	σ/T
-0.8	0.1	6.0957	0.4	0.1	10.545
	0.3	5.6397		0.3	11.001
	1	6.6415		1	11.006
	1.5	7.2779		1.5	10.854
	2	7.7821		2	10.773
-0.6	0.1	7.6971	0.6	0.1	10.801
	0.3	7.1346		0.3	11.481
	1	7.6079		1	11.52
	1.5	8.0138		1.5	11.301
	2	8.354		2	11.099
-0.4	0.1	8.6905	0.8	0.1	11.016
	0.3	8.2398		0.3	11.257
	1	8.4433		1	11.999
	1.5	8.6784		1.5	11.745
	2	8.8846		2	11.477

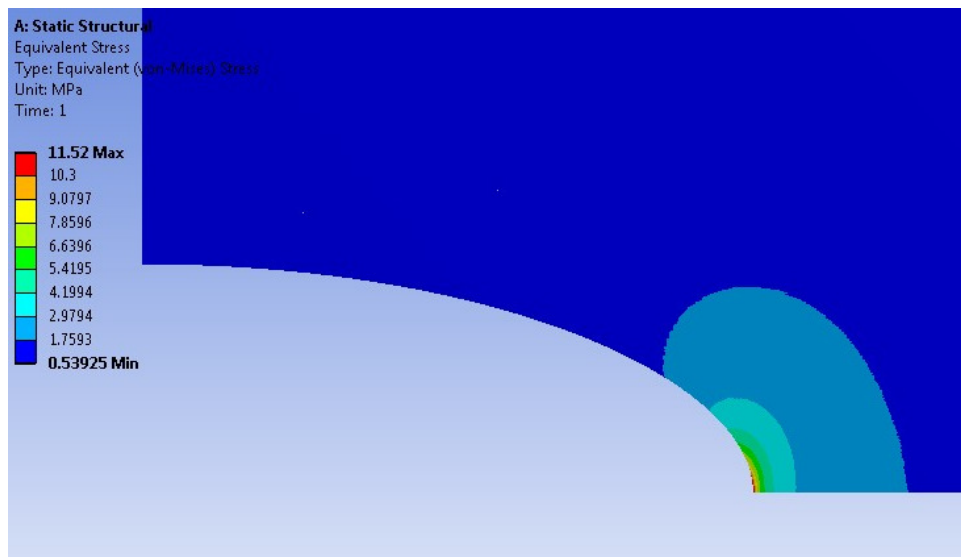
Çizelge 4.1 ile karşılaştırıldığında gerilme yığılması faktörü değerlerinde farklılıklar göze çarpmaktadır. Eğer amaç gerilme yığılmasının olduğu bölgedeki gerilme değerlerini aşağıya çekmek ise $k < 0$ değerlerinin incelenmesi gerekir. Bu sebeple

denklem 4.6'nın gerilme değerlerini daha aşağıya çektiği görülmektedir. Örneğin $k=-0.8$, $n=2$ parametre değerleri için çizelge 4.1 gerilme yığılması faktörünü 6.0616 verirken, çizelge 4.3'de aynı değer 7.7821'dir. Çizelge 4.3'ün grafik gösterimi şekil 4.23'de verilmiştir.



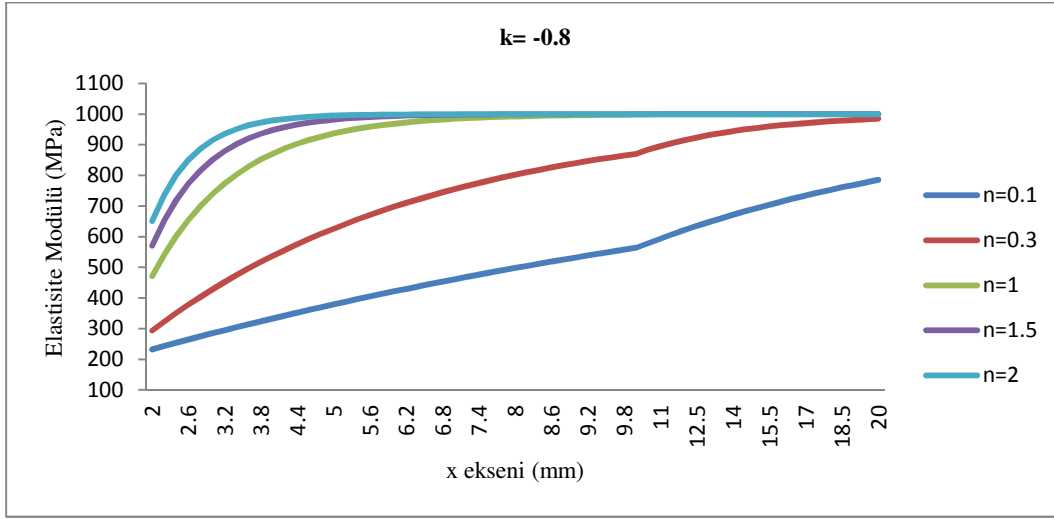
Şekil 4.23: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi (a/b=5).

Ayrıca gerilme değerlerinde farklılıklar olması gerilme yığılmasının olduğu bölgeyi değiştirmemiştir. Şekil 4.21'de eliptik delikli plakada çift eksenli yük altında gerilme yığılmasının gerçekleştiği bölge görülmektedir.

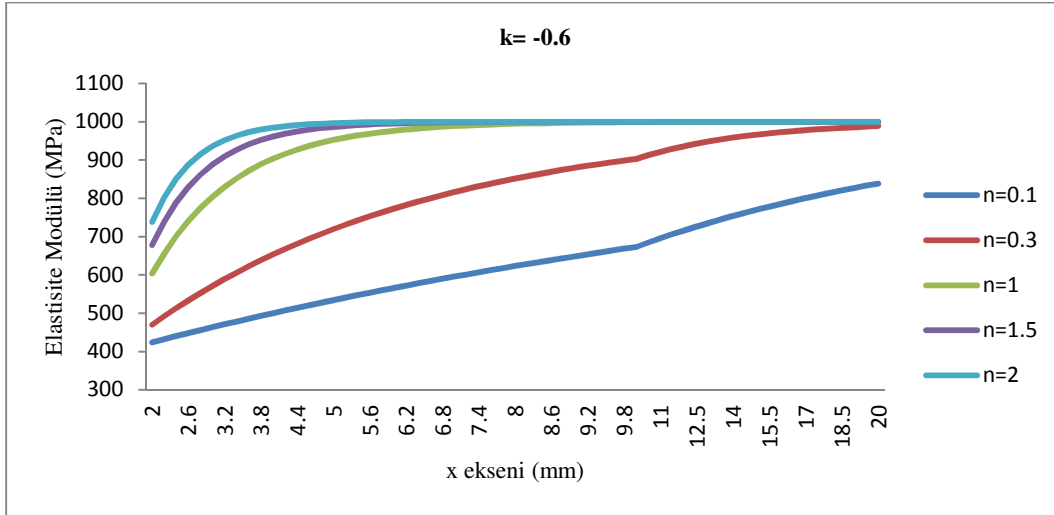


Şekil 4.24: Çift eksenli yük altında eliptik delikli plakada gerilme yığılması bölgesi ($k=0.6$, $n=1$).

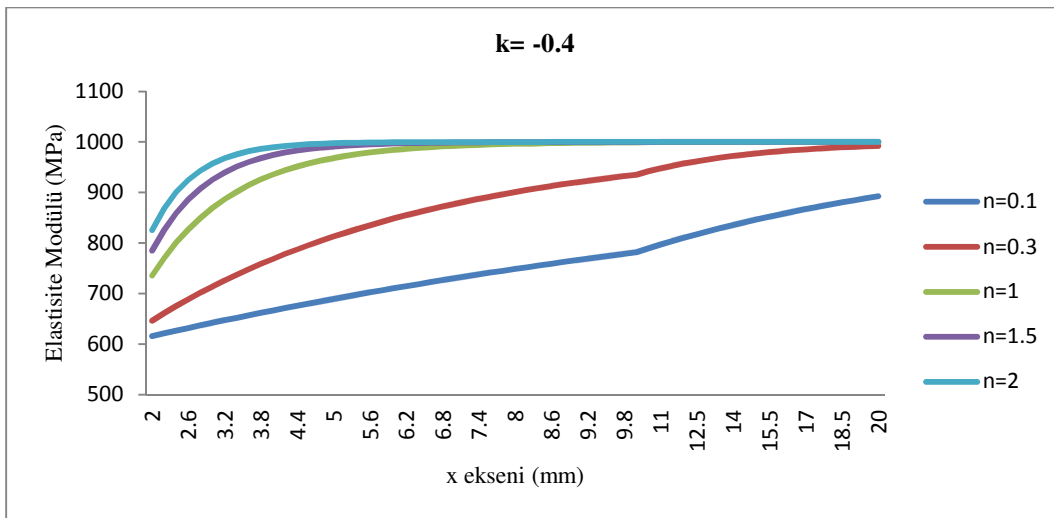
➤ $a/b = 2$



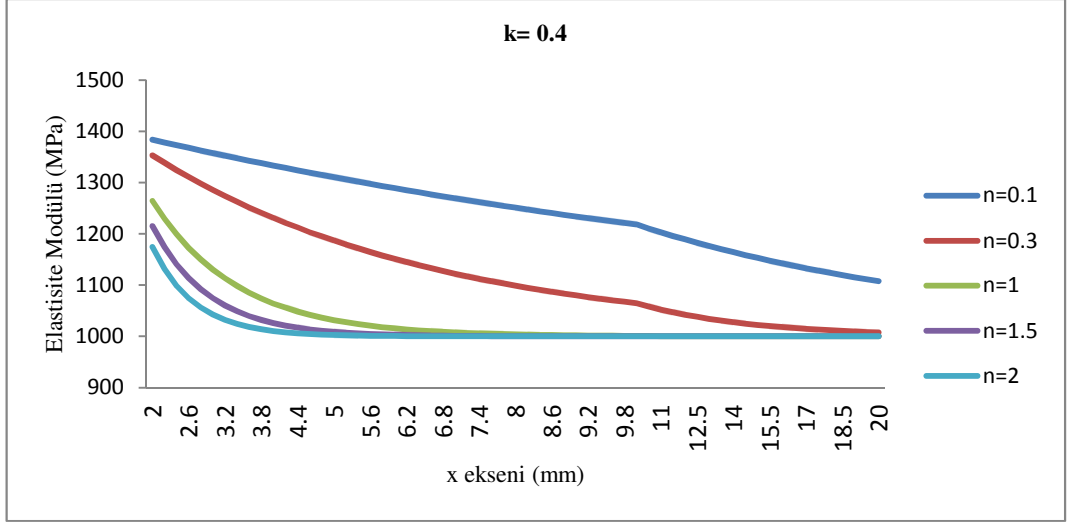
Şekil 4.25: $k=-0.8$ için elastisite modülü değişim grafiği.



