169765

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI VE FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

Tezi Hazırlayan
Recep GÜNEŞ

Tezi Yöneten
Prof.Dr. Mustafa Kemal APALAK

169765

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Şubat 2005
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATMANLI VE FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

Tezi Hazırlayan
Recep GÜNEŞ

Tezi Yöneten
Prof.Dr. Mustafa Kemal APALAK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Bu çalışma Araştırma Projeleri Birimi tarafından 01-012-26 ve FBT-03-32 nolu projeler kapsamında desteklenmiştir

Şubat 2005
KAYSERİ

Bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

16/02/2005

JÜRİ :

Üye : Prof.Dr. İbrahim UZMAY

Üye : Prof.Dr. M.Baki KARAMIŞ

Üye : Prof.Dr. M.Kemal APALAK

Üye : Doç.Dr. Ömer EYERCİOĞLU

Üye : Doç.Dr. Sedat ÖZDEN

ONAY :

Bu tezin kabülü Enstitü Yönetim Kurulunun ...22-02-2005. tarih ve .....0....21..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

30 MART 2005

Enstitü Müdürü
Mühür ve İmza
Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Müdür

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda maddi ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. M. Kemal Apalak'a, tez izleme komitesi üyeleri değerli hocalarım Prof. Dr. İbrahim Uzmay ve Doç. Dr. Sedat Özden'e, tezin yazımında yardımcı olan sayın Arş. Gör. Mustafa Yıldırım'a teşekkür ederim. Ayrıca tüm bu yorucu çalışmalar sırasında bana destek olan eşime, aileme ve tüm arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

ÇOK KATMANLI VE FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

ÖZET

Çok katmanlı ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar genellikle seramik-metal esaslıdırlar ve yüksek sıcaklık uygulamalarında ısıl bariyer olarak kullanılırlar. Çok katmanlı plakalarda kalınlık boyunca malzeme kompozisyonundaki değişim katmandan katmana kademeli olurken, fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda malzeme kompozisyonu kalınlık boyunca sürekli olarak değişir. Malzeme kompozisyonundaki bu sürekli değişim fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katmanları arasında daha düşük artık gerilmelerin oluşmasını sağlar.

Bu tez çalışmasında, öncelikle farklı sıcaklık alanlarına maruz çok katmanlı plakalardaki ısıl artık gerilme analizleri Klasik Plaka Teorisi kullanılarak yapıldı. Plakanın gerilme ve şekil değiştirme davranışı üzerinde kompozisyonel gradyant ve katman sayılarının etkisi de araştırıldı. Daha sonra üç boyutlu katmanlı sonlu eleman tipiyle modellenmiş olan, farklı malzeme bileşenlerine sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üniform, lineer ve parabolik sıcaklık yükleri altındaki ısıl artık gerilme analizlerine dayanarak, en küçük ısıl artık gerilme dağılımını sağlayan optimum malzeme kompozisyonu belirlendi.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin bir uygulaması olarak; Yapısal ve ısıl yüklere maruz, yapıştırıcıyla birleştirilmiş, fonksiyonel kademelendirilmiş, tek bindirme ve tüp bağlantıların gerilme davranışları incelendi. Yapılan analizlerde, yapıştırıcı bağlantısını oluşturan plakaların malzeme kompozisyonu ve katman sayılarının, bağlantının gerilme durumu üzerindeki etkileri belirlendi. Bununla birlikte, plakalar ve yapıştırıcı tabakası arasında oluşan gerilme süreksizliklerinin en küçük olduğu bağlantı kompozisyonu tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler; ısıl artık gerilmeler; fonksiyonel kademelendirilmiş bindirme bağlantılar; katmanlı sonlu eleman.

THERMAL RESIDUAL STRESS ANALYSIS OF MULTI-LAYERED AND FUNCTIONALLY GRADED COMPOSITE PLATES

ABSTRACT

Multi-layered and functionally graded plates are usually composed of ceramic and metal phases and are designed for high-temperature applications as a thermal barrier. Multi-layered plate has a stepwise variation of material composition through the layers whereas the functionally graded material has a continuous material composition through the plate thickness. This continuous material composition allows us to achive a lower and smooth thermal residual stress distribution through the thicknees of the functionally graded plates.

In this study, the thermal residual stress analysis of the multi-layered plates subjected to various thermal fields was carried out based on the Classical Plate Theory. The effects of the compositional gradient and the number of layers on the stress and deformation states of the plate were also investigated. Then, the thermal residual stress analysis of the functionally graded plates modelled using the 3D layered finite elements was carried out under uniform, linear and parabolic temperature distributions and optimum material composition, which results in minimum residual stress distribution in the plates, was determined.

As the case studies, the stress states of the adhesively bonded functionally graded single lap and tubular joints were investigated for structural and thermal loads. In the analysis, the effects of compositional gradient and number of layers of the adherends on the stress states of the adhesive joints were investigated. In addition, material composition direction providing a minimal stress discontinuities along the adherend-adhesive interfaces was determined.

Keywords: Functionally graded materials; thermal residual stresses; functionally graded lap and tubular joints; layered finite element.

İÇİNDEKİLER

ONAY I

TEŞEKKÜR II

ÖZET III

ABSTRACT IV

İÇİNDEKİLER V

ŞEKİL LİSTESİ VIII

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Konu ve Önemi 1

1.2 Amaç 3

1.3 Kapsam 4

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 6

2.1 Giriş 6

2.2 Literatür Araştırması 6

BÖLÜM 3

ÇOK KATMANLI PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ 12

3.1 Giriş 12

3.2 Analitik Çözüm 13

3.2.1 Çok Katmanlanmış Plakalar İçin Klasik Katmanlanmış Plaka Teorisi . 14

3.2.2 Nümerik Sonuçlar 16

3.3 Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözüm 20

3.3.1 Klasik Katmanlanmış Plaka Teorisinin Sonlu Elemanlar Metoduna Uygulanması 20

3.3.2 Nümerik Sonuçlar 22

3.4 Sonuçlar 25

BÖLÜM 4

FARKLI SICAKLIK ALANLARINA MARUZ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ 27