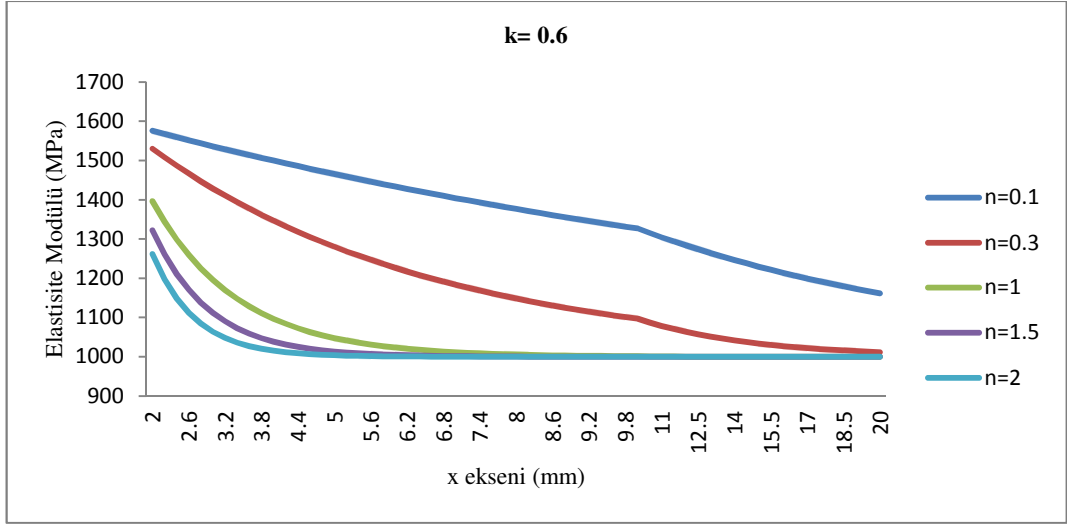
Şekil 4.26: $k=-0.6$ için elastisite modülü değişim grafiği.



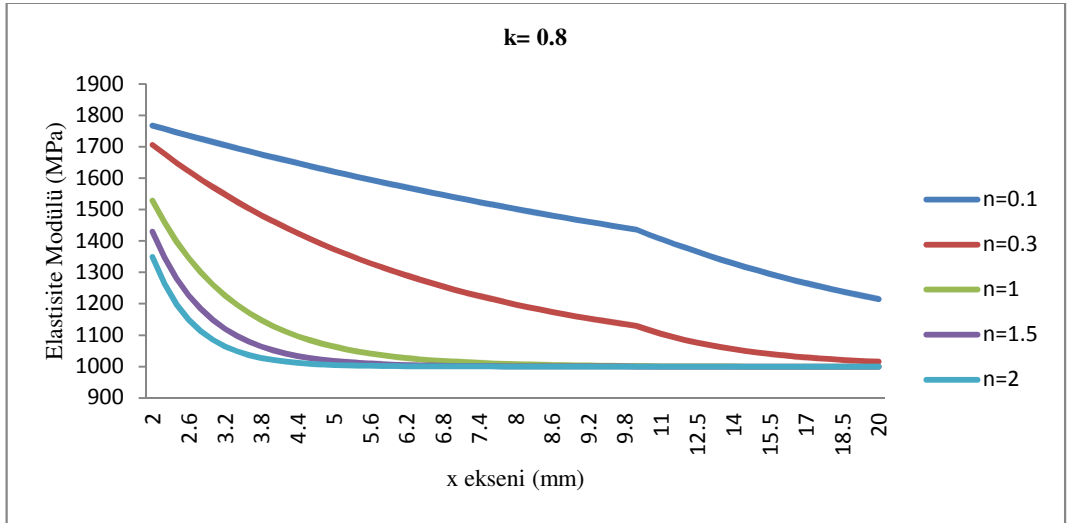
Şekil 4.27: $k=-0.4$ için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.28: k=0.4 için elastisite modülü değişim grafiği.



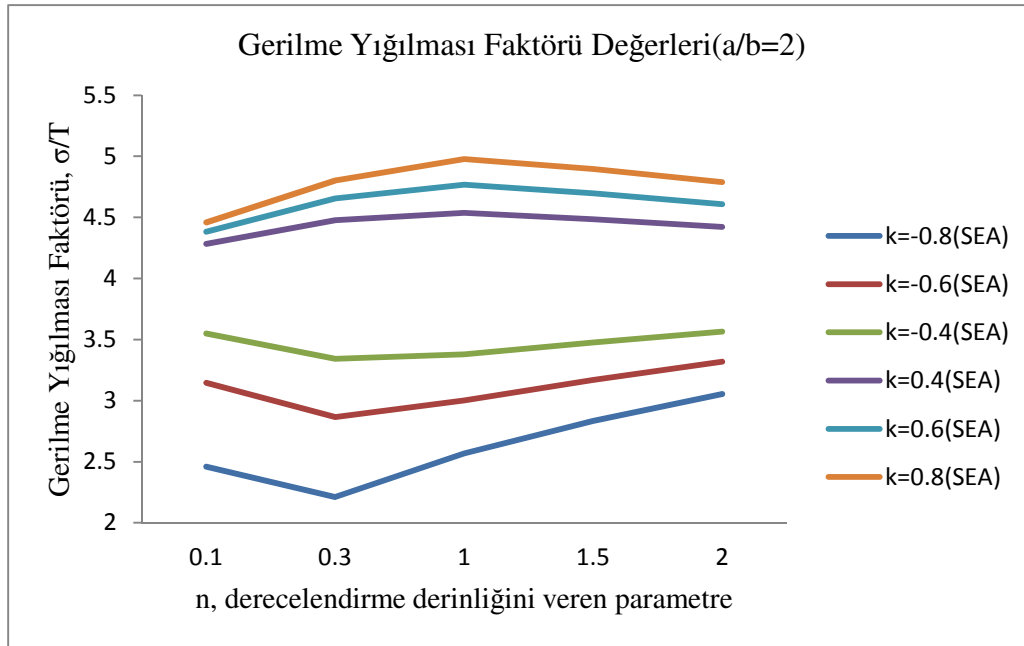
Şekil 4.29: k=0.6 için elastisite modülü değişim grafiği.



Şekil 4.30: k=0.8 için elastisite modülü değişim grafiği.

Çizelge 4.4: Parametre değişimlerine göre gerilme yığılması faktörleri ($a/b=2$).

k	n	σ/T	k	n	σ/T
-0.8	0.1	2.4604	0.4	0.1	4.2832
	0.3	2.2113		0.3	4.4775
	1	2.568		1	4.5378
	1.5	2.8339		1.5	4.4846
	2	3.0539		2	4.421
-0.6	0.1	3.146	0.6	0.1	4.3816
	0.3	2.8649		0.3	4.655
	1	3.002		1	4.7666
	1.5	3.1695		1.5	4.6969
	2	3.318		2	4.6085
-0.4	0.1	3.5497	0.8	0.1	4.4576
	0.3	3.3437		0.3	4.8029
	1	3.3804		1	4.9781
	1.5	3.4753		1.5	4.897
	2	3.5651		2	4.7876



Şekil 4.31: Gerilme yığılması faktörlerinin grafik gösterimi ($a/b=2$).

Çizelge 4.4 ve şekil 4.31’de analizler sonucu elde edilen değerler verilmiştir.

$a/b=5$ için denklem 4.6 ve denklem 4.8 kullanılarak elde edilen sonuçlar sonrası yapılan yorumlar ve gözlemler $a/b=2$ geometrisi için de geçerliliğini korumaktadır. Grafikler incelediğinde; yine n parametresinin bazı değerleri için plaka geometrisinin sınırları içerisinde E_0 değerine yakınsama tamamlanamamıştır. Her iki denklem için de aynı parametre değerleri ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında aynı değerlerle elde edilen gerilme değerleri farklılık göstermektedir. Yine bir örnek

vermek gerekirse; $k=-0.8$ ve $n=2$ değerleri için denklem 4.6 2.223 değerindeki gerilme yığılması faktörüyle denklem 4.8 ile elde edilen 3.0539 değerine göre gerilme yığılması faktörünü aşığılara çekmiştir. izelgeler incelenerek örnekler çoğaltılabilir.

Çalışmanın sonraki bölümlerinde fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeye ek bir malzeme bağlanmasıyla, ek parça bağlanmadan önceki haline göre gerilme değerleri ve gerilme bölgelerindeki değişimler incelenecektir. Ek malzeme olarak homojen ve karşılaştırmaya imkan vermesi amacıyla, birden fazla malzeme türü kullanılacaktır.

5. ORTASINDA DELİK BULUNAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PLAKALARA, DELİK BOYUTLARINDA FARKLI MALZEMELER BAĞLANMASI SONUCU ORTAYA ÇIKAN GERİLME DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş, ortasında dairesel ve eliptik delik bulunan plakaların çift eksenli yük altında gerilme yığılması davranışları daha önceki çalışmalarda incelemiştir.

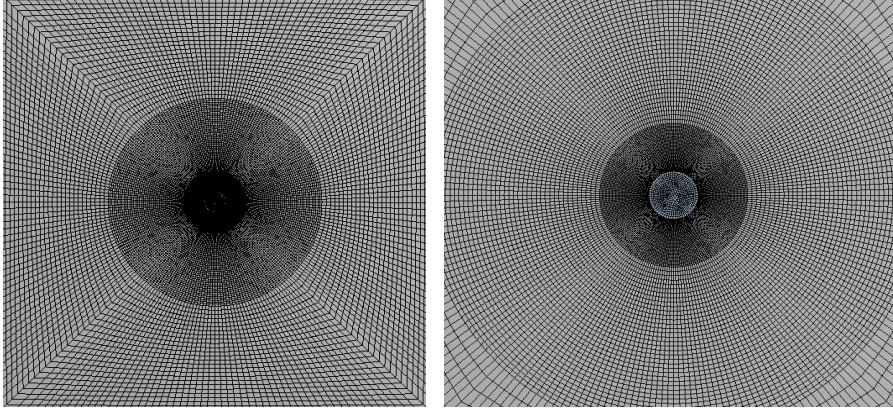
Bu çalışmada ise yine aynı plakalar kullanarak ve bu plakalara homojen malzemeler bağlanarak aynı yükler altında, davranışları incelenecektir. Çalışmalarda, karşılaştırma yapabilmek amacıyla çelik ve elastisite modülü 200×10^6 GPa, diğer özellikleri çelikle aynı olan 2 farklı homojen malzeme plakaya, Ansys programındaki bonded komutu ile bağlanmıştır. Bonded komutu parçalar arası boşluğa ve iki parçanın birbirine göre hareket etmesine izin vermemektedir. Yani yükleme sonucu parçalar arasında bir ayrılma olması beklenmemektedir.

5.1.Ortasında Dairesel Delik Bulunan Plakaya Ek Malzeme Bağlanması Sonucu Ortaya Çıkan Gerilme Değerlerinin İncelenmesi

Bu bölümde yapılan çalışmaların alt yapısı 3. bölümdeki çalışmalar ile kurulmuştu. Hatırlatmak gerekirse; $\frac{1}{4}$ simetrik, ortasında dairesel delik bulunan plaka istenilen fonksiyon ile derecelendirilmiş, sonrasında model üzerinde yükler ve sınır şartları girilerek istenilen fonksiyon parametrelerine göre delik çevresinde ortaya çıkan gerilme değerleri derecelendirilmemiş malzeme değerleri ile karşılaştırılmıştı. Sonuç olarak plakanın derecelendirilmesiyle gerilme değerlerinin farklılaştığı görülmüştür.

Şimdiki çalışmada ise bunlara ek olarak, boş olan dairesel deliğin içine homojen bir malzeme bağlanacak, diğer bütün girdiler ve değişkenler aynı kalacak şekilde çalışmalar yapılacaktır. Yalnızca $\frac{1}{4}$ simetrik model yerine modelin tamamı analize girmiştir. Bu sebeple ağ yapısı, modelin tümünü kapsayacak şekilde değiştirilmiş ve sonlu eleman sayısı artmıştır. Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı şekil 5.1'deki gibidir.

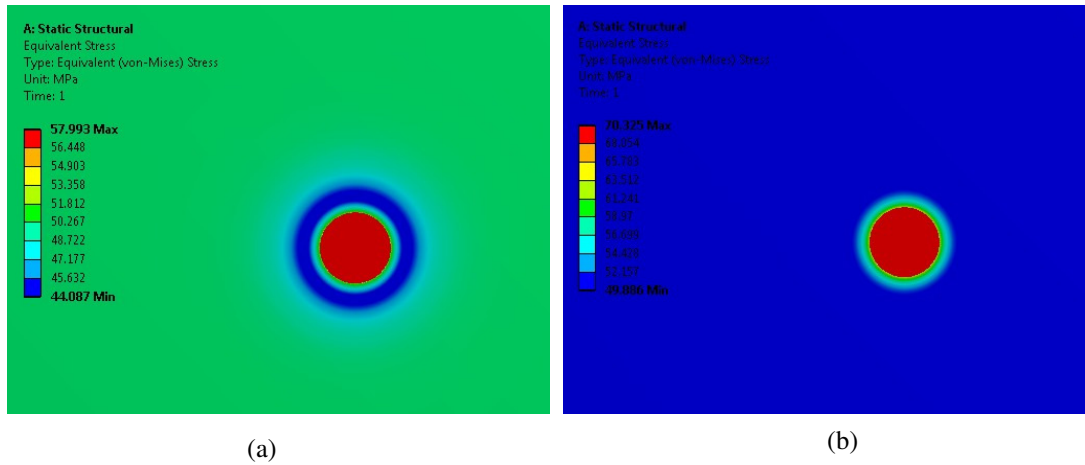
Çalışmada 3. bölümdeki sıraya sadık kalınmış ilk olarak denklem 3.1(Mohammadi ve diğ., 2010) ile analizler yapılmıştır.



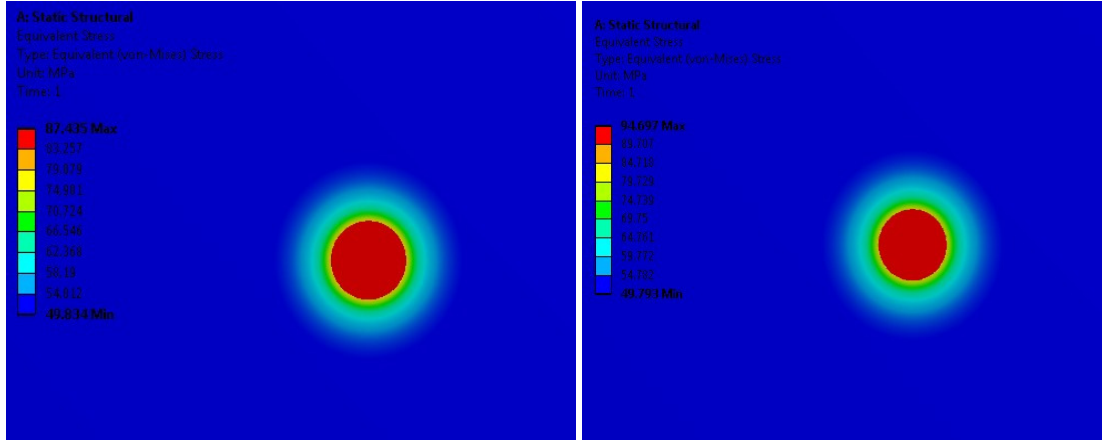
Şekil 5.1: Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı.

Denklem 3.1’de temel elastisite modülü, $E_{\infty} = 1 \text{ GPa}$, kullanılması plaka ile homojen malzeme arasındaki elastisite modülü farkının yüksek olmasına neden olmuştur.

Analizler sonucu gerilme dağılımının her bir parametre kombinasyonunda homojen malzemenin ne olduğundan bağımsız olarak aynı kaldığı görülmüştür. Ayrıca homojen malzeme bağlanması maksimum gerilme değerlerinin bazılarını aşağıya çekmiş bazılarında ise artışa sebep olmuştur, fakat yine her bir parametre kombinasyonu için farklı homojen malzeme kullanımında maksimum gerilme değerleri arasında ortaya çok fark çıkmamıştır. Analizler sonucu ortaya çıkan ekran görüntüleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Ekran görüntüleri her bir parametre kombinasyonu için bir görüntü olacak şekilde verilmiştir çünkü farklı homojen malzeme bağlanmasıyla gerilme dağılımı değişiklik göstermemiştir.



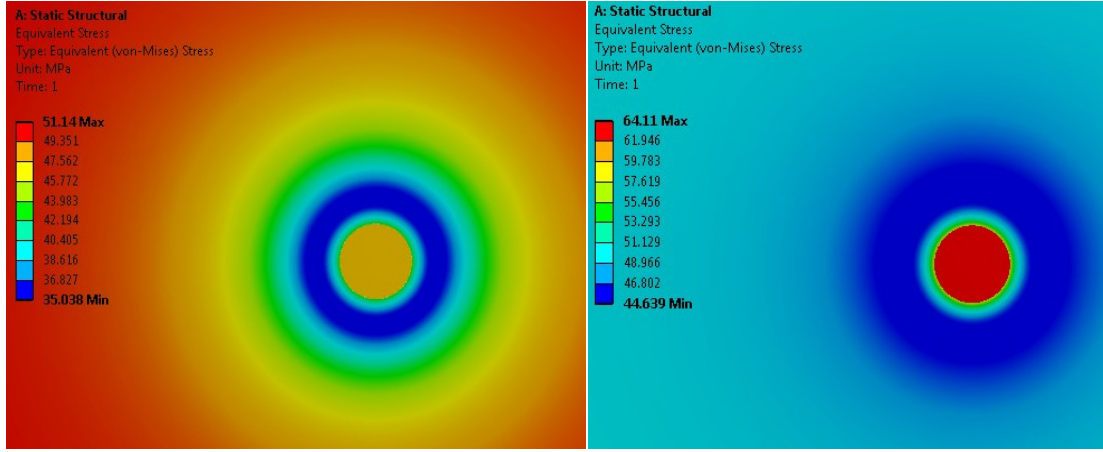
Şekil 5.2: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.2$, $n=-2$, (b) $t=0.2$, $n=-1$.



(a)

(b)

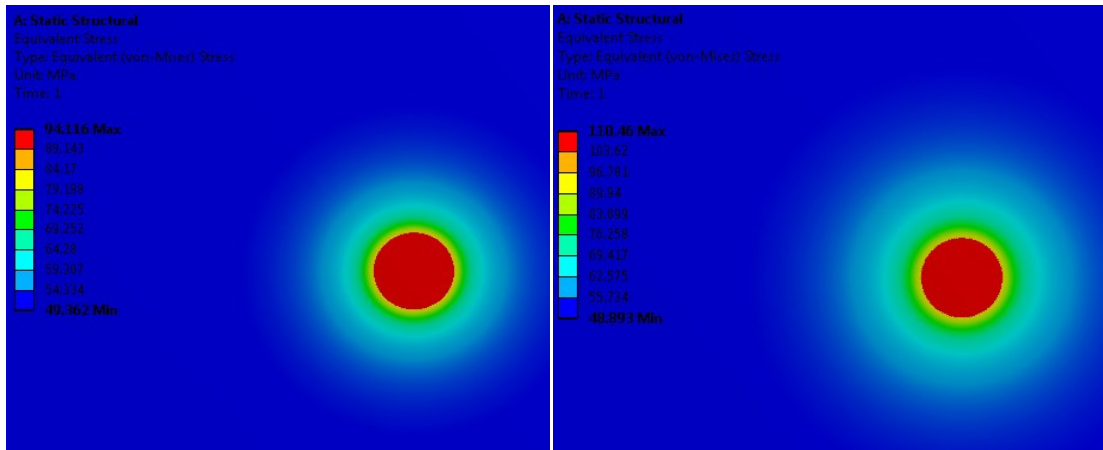
Şekil 5.3: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.2$, $n=1$, (b) $t=0.2$, $n=2$.