4.1 Giriş 27

4.2 Bünye İlişkileri 27

4.3 Sonlu Elemanlar Formülasyonu 31

4.3.1 Çok Katmanlı 3B İzoparametrik Sekiz-düğüm Noktalı Sonlu Eleman . 32

4.3.2 Şekil değiştirme-Yer değiştirme İlişkileri 33

4.3.3 Gerilme-Şekil değiştirme İlişkileri 35

4.3.4 Rijitlik Matrisi Formülasyonu 36

4.3.5 Isıl Yük Vektörü 36

4.4 Nümerik Sonuçlar 37

4.4.1 Üniform Sıcaklık Dağılımı 39

4.4.1.1 Kompozisyonel Gradyantın "n" Etkisi 43

4.4.2 Lineer Sıcaklık Değişimi 53

4.4.3 Parabolik Sıcaklık Değişimi 57

4.5 Sonuçlar 58

BÖLÜM 5

YAPISAL YÜKLERE MARUZ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ TEK BİNDİRME BAĞLANTILARININ GERİLME ANALİZİ 60

5.1 Giriş 60

5.2 Fonksiyonel Kademelendirilmiş Tek Bindirme Bağlantısının Çekme Analizi 61

5.2.1 Teorik Model 61

5.2.2 Gerilme Analizi 63

5.2.3 Katman Sayısının Etkisi 77

5.2.4 Kompozisyonel Gradyantın Etkisi 82

5.3 Üç Nokta Eğmeye Maruz Fonksiyonel Kademelendirilmiş Tek Bindirme Bağlantısının Gerilme Analizi 85

5.3.1 Teorik Model 85

5.3.2 Gerilme Analizi 86

5.3.3 Katman Sayısının Etkisi 96

5.3.4 Kompozisyonel Gradyantın Etkisi 100

5.3.5 Sonuçlar 102

BÖLÜM 6

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ TEK BİNDİRME BAĞLANTILARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ 104

6.1 Giriş 104

6.2 Teorik Model 104

6.3 Serbest Model (SŞ-I) 106

6.3.1 Katman Sayısının Etkisi 120

6.3.2 Kompozisyonel Gradyantın Etkisi 125

6.4 Sabitlenmiş Model (SŞ-II) 128

6.5 Sonuçlar 143

BÖLÜM 7

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ TÜP BAĞLANTILARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ 145

7.1 Giriş 145

7.2 Teorik Model 145

7.3 Serbest Model (SŞ-I) 148

7.4 Sabitlenmiş Model (SŞ-II) 165

7.5 Sonuçlar 177

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER 180

8.1 Sonuçlar 180

8.2 Öneriler 181

KAYNAKLAR 183

ÖZ GEÇMİŞ 191

ŞEKİL LİSTESİ

3.1 Çok katmanlı plaka [56]. 13

3.2 Bir Ni–TiO_2 çok katmanlı plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyant değerleri n için (a) metal faz hacimsel oranı V_m, (b) elastisite modülü E, (c) ısıl genleşme katsayısı α ve (d) Poisson oranı ν değişimleri (N=51)[56]. 14

3.3 Çok katmanlı plakada kompozisyonel gradyantın fonksiyonu olarak plaka orta-düzleminin şekil değiştirme miktarı ϵ^0 ve plaka eğriliğindeki κ değişimler (N= 51) [59]. 18

3.4 Plaka kalınlığı boyunca üniform, lineer ve parabolik sıcaklık dağılımlarına maruz çok katmanlı plakanın ısıl artık gerilme dağılımları (N=51) [56]. . 19

3.5 Eğrisel kabuk eleman geometrisi [59]. 21

3.6 Plaka kalınlığı boyunca üniform sıcaklık dağılımına maruz $Ni-TiO_2$ çok katmanlı plakanın ısıl artık gerilme dağılımları (N=51) [59]. 23

4.1 Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka 28

4.2 Bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyantlar n için (a) metal fazın hacimsel oranı V_m, (b) elastisite modülü E, (c) ısıl genleşme katsayısı α, ve (d) Poisson oranı ν değişimleri. 29

4.3 3B izoparametrik katmanlı 8-düğüm noktalı sonlu eleman. 32

4.4 Üniform sıcaklık alanına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki normal gerilme (a) σ_{11}, (b) σ_{22}, (c) σ_{33} ve kayma gerilmesi (d) σ_{12}, (e) σ_{23}, (f) σ_{13} dağılımları (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 40

4.5 Üniform sıcaklık alanına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki normal gerilme (a) σ_{11}, (b) σ_{22}, (c) σ_{33} ve kayma gerilmesi (d) σ_{12}, (e) σ_{23}, (f) σ_{13} dağılımları (n= 1.0) (Tüm gerilmeler MPa). 41

4.6 Üniform sıcaklık alanına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki normal gerilme (a) σ_{11}, (b) σ_{22}, (c) σ_{33} ve kayma gerilmesi (d) σ_{12}, (e) σ_{23}, (f) σ_{13} dağılımları (n= 10.0) (Tüm gerilmeler MPa). 42

4.7 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 45

4.8 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 46

4.9 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 47

4.10 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 49

4.11 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 50

4.12 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 51

4.13 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 54

4.14 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 55

4.15 (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa). 56

5.1 Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısı. 62

5.2 Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının mesh ayrıntıları. 62

5.3 (a) Yükleme şartı, (b) deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri. 63

5.4 Bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyantlar n için (a) metal fazın hacimsel oranı V_m, (b) elastisite modülü E, ve (c) Poisson oranı ν değişimleri. 64

5.5 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 68

5.6 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 69

5.7 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 70

5.8 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek bindirme bağlantısının bindirme bölgesinde bazı kritik noktalar. 71

5.9 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak). 72

5.10 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak). 74

5.11 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak). 75

5.12 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 78

5.13 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 79

5.14 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 80

5.15 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 83

5.16 (a) Üç nokta eğilme hali, (b) deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri. 85

5.17 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 88

5.18 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 89

5.19 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 90

5.20 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak). 93

5.21 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak). 94

5.22 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak). 95

5.23 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 97

5.24 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 98

5.25 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 99

5.26 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 101

6.1 Farklı kompozisyonel gradyantlarda Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca (a) metal fazın hacimsel oranı V_m, (b) elastiklik modülü E, (c) Poisson oranı ν ve (d) ısıl genleşme katsayısı α değişimleri. 105

6.2 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının (a) serbest (SŞ-I) ve (b) sabitlenmiş (SŞ-II) sınır şartları için deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri. 106

6.3 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 108

6.4 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde artık ısıl normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 109

6.5 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 110

6.6 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak). 114

6.7 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e). 116

6.8 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak). 117

6.9 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 121

6.10 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 122

6.11 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). 123

6.12 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). . 126

6.13 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 130

6.14 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde artık ısıl normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 131

6.15 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 132

6.16 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak). 135

6.17 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak). 137

6.18 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak). 138

6.19 Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa). . 141

7.1 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantı. . 146

7.2 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının sonlu elemanlar modeli. 147

7.3 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri a) SŞ-I ve b) SŞ-II. . . . 148

7.4 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde dış tüp, yapıştırıcı tabakası ve iç tüpün kalınlıkları boyunca gerilme değişimlerinin değerlendirildiği kritik noktalar (Tüm ölçüler mm ve derece). 149

7.5 Üniform sıcaklık yüküne maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının SŞ-I için a) dış tüp, b) yapıştırıcı tabakası ve c) iç tüp bindirme bölgelerinde artık ısıl von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları (n= 0.1, k= 60) (Tüm gerilmeler MPa). 151

7.6 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-I'e maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60) (Tüm gerilmeler MPa). 152

7.7 SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde katman sayısının (k= 20, 40, 60, 100 ve 200) etkisi. (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa). 154

7.8 SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde katman sayısının (k= 20, 40, 60, 100 ve 200) etkisi. (n= 1.0) (Tüm gerilmeler MPa). 155

7.9 SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde katman sayısının (k= 20, 40, 60, 100 ve 200) etkisi. (n= 10.0) (Tüm gerilmeler MPa). 156

7.10 SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı k= 60) (Tüm gerilmeler MPa). 158

7.11 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-I'e maruz SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60). 161

7.12 SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı k= 60) (Tüm gerilmeler MPa). 163

7.13 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-I'e maruz MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60). 165

7.14 MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı k= 60) (Tüm gerilmeler MPa). 166

7.15 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının a) dış tüp, b) yapıştırıcı tabakası ve c) iç tüp bindirme bölgelerinde artık ısıl von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları (n= 0.1, k= 60) (Tüm gerilmeler MPa). 168

7.16 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60). 170

7.17 SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-II için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k=60$) (Tüm gerilmeler MPa). 172

7.18 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları ($n=0.1$, $k=60$). 173

7.19 SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-II için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k=60$) (Tüm gerilmeler MPa). 174

7.20 Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları ($n=0.1$, $k=60$). 175

7.21 MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-II için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa). 176

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Konu ve Önemi

Doğadaki homojen olmayan malzemelerin gelişimi yeni bir olay değildir. Kemikler, deniz kabukları, bambu v.s. bu tip malzemelerin sayısız uygulamalarından sadece bir kaçıdır [1]. Örneğin bambu kabukları dış yüzeyine yakın kısımlarda yüksek mukavemet, iç kısımlarda ise yumuşaklık ve dayanıklılık özelliğine sahiptir. Buna ilaveten, bambu düşük ağırlık, mukavemet ve elastiklik gibi üstün özelliklere de sahiptir. Doğada homojen olmayan malzemeler genellikle malzeme tipleri içindeki belli nesnelerin kademelendirilmesiyle, malzeme özelliklerinin kademelendirilmesi şeklinde ortaya çıkarlar. Bu kademelendirme istenen çevresel ve yükleme şartlarına en uygun malzemeyi elde etme çabasının bir sonucudur. İnsanlar, alaşımları, yarı-iletkenleri ve kompozitleri geliştirerek malzemelerin faydalılığını artırma çabası içerisindedirler. Ancak, bu çabaların her biri malzemelerin tüm potansiyelini kullanmaya yetmemektedir. Herhangi bir arayüzde genel bir problem meydana gelmektedir. Yapıya yük tatbik edildiğinde, iki farklı malzeme arasındaki arayüzde yoğunlaşmış gerilmeler meydana gelmektedir. Bundan dolayı, arayüz bölgesi çatlama ve ardından gelen kırılma için en hassas bölgedir. Homojen olmayan malzeme kullanılarak, kazançları en yüksek seviyeye çıkarmak mümkündür. Farklı malzemeler arasında keskin bir arayüz yerine dengeli bir geçiş istenir. İki ya da daha fazla malzeme arasında bu dengeli geçişi sağlayan malzemeler Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzeme (*Functionally Graded Material = FGM*) olarak adlandırılır [2].

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler kavramı ilk olarak 1984 yılında Japonya'nın Sendai bölgesindeki Ulusal Havacılık Laboratuarlarında Niino ve

arkadaşları tarafından fizyon reaktörlerinde ve uzay araçlarında ısıl bariyer olarak kullanılmak üzere önerildi. Uzay gemisinin gövdesi çok yüksek sıcaklıklara (yaklaşık 1700°C) maruz kalır. Sonuç olarak, uzay gemisinin içi ve dışı arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle oluşan kötü koşullara dayanabilecek üniform bir malzeme yoktu. Araştırmacılar, düzgün bir şekilde değişen kompozisyon gösteren ve ısıl dayanımı ve mekanik özellikleri iyi olan bir malzemeyi imal etmek için fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin konseptini tasarladılar. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeyi seramik ve yüksek ısı iletkenliğine sahip bir malzeme ile imal etmeyi düşündüler. Seramik, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyde, diğer malzemede iç yüzeyde kullanılacaktı. 1987'de fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme araştırmaları Eğitim ve Bilim Bakanlığı tarafından desteklenmek üzere seçildi. 1987'den 1991'e kadar araştırma projesi "Isıl gerilme analizi için Fonksiyonel Kademelendirilmiş Malzeme geliştirme araştırması" olarak isimlendirildi ve çeşitli üniversitelerden birçok araştırmacı ve araştırma enstitüleri bunda rol aldı. Projede yoğun olarak malzeme geliştirme metotları tartışıldı ve malzeme tasarımını içeren bir işbirliği sistemi kuruldu. İlk uluslararası konferans Sendai şehrinde 1990 yılında yapıldı. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme, 1992'de Japonya'daki 10 gelişmiş teknolojiden biriydi. Sonuç olarak, FGM teknolojisi çok önemli bir teknolojidir ve sadece ulusal değil global seviyede dikkatleri üzerine çekmektedir [3].