(a)

(b)

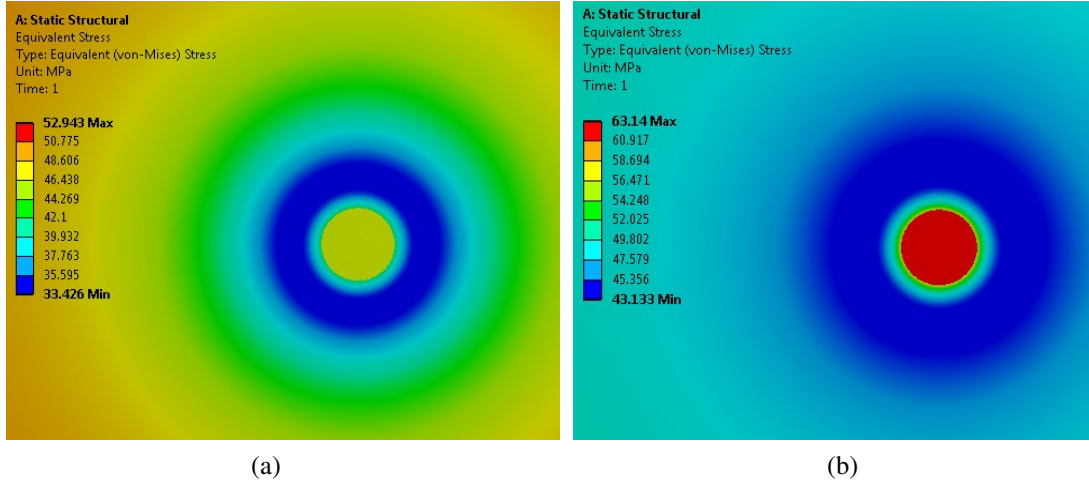
Şekil 5.4: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.6$, $n=-2$, (b) $t=0.6$, $n=-1$.



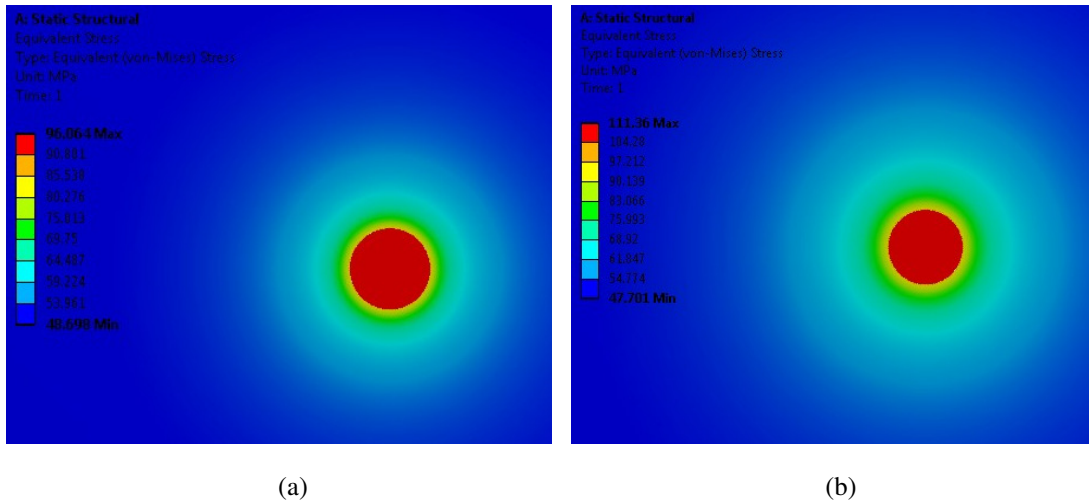
(a)

(b)

Şekil 5.5: Gerilme dağılımları, (a) $t=0.6$, $n=1$, (b) $t=0.6$, $n=2$.



Şekil 5.6: Gerilme dağılımları, (a) $t=1, n=-2$, (b) $t=1, n=-1$.



Şekil 5.7: Gerilme dağılımları, (a) $t=1, n=1$, (b) $t=1, n=2$.

Grafikleri, 3. bölümde denklem 3.1 ile yapılan çalışmalar sonucu çıkan grafikler ile karşılaştırdığımızda $\eta < 0$ değerleri için delik çeperinden uzakta ortaya çıkan maksimum gerilme genel olarak plakaya bağladığımız homojen malzeme üzerinde toplanmıştır. Yalnızca $t=0.6, n=-2$ ve $t=1, n=-2$ parametreleri için maksimum gerilme plakanın dış bölgelerine doğru gerçekleşmiştir. Bu da yüzey yumuşatma durumunda derecelendirme arttıkça maksimum gerilmenin homojen malzemeden uzaklaşıp dış bölgelere gittiğini gösteriyor, fakat denemeler göstermiştir ki derecelendirme derinliği sürekli olarak artırılırsa bir yerden sonra maksimum gerilme tekrar bağlanan homojen malzeme üzerine gelmektedir. Herbir malzeme için analiz sonuçları çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgede daha önceki çalışmada elde edilen sonuçlar da verilmiştir ayrıca elastisite modülü 200×10^6 GPa olan malzemenin ismi rijit olarak belirtilmiştir.

Çizelge 5.1: Üstel fonksiyon ile derecelendirilmiş plakaya homojen malzemeler bağlanması sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa).

t	η	σ (delik çeperi) Analitik değerler	σ (delik çeperi)	σ_{maks} (çelik)	σ_{maks} (rijit)
0.2	-2	17.6	17.91	57.995	58.08
	-1	42.8	44.02	70.325	70.47
	1	219.65	223.78	87.465	87.765
	2	442.85	443	94.695	95.796
0.6	-2	23.6	24.6	51.14	51.14
	-1	50	52	64.11	64.214
	1	186.3	188.6	94.116	95.361
	2	321.2	318.9	110.46	112.15
1	-2	27.75	30.75	52.943	52.943
	-1	54.15	58	63.14	63.14
	1	173.75	171.2	96.064	97.49
	2	283.5	268	111.36	116.5

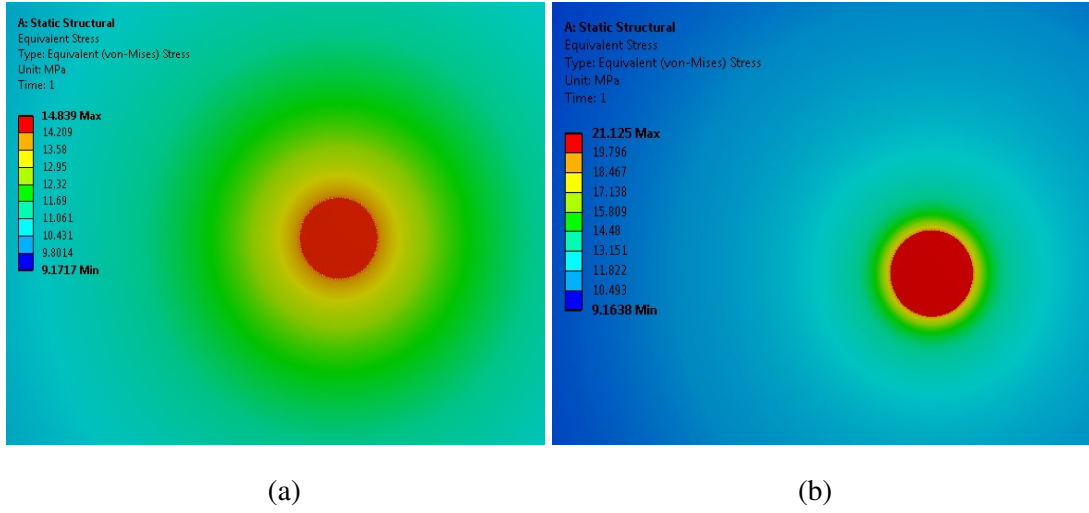
Analiz sonuçlarının $\eta < 0$ ve $\eta > 0$ değerleri için ikiye ayrılıp incelenecek olursa, sonuçlar üzerinde daha rahat yorum yapılabilir. Bilindiği üzere denklem 3.1’de $\eta < 0$ olduğunda delik çeperindeki gerilme değeri derecedirne yapılmamış malzemede ortaya çıkan $\sigma = 2T$ değerinden daha küçük, $\eta > 0$ olduğunda da daha büyük çıkmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş plakada dairesel deliğe ek bir homojen malzeme bağlanması bu genellemeyi ortadan kaldırmıştır. Çizelge 5.1’i tek başına incelemek gerilme değerleri açısından yanıltıcı olabilir. Bu yüzden çizelge 5.1’deki gerilme değerlerini bölüm 3’de denklem 3.1 için verilen ekran görüntüleriyle beraber incelemek gerekir.

$\eta > 0$ değerleri incelendiğinde maksimum gerilme değerlerinde dramatik düşüşler olduğu görülür. Bölüm 3’deki çalışmada $\eta > 0$ için yapılan analizlerin hepsinde maksimum gerilme delik çeperinde ortaya çıkmıştır, bu çalışmada ise maksimum gerilmenin delik çeperinden homojen malzeme üzerine geçtiği görülmektedir. Bununla beraber maksimum gerilmenin homojen malzeme kullanımıyla ortalama %50’den fazla olacak şekilde azaldığı görülmektedir.

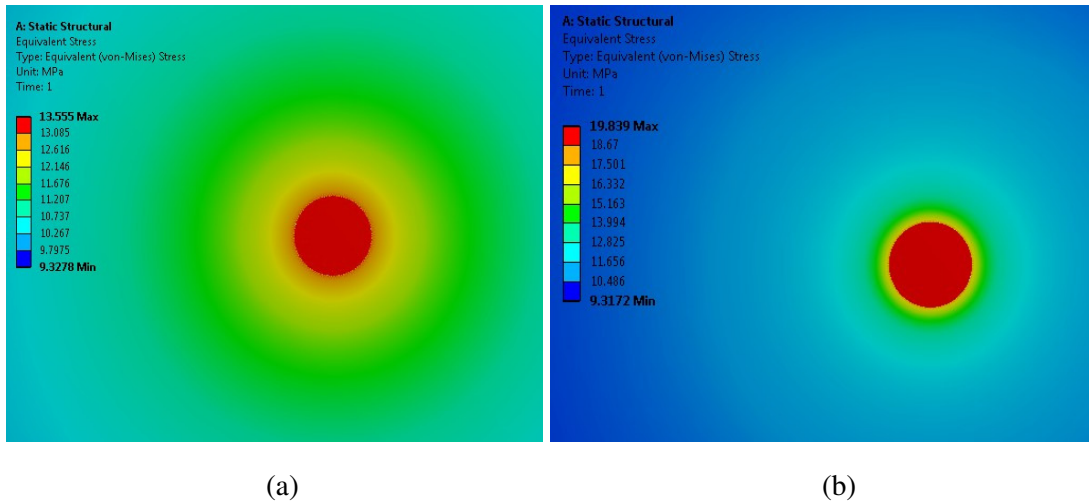
Sonuçlar, rijit ve çelik bağlama olarak incelendiğinde ise gerilme değerleri arasında hemen hemen fark olmadığı görülmektedir. Bunun sebebi şu şekilde yorumlanabilir; fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakanın en yüksek elastite modülü değeri bağlanan homojen malzemelerin elastisite modülleri değerlerinden çok küçük olduğu için uygulanan yük altında ortaya çıkacak maksimum gerilmeye ulaşılmış olabilir.