Fonksiyonel olarak kademelendirilmiş yapılar, iki ya da daha fazla yapıdan oluşan ve bileşimin hacimsel oranlarının sürekli olarak belirli ölçülerdeki bir pozisyonun fonksiyonu olarak değiştiği ve gerekli olan bir işlevi yerine getiren yapılardır.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler henüz çok yeni olmalarına rağmen uygulamada pek çok kullanım alanına sahiptirler. Bu tip yapıların en yaygın kullanılanları metal-seramik esaslı olanlarıdır. Bunlar, yüksek sıcaklık ve kırılma dayanımlarıyla makine takımlarında, yüksek aşınma ve oksidasyon dirençleriyle havacılık ve otomotiv parçalarında ve yüksek balistik verimlilikleriyle hafif zırh malzemelerinde yaygın olarak kullanılırlar. Örneğin, seramik oranının fazla olduğu yüzey yüksek aşınma direnci sağlarken metal oranının yüksek olduğu yüzey sertlik ve mukavemet sağlayacaktır. Yani, bu tür malzemeler yüksek aşınma direnci ve mukavemeti aynı anda sunabildiğinden tribolojik uygulamalar için son derece

uygundurlar. Balistik uygulamalar için de bu tip malzemeler tercih edilir. Seramik oranının fazla olduğu yüzey yüksek sertliği sayesinde fırlatılan mermiyi durdurmada üstünlük sağlarken metal oranının fazla olduğu yüzey ise bütünlüğü korumak amacıyla seramik yüzeyin altında sert ve mukavim bir yapı teşkil eder. Yani, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler yüksek balistik verimlilikleriyle seramik tuğlalar gibi tek katmanlı çarpma uygulamalarının tersine çok katmanlı çarpma uygulamalarında kullanılabilirler [4].

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin önemli uygulama alanlarından birisi de yüksek sıcaklığa maruz ortamlardır. Bu malzemeler yüksek sıcaklığa maruz fırınlarda, roket lülelerinde ve havacılık sanayinde ısıl bariyer olarak kullanılmaktadırlar. Örneğin, yüksek sıcaklık uygulamalarında ısıl bariyer olarak kullanılan plakalar seramik-metal karışımından oluşurlar. Bileşim seramikçe zengin yüzeyden metalce zengin yüzeye doğru değiştirilir. Hacimsel oranlardaki bu değişim isteğe göre ayarlanabilir. Malzemenin seramik olan tarafı, seramiğin düşük ısı iletkenliği nedeniyle yüksek sıcaklığa direnci sağlayacaktır. Malzeme özelliklerindeki sürekli değişim farklı uygulamalar ve çalışma şartlarına göre yapılabilir. Bu sebepten dolayı fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler pek çok uygulamada tercih edilir [5].

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin mikro yapısındaki sürekli değişim, bu malzemeleri, ara yüzeyde mekanik özellikler bakımından uyumsuz olan fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerden ayırır. Isıl yüke maruz klasik kompozit malzemelerde, muhtemel çatlak ara yüzeylerde başlayacak ve zayıf olan malzeme kesiti içerisinde ilerleyecektir. İlave olarak, kompozit malzemeyi oluşturan fiber ve matris malzemenin farklı ısıl genleşme katsayıları nedeniyle ısıl artık gerilmelerde ortaya çıkacaktır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde bileşenlerin hacimsel oranlarının sürekli olarak değişmesi nedeniyle ısıl genleşme uyumluluğu sağlanır ve ısıl gerilmelerin doğuracağı olumsuz neticeler azaltılmış olur [5].

1.2 Amaç

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (Functionally Graded Materials= FGMs) belirli bir pozisyonda malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği

yapılar olarak tanımlanırlar. Genellikle seramik-metal bileşiminden oluşan bu malzemeler kötü çalışma şartlarına sahip uygulamalar için son derece uygundurlar. Örneğin, ağır aşındırıcı parçaların taşınmasında aşınmaya karşı astar olarak, roket ısı koruyucularında, ısı değiştirici tüplerde, termoelektrik jeneratörlerde, ısı motoru parçalarında, füzyon reaktörlerinin koruyucu yüzeylerinde ve elektrik yalıtımında kullanılabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler, seramik-metal bağlantıların arayüzeylerinde termo-mekanik uyumsuzlukların azaltıldığı ideal yapılardır ve böylece yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan yapılarda oluşan artık gerilmeleri de azaltabilirler. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdeki ısıl gerilmeler kompozisyonel ve mikro-yapısal dağılımın kontrol edilmesiyle azaltılabilir. Yine de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çoğu kompozisyonundaki sürekli makroskopik değişimler nedeniyle ısıl artık gerilmelere sahiptirler ve bu artık gerilmeler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin mekanik özelliklerini de etkiler. Bu nedenle, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerdeki artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımlarını kompozisyonel gradyantın, sıcaklık dağılımı tipinin, malzeme bileşenlerinin özelliklerinin ve katman sayısının bir fonksiyonu olarak anlamak ve tahmin etmek oldukça önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde meydana gelen artık gerilmeler üzerinde yukarıda bahsedilen faktörlerin etkisini tespit etmek ve buna bağlı olarak da amaca uygun optimum malzeme tipini belirlemektir.

1.3 Kapsam

Bu tez çalışmasında, öncelikle çok katmanlı plakalardaki ısıl artık gerilme analizleri analitik olarak klasik plaka teorisi kullanılarak yapıldı. Daha sonra sonlu elemanlar metodu kullanılarak yine aynı analizler yapıldı ve elde edilen neticeler analitik neticeler ile mukayese edildi ve sonuçların uyumlu olduğu görüldü. Sonlu elemanlar metodunun güvenilir neticeler verdiği test edildikten sonra yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan seramik-metal esaslı fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üç boyutlu elastisite teorisi temelinde sonlu elemanlar metodu kullanılarak farklı sıcaklık alanlarındaki ısıl artık gerilme analizleri yapıldı ve en düşük artık gerilmelere sahip optimum FGM tipi belirlendi.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin uygulaması olarak, yapısal yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantılarının gerilme durumları analiz edildi. Son olarak da ısıl yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme ve tüp bağlantıların artık gerilme analizleri yapıldı. Her iki ısıl ve yapısal yükler altında gerilme halleri karşılaştırıldı. Sonlu elemanlar analizi için [1]ANSYS™ paket programı kullanıldı.

Bu çalışma yedi bölüm içermektedir. Bölüm 1'de çalışma konusu ve önemi izah edildikten sonra çalışmanın amacı ve kapsamı anlatılmıştır. Bölüm 2'de çok katmanlı ve fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ile ilgili literatür özetlenmiştir. Bölüm 3'de çok katmanlanmış plakalarda ısıl artık gerilmelerin analizi, Bölüm 4'de farklı sıcaklık alanlarına maruz fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl artık gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5'de fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin bir uygulaması olarak; fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantılarının yapısal yükler altındaki gerilme durumları incelenmiştir. Bölüm 6'da fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme ve tüp bağlantıların farklı uç şartlarındaki ısıl artık gerilme analizleri yapılmıştır. Sonuçlar ve öneriler Bölüm 7'de verilmiştir.