Yani bağlanan homojen parçanın çeliğin elastisite modülünün bir milyon katına çıkması gerilme değerleri açısından bir şey ifade etmemektedir. Fakat bunun tersi denendiğinde yani elastisite modülü çeliğin elastisite modülünden daha küçük olan malzemeler kullanıldığında bir noktadan sonra gerilme değerlerinin azaldığı görülecektir.

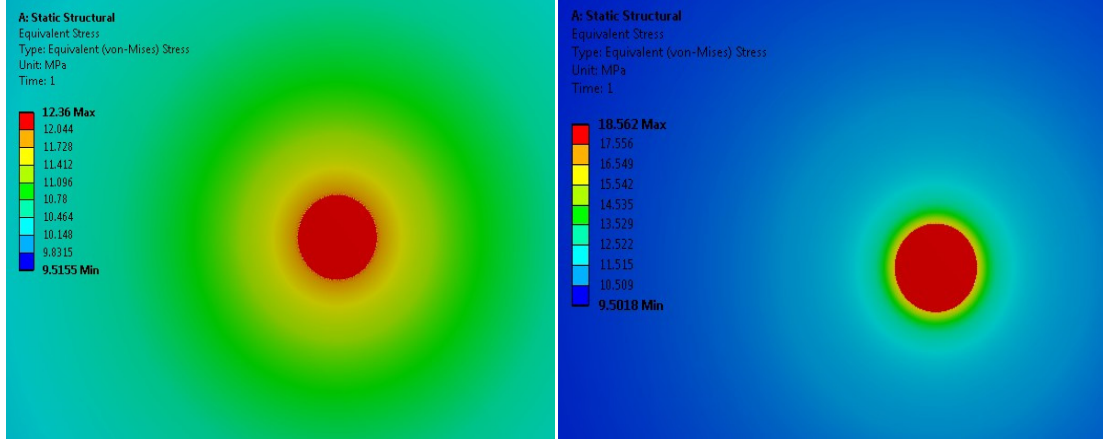
Fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel delikli plakaya ek homojen malzeme bağlanması işlemi güç fonksiyonu denklemi olan denklem 3.10 için de aynı şekilde yapılmıştır. 3. bölümde fonksiyonel derecelendirilmiş plaka için kullanılan güç fonksiyonu aynen kullanılmış, $T=10$ MPa alınmıştır. Gerilme değerleri ve gerilme yığılması bölgeleri incelenmiştir. Farklı n değerleri için elde edilen ekran görüntüleri aşağıdadır.



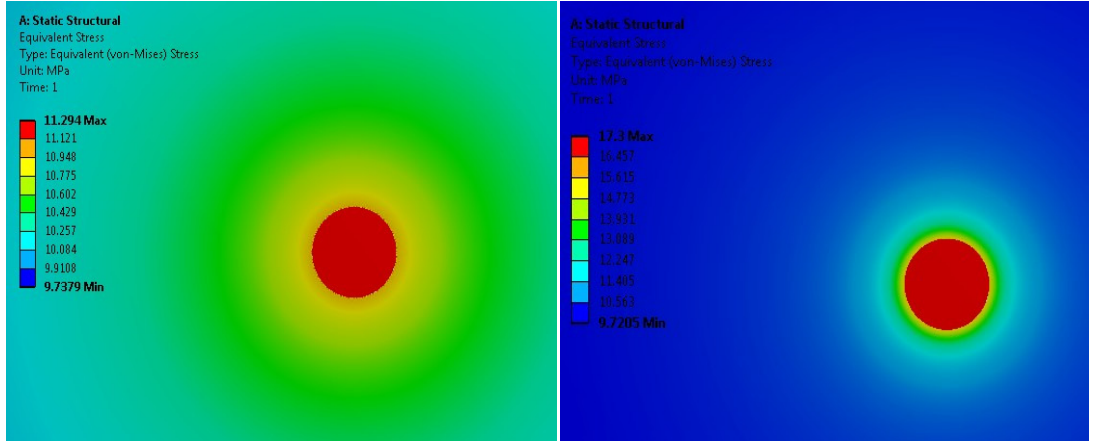
Şekil 5.8: $n=-0.4$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.



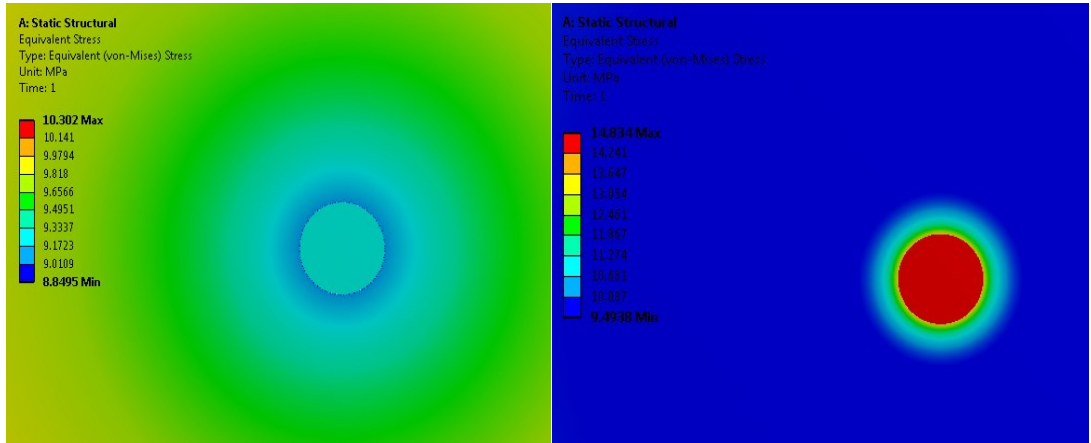
Şekil 5.9: $n=-0.3$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.



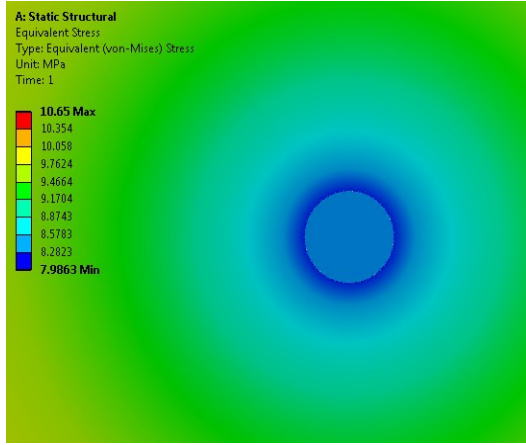
Şekil 5.10: $n=-0.2$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.



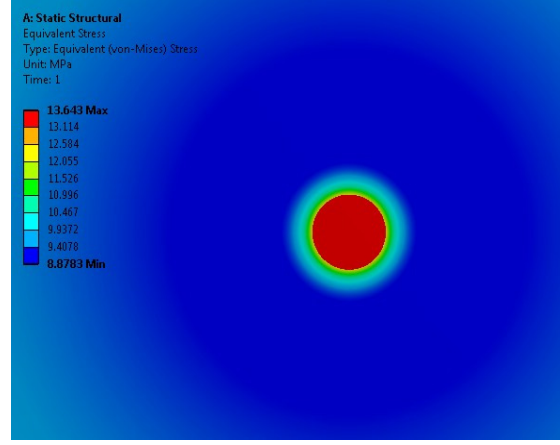
Şekil 5.11: $n=-0.1$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.



Şekil 5.12: $n=0.1$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.

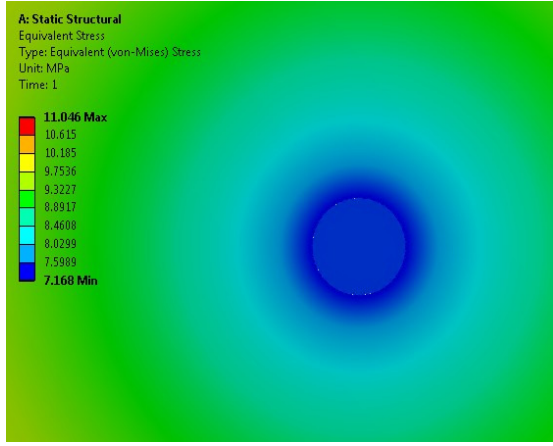


(a)

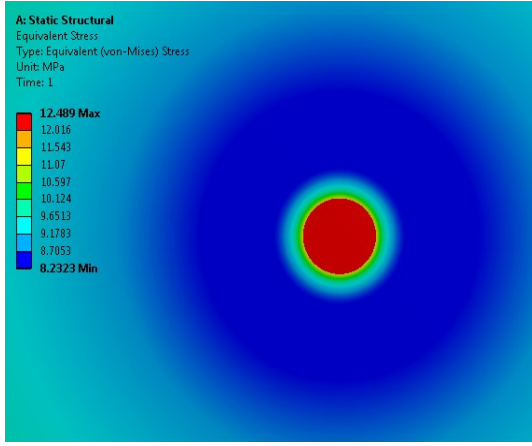


(b)

Şekil 5.13: $n=0.2$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.

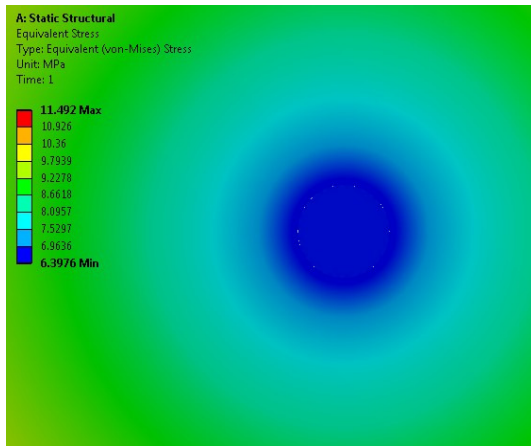


(a)

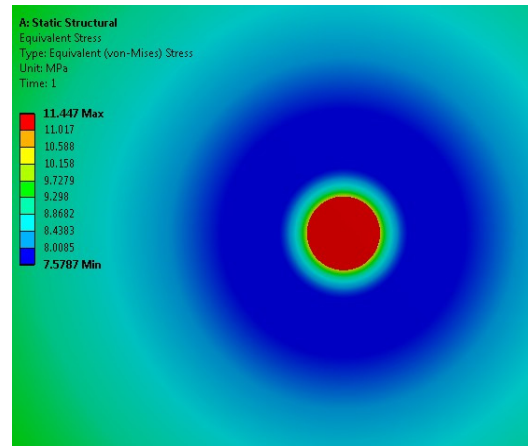


(b)

Şekil 5.14: $n=0.3$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.