[1]ANSYS™ The General Purpose Finite Element Software, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, Texas.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Giriş

Katmanlı kompozit plakalar yüksek mukavemetleri ve yüksek rijitlikleri nedeniyle bir çok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılırlar. Ancak, katmanlardaki malzeme özelliklerinin ani olarak değişmesi nedeniyle arayüzeylerde yüksek gerilmeler meydana gelir ve bu gerilmeler de katmanlar arasında ayrılmalara neden olur. Bu olumsuz etkiler fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler (FGM) kullanılarak azaltılabilir ya da ortadan kaldırılabilir. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler sahip oldukları üstün özellikler nedeniyle son yıllarda bir çok araştırmacının çalışma konusu olmuştur. Bu bölümde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ile ilgili olarak yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

2.2 Literatür Araştırması

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ilk olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında ısıl bariyer olarak düşünülüp tasarlanmışlardır. Bu nedenle, ısıl yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerden oluşan yapıların sıcaklık dağılımları ve ısıl gerilme analizleri ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır [6]. Bu malzemelerin üretimleri ve kullanımları esnasında maruz kaldıkları yüksek sıcaklıklar nedeniyle bünyelerinde ısıl artık gerilmeler meydana gelir. Genellikle, yüksek sıcaklıklarda gerilmesiz olarak üretilen fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler üretim sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulduklarında ısıl artık gerilmeler meydana gelir. Isıl yüklere maruz kalacak olan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların tasarımı yapılırken üretimi esnasında oluşabilecek artık gerilmelerin dikkate alınması gerekir. Eğer üretim kademelerinde bu durum

dikkate alınmazsa tasarım boyutları ve şekli uygun olmayabilir ve böylece üretilen eleman güvenli olmaz. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin gerek üretimleri gerekse kullanımları esnasında oluşan bu ısıl artık gerilmelerin tespiti ve azaltılması FGM araştırmalarının temel konusu olmuştur [7].

Malzeme gradyantındaki değişim bir FGM yapının özelliklerinin belirlenmesinde en önemli faktördür. Yani, malzeme kompozisyonundaki değişim FGM'nin termo-mekanik davranışını da ciddi bir şekilde etkilemektedir [8]. Bu nedenle, malzeme kompozisyonunun ısıl artık gerilmeler üzerindeki etkileri hem elastik hem de elastik-plastik şartlarda araştırılmıştır. Ancak gerilme problemlerinin analitik olarak çözülebilmesi için malzemenin mekanik özelliklerinin bir pozisyona göre değişimlerinin karmaşık etkileri çoğu problemlerde dikkate alınmamıştır. Bu durum problemlerin analitik olarak çözülebilmesi için gereklidir. Modelin basitleştirilmesi için analitik çalışmalar genellikle FGM'lerin bir boyutlu elastik gerilme analizleriyle sınırlıdır [9, 10, 11].

Elastik deformasyonlara maruz fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerde bir boyutlu hareket ve ısı transferi denklemlerinin analitik olarak çözülebilmeleri oldukça zordur. FGM çalışmalarında genel olarak dört çeşit analitik metot kullanılmıştır. Birinci tipte malzemeler çok katmanlı elemanlar ile tariflenir ve her bir elemandaki malzeme özellikleri sabit kabul edilir ya da basit bir fonksiyonla tanımlanır. Bu metot genellikle Tanigawa'nın grubu tarafından kullanılmıştır [12, 13]. İkinci tipte malzeme özelliklerinin üstel fonksiyonlar [14] ve güç fonksiyonlar [15, 16] gibi uygun bir fonksiyon ile tariflendiği kabul edilmiştir. Üçüncü tip ise Noda'nın grubu tarafından kullanılan perturbasyon (perturbation) metodudur [6, 17]. Dördüncü tip ise Green fonksiyonu yaklaşımıdır [18]. Daha genel iki boyutlu [19-23] ve üç boyutlu [24, 25] problemler için sonlu elemanlar metodu gibi sayısal metotlara ihtiyaç vardır.

Seramik-metal fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler hem makroskopik hem de mikroskobik olarak heterojendirler. Makroskopik olarak heterojen olması demek seramik yüzeyden metal yüzeye doğru bir malzeme kompozisyonunun kademeli olarak değişmesidir. Mikroskobik heterojenlik ise fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çeşitli hacimsel oranlardaki seramik ve metal fazların karışımından

yapılmış olmalarındandır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerden oluşan yapıların ısıl gerilmeleri bazı araştırmacılar tarafından makromekanik [4, 26] ve mikromekanik [27-30] yaklaşımlar kullanılarak incelenmiştir. Bununla beraber, her iki fazın da elastik olmayan deformasyonlarında, özellikle bu iki yaklaşımın birlikte kullanılması daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar [31, 32].

Yapılan çalışmalarda FGM'lerin etkili malzeme özelliklerinin belirlenmesinde genel olarak üç tip mikromekanik yaklaşım kullanılmıştır. Birincisi karışım kuralı (rule of mixture) modeli, ikincisi ortalama-alan mikromekanik modelleri (mean-field micromechanics) ki bunlar Mori-Tanaka ve Wakashima-Tsukamoto şemalarıdır, sonuncusu ise Self-consistent mikromekanik modelidir. Karışım kuralı modelinde [20, 23, 33] kademelendirilmiş bölgedeki her bir alt katmanın izotropik olarak davrandığı kabul edilmiştir. Partikül takviyeli kompozitlerde kullanılan ortalama-alan mikromekanik modelleri Mori-Tanaka [34, 35] ve Wakashima-Tsukamoto [36] şemalarında kademelendirilmiş bölge mikroyapısının üniform sürekli matris yapı içerisinde rastgele dağılmış partikül fazdan oluştuğu kabul edilir. Self-consistent [37] mikromekanik modelde ise, matris ve takviye elemanların simetrik oldukları kabul edilir ve aynı ortalama modüller matris ve takviye elemanların rollerinin değiştiği başka bir kompozit malzeme içinde kullanılır. Bu metot, özellikle iskelet mikroyapılar için oldukça uygundur. Ancak, Self-consistent, metot hacimsel oran ve rijitlik arasında açık bir ilişki kuramadığı için uygulamada zorluklara neden olur [8]. Vel ve Batra [38], çalışmalarında etkili malzeme özelliklerinin hesaplanmasında, hem Mori-Tanaka hem de Self-consistent şemalarını kullandılar ve sonuç olarak Mori-Tanaka metodunun Self-consistent şemasından daha kolay uygulanabilir olduğunu gösterdiler. Son olarak, Li ve Wang [39] kompozit malzemelerin ortalama malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan mikromekanik yaklaşımlar hakkında ayrıntılı bir araştırma sundular. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin etkili malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan tüm bu ortalama metotlar, basit ve kullanışlı olmalarına rağmen yapılan bazı kabuller nedeniyle gerçek sisteme göre elde edilen neticeler çok hassas olmadığı görülür.

Yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılan FGM'lerin geçici rejimdeki ısıl gerilme

dağılımları sürekli rejimdeki ısıl gerilmelere oranla daha büyük değerlere ulaşabilir. Bu durumda, geçici rejimdeki ısı transferi problemleri büyük öneme sahip olurlar. Bu konuda farklı yapısal modeller için iki boyutlu [14, 17] ve üç boyutlu [38] termoelastik problemler bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler üzerine yapılan çalışmaların çoğu ısıl gerilme analizleri ile ilgilidir. Bununla beraber, FGM yapılar kullanılma şartlarına göre burkulma ve titreşim yüklerine de maruz kalabilirler. Bu nedenle farklı yükleme ve sınır şartlarında FGM yapıların burkulma [25, 40, 41] ve titreşim [42, 43] davranışları da araştırılmıştır.

Son zamanlarda, Reddy ve arkadaşları mekanik ve ısıl yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların lineer-elastik analizleriyle ilgili çalışmalar yapmışlardır. Reddy ve arkadaşları [44] kalınlığı boyunca fonksiyonel olarak kademelendirilmiş dairesel plakaların eksenel-simetrik eğilme problemini, plakaların kayma deformasyonlarının modellenmesi için uygun olan Mindlin plaka teorisini kullanarak çözdüler. Bileşenlerin keyfi olarak değiştiği Mindlin plaka problemi için izotropik Kirchoff plaka çözümüne dayalı genel bir çözüm türettiler. Analizlerde, plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun ve sınır şartlarının deformasyonlar ve gerilmeler üzerindeki etkilerini de incelediler. Reddy [5] üçüncü dereceden kayma deformasyon teorisini kullanarak kalınlığı boyunca fonksiyonel olarak kademelendirilmiş plakaların genel formülasyonunu sundu ve ayrıca termomekanik ilişkiyi ve von Karman tipi geometrik lineersizlikleri dikkate alarak sonlu elemanlar modelini de geliştirdi. Reddy ve Cheng [35] basit olarak mesnetlenmiş dörtgen fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın üç boyutlu termomekanik deformasyonlarını asimptotik metot kullanarak incelediler. Çalışmalarında lokal malzeme özelliklerinin belirlenmesinde Mori-Tanaka şeması kullanıldı. Farklı hacimsel oranlardaki metal ve seramik bileşenler için sıcaklık, yer değiştirme ve gerilme değerleri hesaplandı ve elde edilen neticelerin doğruluğu iki boyutlu yaklaşık plaka teorisi ile elde edilen neticeler ile karşılaştırıldı. Son olarak, Reddy ve arkadaşları [45] fonksiyonel kademelendirilmiş kiriş yapıların termoelastik davranışlarını araştırmak için yeni bir kiriş sonlu elemanı geliştirdiler. Eleman, birinci dereceden kayma deformasyon teorisi temeline göre oluşturuldu

ve termoelastik özelliklerin kalınlık boyunca değiştiği kabul edildi. Sonlu elemanın doğruluğunu görmek için bir çok sayısal testler yaptılar.

Rao ve Rahman [46] iki boyutlu fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeden oluşan keyfi bir geometrinin sabit tek çatlaktaki gerilme yoğunluğu faktörlerini hesaplayan Galerkin temelli meshsiz metodu sundular. Bu metot, elemansız Galerkin metodunu kapsamakta ve burada malzeme özellikleri global koordinatların ve karışık-tarz kırılma analizi için yeni geliştirilmiş olan iki integralin düzgün fonksiyonları olarak tanımlanmıştır. Metodun doğruluğunu tekli kırık bulunan nümerik örneklerle test ettiler ve metodun çoklu kırık uygulamalarında da kullanılabileceği sonucuna vardılar.

Nemat-Alla [33] iki yönde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin ısıl gerilme davranışlarını araştırdı. Bu malzemelerin hacimsel oranlarını temsil eden uygun fonksiyonlar buldu. Böylece, bu fonksiyonları ve klasik FGM'lerin karışım kurallarını kullanarak iki yönlü FGM'ler için yeni karışım kuralı modelini geliştirdi. İki yönde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin iki boyutlu ve üç boyutlu ısıl yükler altındaki davranışlarını inceledi. Sonuç olarak, klasik FGM'lere oranla iki yönde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin daha düşük ısıl gerilmelere sahip olduğunu gördü.

Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalarda genel amaç, farklı şartlardaki FGM yapılarda meydana gelen gerilme ve deformasyonların en düşük seviyelerde olduğu optimum malzeme kompozisyonunu tespit edebilmektir. Bu amaçla araştırmacılar farklı optimizasyon yöntemleri kullanarak bu çalışmaları yapmışlardır [12, 13, 47, 48]. Böylece daha verimli ve uzun ömürlü olarak işlevlerini yerine getirebilen FGM yapılar tesbit edilmiş olur. Huang ve arkadaşları [49] fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin çift amaçlı optimizasyonu için bir volan örneği üzerinde çalıştılar. Optimizasyon yöntemi ve geometrik temsil için parametrik bir formülasyon kullandılar. Sonuç olarak arzu edilen performansı sağlayacak olan optimum hacimsel orana ve geometrik tasarıma sahip modeli tespit ettiler.

Son zamanlarda, fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerden oluşan yapıların ısıl ve mekanik yükler altındaki lineer olmayan analizleri ile ilgili çalışmalarda

yapılmıştır. İlk olarak, Praveen ve Reddy [50] sıcaklık dağılımı ve yanal yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş seramik-metal plakaların lineer olmayan statik ve dinamik analizlerini sonlu elemanlar metodunu kullanarak yaptılar. Woo ve Meguid [51] sıcaklık ve yanal yüklere maruz, ince kabuklar ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların büyük yer değiştirmeleri konusunda bir analitik çözüm sundular. Temel denklemlerin teşkilinde von Karman teorisini kullandılar. Shen [52] ısıya ve yanal yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların lineer olmayan eğilme analizlerini, Reddy'nin yüksek mertebeden kayma şekil değiştirme plaka teorisini kullanarak yapmıştır. Yang ve Shen [53] ince fonksiyonel kademelendirilmiş dörtgen plakalarda, yanal ve düzlemsel yükler neticesinde oluşan büyük yer değiştirmeleri, yarı analitik bir yaklaşım kullanarak incelediler. Ma ve Wang [54] klasik lineer olmayan von Karman Plaka teorisini kullanarak, fonksiyonel kademelendirilmiş dairesel plakaların mekanik, ısıl ve ısıl-mekanik yükler altındaki eksenel-simetrik büyük yer değiştirme eğilme ve burkulma davranışlarını araştırdılar.