(a)



(b)

Şekil 5.15: $n=0.4$ için gerilme değerleri, (a) çelik bağlama, (b) rijit bağlama.

Homojen malzeme bağlanmadan yapılan analizlerde bütün n değerleri için maksimum gerilme delik çeperinde ortaya çıkmıştı. $n < 0$ için fonksiyonel

derecelendirilme yapılmamış plakadaki $\sigma=2T$ 'den daha büyük $n>0$ için $\sigma=2T$ 'den daha küçük gerilme değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre maksimum gerilme değeri her iki homojen parçanın bağlanmasıyla da düşmüştür. Yüzey yumuşatma durumunda delik çeperindeki elastisite modülüne sahip homojen malzeme(çelik) parça bağlanması gerilme değerini rijit parçanın bağlandığı duruma göre oldukça düşürmüştür ve maksimum gerilme her durumda plaka dış bölgelerinde olmuştur. Bir önceki bölümde bahsi geçen fonksiyonel derecelendirilmiş plaka elastisite modülü ile bağlanan homojen malzeme elastisite modülü arasındaki farkın önemi burda ortaya çıkmıştır. Elastisite modülü küçük olan çelik malzemesi bağlandığında, gerilme değeri rijit malzemenin bağlandığı duruma göre daha çok azalmıştır ve rijit malzeme bağlandığı her durumda maksimum gerilme homojen malzeme üzerinde toplanmıştır.

Yüzey sertleştirme durumunda ise, derecelendirme elastisite modülü delik çeperinde büyük dışarılara doğru daha küçük ovalcak şekilde tanımlandığından dolayı, delik içine, elastisite modülü çeperdeki değerden daha büyük bir malzeme bağlandığında, maksimum gerilme, bağlanan homojen malzeme üzerine geçmiş ve alanı büyüdüğü için değeri düşmüştür. Bağlanan parçanın elastisite modülü artırıldığında ise ortaya çıkan maksimum gerilme değerinin arttığı görülmektedir.

Analizlerde elde edilen gerilme değerleri 3.bölümdeki değerler ile birlikte çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2: Güç fonksiyonu ile derecelendirilmiş plakaya homojen malzemeler bağlanması sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa).

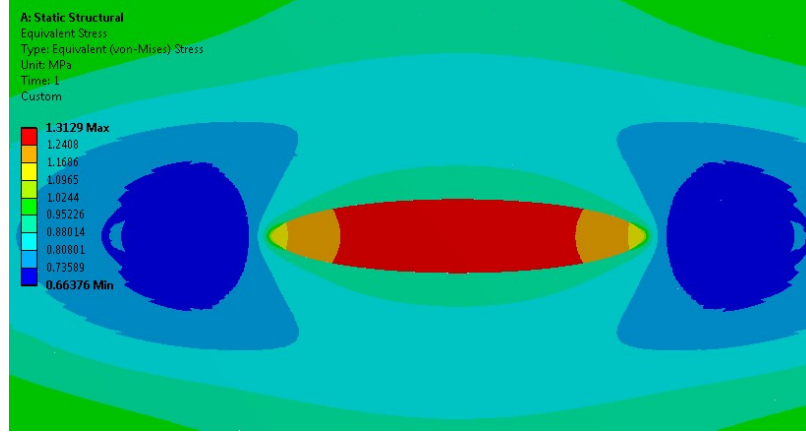
n	σ (SADD, 2009)	σ_{maks} (delik çeperi)	σ_{maks} (çelik)	σ_{maks} (rijit)
-0.4	31.79	32.03	14.84	21.02
-0.3	28.52	28.68	13.55	19.74
-0.2	25.48	25.57	12.48	18.46
-0.1	22.65	22.69	11.29	17.2
0	20.05	20.04	10.27	15.96
0.1	17.657	17.61	10.30	14.74
0.2	15.4	15.4	10.66	13.55
0.3	13.49	13.4	11.06	12.40
0.4	11.70	11.64	11.52	11.44

5.2.Ortasında Eliptik Delik Bulunan Plakaya Ek Malzeme Bağlanması Sonucu Ortaya Çıkan Gerilme Değerlerinin İncelenmesi

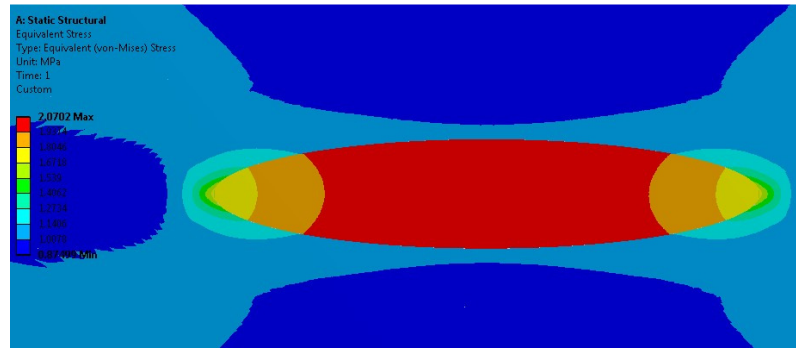
Ek malzeme bağlama işlemi 4. bölümde kullanılan 50x50mm. boyutlarındaki ortasında küçük eksen 1mm. büyük eksen 5mm. boyutlarında eliptik delik bulunan fonksiyonel derecelendirilmiş plaka için de uygulanmıştır. Eliptik delik boyutlarında eliptik homojen malzemeler plakaya yine Ansys programındaki bonded komutu ile bağlanmıştır. Bu bölüm için derecelendirme işlemi denklem 4.6'ya göre yapılmıştır. Fakat çizelge 4.1'deki bütün k ve n parametreleri için analiz yapılmamış yalnızca $k=-0.8$, -0.4 , 0.4 , 0.8 ve $n=0.1$, 0.3 , ve 1 değerleri için analiz çalışmaları yapılmıştır.

4. bölümde kullanılan $\frac{1}{4}$ simetrik sonlu elemanlar modeline homojen malzeme bağlandığında sonlu eleman ağ yapısında beklenmeyen bir sorun olduğu için ağ yapısı bozulmuştur. Bu sebeple sonlu eleman ağ yapısı tam model için tekrar kurulmuştur. 50x50mm. boyutlarındaki tam plaka modeli ortasında homojen malzeme bağlı olarak tekrar kurulup sonlu eleman ağ yapısı oluşturulduktan sonra modelin vereceği sonuçların güvenilirliğini kontrol etmek amacıyla önceki değerlerle karşılaştırmak için, homojen malzeme olmaksızın analiz çalışmaları yapılmıştır. Modelin güvenilirliğinden emin olunduktan sonra homojen malzeme bağlanarak analiz çalışmaları yapılmıştır.

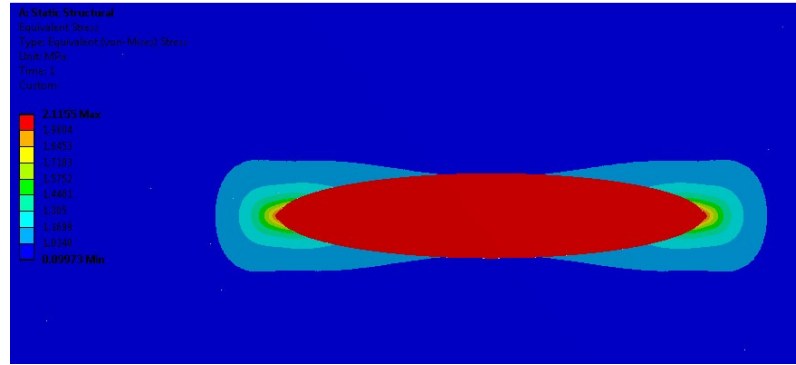
Analiz çalışmalarında maksimum gerilme, her zaman ek parça üzerinde ortaya çıkmış ve farklı n değerleri ve ek malzemeler için gerilme bölgesi değişmemiştir. Gerilme bölgesine etki eden parametre k olmuştur. Ayrıca denklem 4.6 için temel elastisite modülünün 1GPa olması fakat fonksiyonel derecelendirilmiş plakaya bağlanan çelik parçanın elastisite modülünün 200Gpa, rijit parçanın ise 200×10^6 GPa olması sebebiyle birbirine bağlanan bu parçalar arasında oldukça büyük bir elastisite modülü farkı ortaya çıkmıştır. Yani bu özelliklerdeki fonksiyonel derecelendirilmiş plakaya çelik parça bağlanması da bir anlamda bağıl olarak rijit parça görevi yapmıştır. Her iki homojen parça bağlanarak elde edilen gerilme değerleri bu sebeple birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Parça bağlamanın gerilme değerlerine etkisini daha iyi yorumlayabilmek için elastisite modülü fonksiyonel derecelendirilmiş pakankine yakın olan malzemeler tercih edilebilir. Bu sebeple aşağıdaki şekillerde yalnızca çelik parça bağlandığında ortaya çıkan değerler verilecek rijit parça bağlandığında ortaya çıkan sonuçlar çizelge 5.3'de verilecektir.



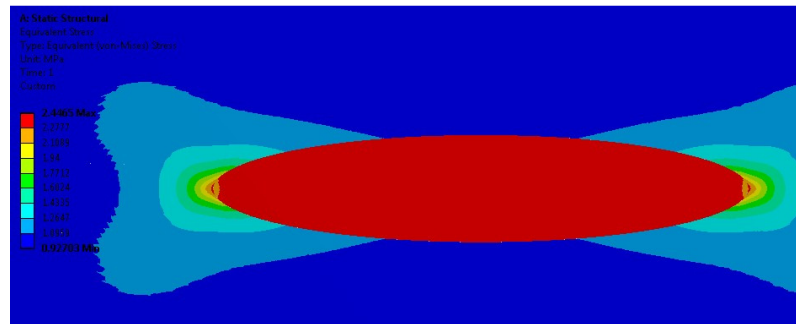
Şekil 5.16: $k=-0.8$, $n=0.1$ (çelik ek parça).