Yapılan literatür araştırmasında, farklı sıcaklık alanlarına maruz fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların mekanik ve ısıl yükler altındaki gerilme davranışlarını inceleyen bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında bu konular ayrıntılı olarak incelenmiştir.

BÖLÜM 3

ÇOK KATMANLI PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

3.1 Giriş

Çok katmanlı plakalar (*Multi–Layered Plates = MLPs*), katmandan katmana kompozisyonel değişimin kademeli olduğu yapılardır. İlk ve son katmanlar sırasıyla seramik ve metalden, ara katmanlar ise seramik ve metalin belli oranlardaki karışımlarından oluşurlar.

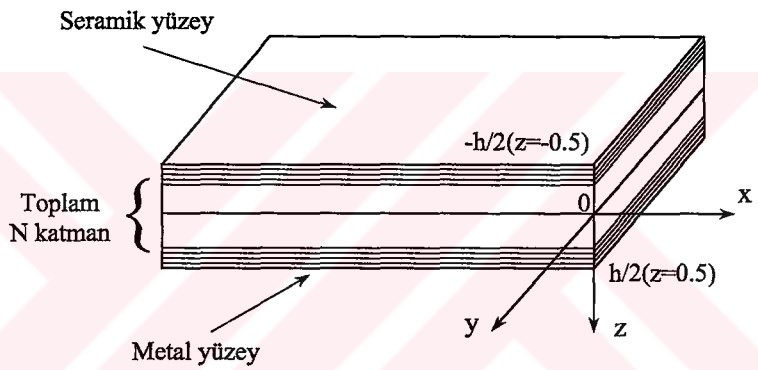
Seramik ve metalin ısıl ve mekanik özelliklerindeki uyumsuzluklar nedeniyle seramik/metal ara yüzeyinde ısıl yükler nedeniyle artık gerilmeler meydana gelebilir. Bu artık gerilmeler ise yapının performansını ve ömrünü etkiler hatta malzeme sisteminde çatlaklara sebep olabilir. Bu nedenle, çok katmanlı malzemelerdeki artık gerilmelerin büyüklüğünü ve dağılımını kompozisyonel gradyanta, bileşenlerin özelliklerine ve katman sayısına bağlı olarak anlamak ve tahmin etmek oldukça önemlidir.

Bu bölümde, soğumaya maruz çok katmanlı plakalarda oluşan ısıl artık gerilmeler incelendi. Artık gerilme problemi öncelikle analitik olarak klasik katmanlanmış plaka teorisiyle, sonra da sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözüldü. Böylece, her iki yaklaşımla yapılan çözümler mukayese edildi.

Yapılan analizlerde özellikle, kompozisyonel gradyantın, katman sayısının ve sıcaklık dağılımı tipinin artık gerilmeler üzerindeki etkileri incelendi. Bununla beraber, farklı tip malzeme bileşimlerinin de ısıl artık gerilmeler üzerindeki etkileri araştırıldı.

3.2 Analitik Çözüm

Çok katmanlı plakalarda, plaka kalınlığı boyunca üniform, lineer ve parabolik sıcaklık dağılımları neticesinde oluşan ısıl artık gerilme problemi incelendi. Analizlerde kullanılan metal (Ni) ve seramikten (TiO_2) oluşan çok katmanlı plakanın birim kalınlıkta ve $x-$ ve $y-$doğrultularında sonsuz olduğu kabul edilmiştir (Şekil 3.1). Çok katmanlı plakanın eşit kalınlıklarda katmanlara sahip olduğu ve kompozisyonun katmandan katmana kademeli olarak değiştiği varsayılmıştır. Ayrıca ilk ve son katmanların sırasıyla seramik ve metal oldukları kabul edilmiştir. Çok katmanlı sistemde, deformasyon ve katmanlar arası bağlantının mükemmel olduğu ve katmanlar arasında kayma olmadığı varsayılmıştır. Isıl artık gerilme analizinde,



Şekil 3.1: Çok katmanlı plaka [56].

üniform sıcaklık dağılımı için plakanın 1000°C'den 20°C'ye soğutulduğu kabul edildi. Lineer ve parabolik sıcaklık dağılımında ise plakanın ilk üst ve alt yüzey sıcaklıkları sırasıyla 1000°C ve 800°C alındı.

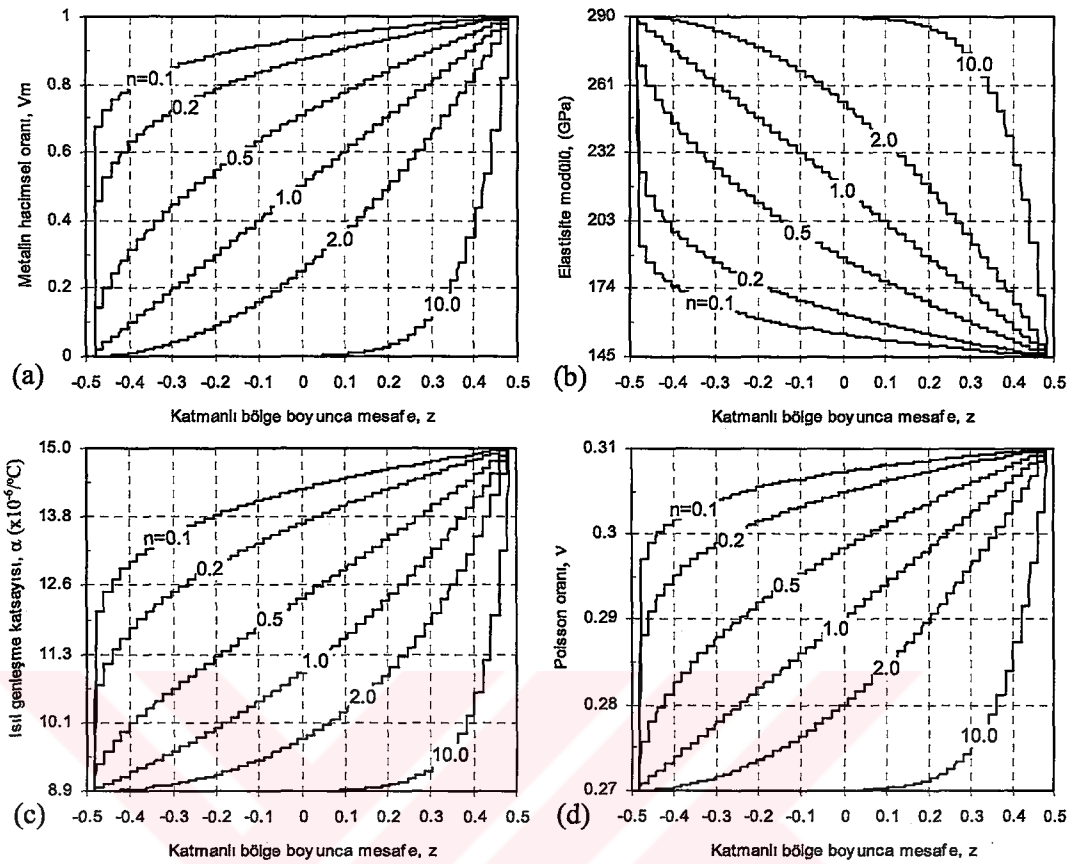
Malzeme kompozisyonu seramik yüzeyden ($z = -h/2$) metal yüzeye ($z = h/2$) değişmektedir. Seramik ve metalin hacimsel oranları arasındaki ilişki şu şekilde tariflenir;