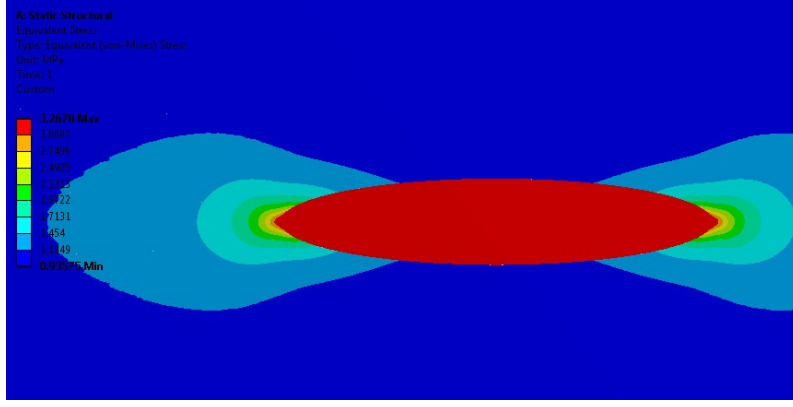
Şekil 5.17: $k=-0.8$, $n=1$ (çelik ek parça).



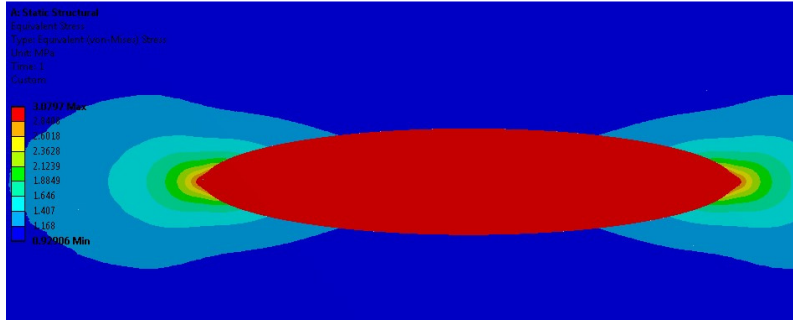
Şekil 5.18: $k=-0.4$, $n=0.1$ (çelik ek parça).



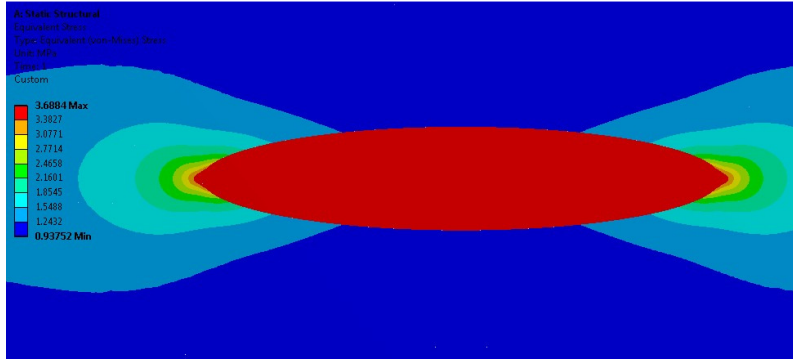
Şekil 5.19: $k=-0.4$, $n=1$ (çelik ek parça).



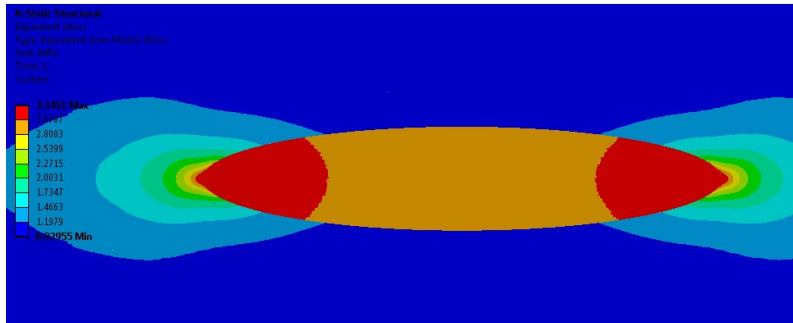
Şekil 5.20: $k=0.4$, $n=0.1$ (çelik ek parça).



Şekil 5.21: $k=0.4$, $n=1$ (çelik ek parça).



Şekil 5.22: $k=0.8$, $n=0.1$ (çelik ek parça).



Şekil 5.23: $k=0.8$, $n=1$ (çelik ek parça).

Dairesel malzeme bağlamadan farklı olarak bazı durumlarda eliptik parça üzerinde gerilme düzgün olarak dağılmamıştır.

Çizelge 5.3: Fonksiyonel derecelendirilmiş eliptik delikli plakaya homojen malzemeler bağlanması sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa).

k	n	σ_{maks} (delik çeperi)	Referans değerler	σ_{maks} (çelik)	σ_{maks} (rijit)
	0.1	4.8202	5.034	1.3275	1.3324
-0.8	0.3	4.7812	4.61	1.6189	1.6278
	1	5.2355	-	2.0754	2.093
	0.1	8.193	8.345	2.1253	2.144
-0.4	0.3	7.8325	8.103	2.2676	2.2899
	1	7.9289	-	2.4502	2.4774
	0.1	11.201	-	3.2633	3.3178
0.4	0.3	11.359	-	3.1863	3.2376
	1	11.366	-	3.0773	3.1234
	0.1	12.264	-	3.68	3.7563
0.8	0.3	12.586	-	3.5365	3.603
	1	12.642	-	3.3396	3.3961

Çizelgede görüldüğü gibi bütün parametre değerleri için maksimum gerilme değerlerinde ciddi düşüşler yaşanmıştır. Malzemenin ne olduğu gerilme değerinin pek etkilemezken, “homojen malzemelerin elastisite modülü değerlerinin fonksiyonel derecelendirilmiş plakanınkine oranla çok fazla olmasından dolayı”, ek malzeme bağlanması maksimum gerilmeyi, ek malzeme olmayan duruma göre oldukça azaltmıştır.

6. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ PLAKADA DELİK ÇEPERİNİN YÜK ALTINDA YER DEĞİŞTİRMESİNE İZİN VERİLMEDİĞİ DURUMDA GERİLME DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Önceki bölümde, delik boşluklarına delik boyutlarında homojen malzemeler bağlanması sonucu çift eksenli yük altında ortaya çıkan gerilme değerleri incelenmişti. Homojen malzemelerden birinin elastisite modülü 200×10^6 GPa seçilerek rijit malzeme tanımlanmak istenmiştir. Bu şekilde farklı elastisite modülüne sahip malzemelerin fonksiyonel derecelendirilmiş plakaya bağlanmasının gerilme değerlerine etkisi incelenmiştir.

Bu bölümde ise rijit bir malzeme bağlamak yerine, delik çeperinin yük altında yer değiştirmesine izin vermeyerek, sanki rijit malzeme bağlıymış gibi davranmasını bekleyerek analiz çalışmaları yapılmıştır.

Çalışma, fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel delikli plaka ve farklı iki eliptik delik geometrisine sahip Berlo'nun fonksiyonu ile derecelendirilmiş plakalar üzerinde yapılmıştır. Delik çeperinin yük altında sabit kalması için Ansys programında fixed support komutu kullanılmıştır.

6.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Dairesel Delikli Plakada Delik Çeperinin Yük Altında Yer Değiştirmesine İzin Verilmediği Durumda Gerilme Değerlerinin İncelenmesi

Denklem 3.1 ve 3.10 ile derecelendirilmiş plakalar için delik çeperi sabit tutularak önceki bölümlerde kullanılan fonksiyon parametreleri ile analizler yapılmıştır. İlk olarak denklem 3.1 ile yapılan çalışmaya sonra denklem 3.10'a ait sonuç çizelgeleri verilecektir. Denklem 3.1 ile yapılan analizlerde ortaya çıkan sonuçlar çizelge 6.1'de verilmiştir.

Elde edilen değerler çizelge 5.1'de rijit malzeme bağlama ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında farklılıklar görülmektedir. Fakat parametre değişimlerine göre gerilme değerlerindeki değişim benzerlik göstermektedir. $\eta=-2$, $t=0.6$, 1

Çizelge 6.1: Denklem 3.1 ile derecelendirilmiş plakada delik çeperinin sabit tutulması durumunda delik çeperindeki gerilme değerleri (MPa).

t	η	$\sigma_{\max}$ (delik çeperi) Analitik değerler	$\sigma_{\max}$ (delik çeperi)	$\sigma_{\max}$ (delik çeperi sabit)
0.2	-2	17.6	17.91	52.19
	-1	42.8	44.02	63.22
	1	219.65	223.78	78.66
	2	442.85	443	83.84
0.6	-2	23.6	24.6	39.7
	-1	50	52	57.58
	1	186.3	188.6	85.49
	2	321.2	318.9	97.84
1	-2	27.75	30.75	38.45
	-1	54.15	58	56.61
	1	173.75	171.2	87.41
	2	283.5	268	102.41

parametreleriyle yapılan analizler dışında tüm analizlerde maksimum gerilme delik çeperinde ortaya çıkmıştır.

Denklem 3.10 ile yapılan çalışmanın sonucu çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2: Denklem 3.10 ile derecelendirilmiş plakada delik çeperinin sabit tutulması durumunda delik çeperindeki gerilme değerleri (MPa).

n	$\sigma_{\max}$ (SADD, 2009)	$\sigma_{\max}$ (delik çeperi)	$\sigma_{\max}$ (delik çeperi sabit)
-0.4	31.79	32.03	18.95
-0.3	28.52	28.68	17.79
-0.2	25.48	25.57	16.64
-0.1	22.65	22.69	15.50
0	20.05	20.04	14.39
0.1	17.657	17.61	13.29
0.2	15.4	15.4	12.23
0.3	13.49	13.4	11.19
0.4	11.70	11.64	10

Gerilme değerleri yine çizelge 5.2’deki değerler ile benzer yönelim göstermiş fakat nicelik olarak farklılıklar ortaya çıkmıştır. Bütün n değerleri için maksimum gerilme delik çeperinde ortaya çıkmış, n=0.3 ve daha büyük n değerleri için plaka dış kenarlarında da ortaya çıkmaya başlamıştır.

6.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Eliptik Delikli Plakada Delik Çeperinin Yük Altında Yer Değiştirmesine İzin Verilmediği Durumda Gerilme Değerlerinin İncelenmesi

Eliptik delikli plaka için analizler $a/b=2$ ve $a/b=5$ olmak üzere iki farklı geometrideki eliptik delik için yapılmıştır. Fonksiyonel derecelendirme için denklem 4.6 kullanılmıştır. $a/b=5$ için elde edilen analiz sonuçları delik çeperi serbest haldeyken elde edilmiş olan sonuçlarla birlikte çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3: $a/b=5$ için delik çeperinin sabit tutulması durumunda ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa).

k	n	σ_{maks} (delik çeperi)	Referans değerler	σ_{maks} (delik çeperi sabit)
-0.8	0.1	4.8202	5.034	1.15
	0.3	4.7812	4.61	1.35
	1	5.2355	-	1.73
-0.4	0.1	8.193	8.345	2.12
	0.3	7.8325	8.103	2.21
	1	7.9289	-	2.36
0.4	0.1	11.201	-	3.33
	0.3	11.359	-	3.25
	1	11.366	-	3.13
0.8	0.1	12.264	-	3.77
	0.3	12.586	-	3.62
	1	12.642	-	3.4

Dairesel delikli plakanın aksine eliptik delikli plakada delik çeperinin sabit tutulması rijit malzeme bağlandığı durumdaki gibi bütün parametre değerleri için gerilme değerlerinde önemli düşüşe sebep olmuştur. Hatta yüzey sertleştirme durumunda ($k>0$) elde edilen gerilme değerleri rijit malzeme bağlandığında elde edilen gerilme değerleri ile hemen hemen aynıdır. Sonuçlar çizelge 5.3 ile kontrol edilebilir.

Eliptik delikli fonksiyonel derecelendirilmiş plakaya malzeme bağlama işlemi yalnızca $a/b=5$ geometrisindeki eliptik delik ile yapılmıştır. Delik çeperinin sabit tutulduğu bu çalışmada önceki bölüme ilave olarak $a/b=2$ olduğu durum da ele alınmıştır. Ek olarak bu çalışmanın yapılmasının amacı eliptik delik geometrisinin dairesel deliğe doğru giderken bölüm 4’de gösterdiği eğilimi delik çeperinin sabit tutulduğu durumda da gösterip göstermeyeceğini kontrol etmek olmuştur. $a/b=2$ için aynı işlem tekrarlandığında elde edilen analiz sonuçları çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4: $a/b=2$ için delik çeperinin sabit tutulması durumunda ortaya çıkan maksimum gerilme değerleri (MPa).

k	n	σ_{maks} (delik çeperi)	Referans değerler	σ_{maks} (delik çeperi sabit)
	0.1	1.8051	1.988	0.87
-0.8	0.3	1.721	1.735	0.99
	1	1.9245	-	1.23
	0.1	3.233	3.397	1.4
-0.4	0.3	3.127	3.2	1.45
	1	3.1275	-	1.53
	0.1	4.5362	-	1.9355
0.4	0.3	4.6627	-	1.9
	1	4.7249	-	1.84
	0.1	4.914	-	2.11
0.8	0.3	5.165	-	2.05
	1	5.3147	-	1.95

$a/b=5$ durumunda olduğu gibi $a/b=2$ iken de delik çeperinin sabit tutulması gerilme değerlerini oldukça azalmasına sebep olmuştur. Hem yüzey sertleştirme hem de yüzey yumuşatma durumunda her iki eleptik delik geometrisi için gerilme değerlerinde azalma meydana gelmiştir.

Sonuçlar göstermektedir ki eliptik delik geometrisine malzeme bağlamak veya delik çeperini tutmak, dairesel delik geometrisinde aynı işlemleri yapmaya göre gerilme değerlerinde daha dikkate değer azalmalar meydana getirmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma boyunca çift eksenli yük altında, dairesel ve eliptik deliğe sahip fonksiyonel derecelendirilmiş iki boyutlu plakalar üzerinde, gerilme yığılmaları sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Ayrıca son bölümlerde bu plakalara homojen malzemeler bağlanarak gerilme değerleri ve homojen malzemelerin gerilme durumlarına etkisi incelenmiştir.

Plakaların fonksiyonel olarak derecelendirilmesi için elastisite modülünü tanımlayan birden fazla fonksiyon kullanılmış ve bu fonksiyonların ortaya koyduğu karakteristikler ve gerilme sonuçları yorumlanmıştır. Dairesel delikli plaka için derecelendirme işlemi radyal koordinata bağlı olarak yapılmış, eliptik delikli plakada ise elastisite modülü değişimi eliptik deliğin şeklini takip etmiştir.

Dairesel delikli plaka için kullanılan ilk fonksiyonun, delik çeperindeki elastisite modülünü ve derecelendirme derinliğini belirleyen iki parametreye bağlı olması, her iki parametrenin gerilme değerlerine nasıl etki ettiğini anlamada belirleyici olmuştur.

Elastisite modülünün delik çeperinden itibaren artmasının (yüzey yumuşatma), her iki delik geometrisi için de delik çeperinde ortaya çıkan gerilme değerini düşürdüğü görülmüştür. Dairesel delikli plaka derecelendirmesi için kullanılan ilk fonksiyonla elde edilen sonuçlar göstermiştir ki yüzey yumuşatma durumunda derecelendirmenin artması delik çeperinin dışında ortaya çıkan maksimum gerilmeyi delik çeperine doğru yaklaştırmaktadır. Aynı şekilde temel elastisite modülü sabit iken delik çeperinde elastisite modülünün artması (sıfıra yaklaşması) delik çeperindeki gerilme değerini sürekli arttırırken maksimum gerilmenin delik çeperine gelmesini sağlamaktadır.

Elastisite modülünün delik çeperinden itibaren artmasının (yüzey sertleştirme), her iki delik geometrisi için de ortaya çıkan gerilme değerini artırdığı görülmüştür. Ayrıca yüzey sertleştirme durumunda derecelendirmenin artmasıyla, ortaya çıkan maksimum gerilmenin sürekli azalarak homojen durumdaki değere doğru yaklaştığı görülmüştür.

Eliptik delikli plakada elastisite modülünü tanımlayan iki farklı fonksiyon kullanılması, fonksiyon özelliklerini daha iyi yorumlama adına önemli olmuştur. İki

fonksiyonun derecelendirme yeteneklerinin farklı olması derecelendirmenin eliptik delikli plakada gerilme değerlerine nasıl etkidiğini görmeye yardımcı olmuştur. Derecelendirme derinliğinin daha yüksek olduğu ikinci fonksiyon ile ilk fonksiyonu karşılaştırdığımızda aynı parametre değerleri için, ilk fonksiyonun gerilme değerlerini düşürmede daha başarılı olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Her iki delik geometrisine homojen parça bağlanması durumunda ortaya çıkan gerilme değerlerinin parça bağlanmadan önceki değerlere göre düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen veriler yorumlandığında, gerilme değerlerini düşürmek için bağlanacak homojen malzemenin, bağlanacağı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin elastisite modülü değerlerine yakın bir elastisite modülüne sahip olması gerektiği anlaşılmıştır.

Yapılan bu çalışmada sıcaklığın etkisi analizlere hiç katılmamış, fonksiyonel derecelendirmenin yalnızca mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bilindiği üzere üretilen her makinanın çalışması gereken bir alt ve üst sıcaklık limiti vardır. Bu sebeple çalışma, sıcaklığın etkiside dahil edilerek geliştirilebilir.

Çalışma boyunca özellikle eliptik delikli plaka üzerinde derecelendirme yaparken elastisite modülünü sıcaklığa bağlı olarak derecelendirme işlemini yapmak oldukça zaman alıcı bir işlem olmuştur. Bu nedenle, çalışmanın daha akıcı ilerlemesi, daha fazla analiz yapılabilmesi için sonlu eleman sertlik matrisini elastisite modülüne bağlı olarak çözebilen bir alt program geliştirilir ve sonlu elemanlar programına okutulursa daha esnek çalışma imkanı sunacaktır. Ayrıca bu şekilde sıcaklığın etkisini analizlere dahil etmenin daha kolay olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Berlo S. P.** (2009). *Stress Concentration Effects in Highly Localized Functionally Graded Materials*. Master's Thesis, Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Rhode Island.
- Kouzumi M.** (1997). Functionally Graded Material Activities in Japan. *Composites Part B-Engineering*, 28(1-2), 1-4.
- Kubair D. V. ve Bhanu-Chandar B.** (2008). Stress Concentration Factor due to Hole in Functionally Graded Panels under Uniaxial Tension. *International journal of mechanical sciences*, 50, 732-742
- Mohammadi M., Dryden J., R., Jiang L.** (2010). Stress Concentration Around a Hole Radially Inhomogeneous Plate. *International Journal of Solids and Structures*, 48, 483-491
- Özarslan O.** (2007). *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Plağın Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Paulino G. H. ve Kim J.** (2007). The Weak Patch Test for Nonhomogeneous Materials Modeled With Graded Finite Elements. *Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, 29, 63-81.
- Pompe W., Worch H., Epple M., Friess W., Gelinsky M., Greil P., Hempel U., Scharnweber D., Schulte K.** (2003). Functionally Graded Materials for Biomedical Application. *Material Science and Engineering A-Structural Material Properties Microstructures and Processing*, 362(1-2), 40-60.
- Sadd M. H.** (2009). *Elasticity, Theory, Applications & Numerics*. Boston: Elsevier Academic Press.
- Sadd M. H.** (2005) *Elasticity, Theory, Applications & Numerics*. Boston: Elsevier Academic Press.
- Santare M. H. ve Lambros J.** (2000, December). Use of Graded Finite Elements to Model the Behavior of Nonhomogeneous Materials. *Journal of Applied Mechanics*, 819-822.
- Witvrouw A. ve Mehta A.** (2005). The Use of Functionally Graded pily-SiGe Layer for MEMS Applications. *Functionally Graded Materials VIII Materials Science Forum*, 490-493, pp. 255-60.
- Yang Q., Gao C., Chen W.** (2009). Stress Analysis of a Functional Graded Material Plate with a Circular Hole. *Arch. Appl. Mech.*, 80, 895-907.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Bekir KARAHALİL

Doğum Yeri ve Tarihi: Nazilli/27.03.1986

Adres: -

E-Posta: bekir_karahalil@hotmail.com

Lisans: İstanbul Üni. Makine Mühendisliği Bölümü(2005-2009)

Yüksek Lisans : İ.T.Ü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Konstrüksiyon Programı (2009-)