$$V_m + V_c = 1 \tag{3.1}$$

j'inci katmandaki metal bileşenin hacimsel oranı aşağıdaki basit üstel bir denklem ile tariflenir [55];

$$[V_m]_j = \left(\frac{j}{N-1} - \frac{1}{N-1}\right)^n \tag{3.2}$$

burada, j: Şekil 3.1'de gösterilen plakanın j'inci katmanı, N: plakadaki toplam katman sayısı ve n: kompozisyonel gradyantı gösteren keyfi bir üstür. Farklı



Şekil 3.2: Bir Ni–TiO_2 çok katmanlı plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyant değerleri n için (a) metal faz hacimsel oranı V_m, (b) elastisite modülü E, (c) ısıl genleşme katsayısı α ve (d) Poisson oranı ν değişimleri (N=51)[56].

kompozisyonel gradyantlar için plaka kalınlığı boyunca metalin hacimsel oranındaki değişim Şekil 3.2(a)'da gösterilmiştir. Ni–TiO_2 çok katmanlanmış plakanın kalınlığı boyunca, farklı n değerleri için lineer karışım kuralıyla hesaplanmış olan elastisite modülü E, ısıl genleşme katsayısı α ve Poisson oranındaki ν değişimler sırasıyla Şekil 3.2b,c,d'de gösterilmiştir. Isıl ve mekanik özellikler katmanın kalınlığı boyunca sabit kalırken katmandan katmana kademeli olarak değişmektedir. Bu nedenle, 3.2'deki grafikler kademeli bir değişim göstermektedir.

3.2.1 Çok Katmanlanmış Plakalar İçin Klasik Katmanlanmış Plaka Teorisi

Seramik (TiO_2) ve metalden (Ni) oluşan çok katmanlanmış plakanın yüksek sıcaklıktan soğutulması neticesinde oluşan ısıl artık gerilmeler klasik katmanlanmış plaka teorisi vasıtasıyla analitik olarak hesaplanmıştır [57]. Klasik katmanlanmış

plaka teorisi şu kabulleri yapar: 1) katmanlar birbirleriyle mükemmel bağlıdır, 2) her katmanın malzemesi lineer olarak elastik ve malzeme simetrisi olan iki düzlem mevcuttur, 3) her katman eşit kalınlıktadır, 4) şekil değiştirme ve yer değiştirmeler küçüktür, 5) plakanın üst ve alt yüzeylerindeki enine kayma gerilmeleri sıfırdır [57].

Çok katmanlı plakanın j'inci katmanındaki ısıl artık gerilme şu şekilde tariflenir;

$$\{\sigma\}_j = \left[\bar{Q}\right]_j \cdot \{\varepsilon\}_j = \left[\bar{Q}\right]_j \cdot \left\{\left\{\varepsilon^0\right\} + z \cdot \{\kappa\} - \{\alpha\} \cdot \Delta T\right\} \tag{3.3}$$

burada, $\left[\bar{Q}\right]$: j'inci katmanın rijitlik matrisi, $\{\varepsilon\}$: ısıl artık şekil değiştirme, $\{\alpha\}$: katmanın z pozisyonundaki ısıl genleşme katsayısıdır. $\{\varepsilon^0\}$: plakanın orta düzleminin şekil değiştirme miktarı, $\{\kappa\}$: plaka eğriliği ve ΔT: sıcaklık farkıdır.

Gerilme vektörü

$$\{\sigma\} = \left\{ \begin{array}{c} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{array} \right\} \tag{3.4}$$

Aynı notasyon denklem (3.3)'deki ısıl artık şekil değiştirme, plaka orta düzleminin şekil değiştirmesi, plaka eğriliği ve ısıl genleşme katsayısı ifadeleri içinde kullanılır. Rijitlik matrisi

$$\left[\bar{Q}\right] = \left[\begin{array}{ccc} \bar{\mathrm{Q}}_{11} & \bar{\mathrm{Q}}_{12} & \bar{\mathrm{Q}}_{16} \\ \bar{\mathrm{Q}}_{12} & \bar{\mathrm{Q}}_{22} & \bar{\mathrm{Q}}_{26} \\ \bar{\mathrm{Q}}_{16} & \bar{\mathrm{Q}}_{26} & \bar{\mathrm{Q}}_{66} \end{array} \right] \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
\bar{\mathrm{Q}}_{11} &= \mathrm{Q}_{11}\mathrm{Cos}^4\theta + 2\left(\mathrm{Q}_{12} + 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}^2\theta\mathrm{Cos}^2\theta + \mathrm{Q}_{22}\mathrm{Sin}^4\theta \\
\bar{\mathrm{Q}}_{12} &= \left(\mathrm{Q}_{11} + \mathrm{Q}_{22} - 4\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}^2\theta\mathrm{Cos}^2\theta + \mathrm{Q}_{12}\left(\mathrm{Sin}^4\theta + \mathrm{Cos}^4\theta\right) \\
\bar{\mathrm{Q}}_{22} &= \mathrm{Q}_{11}\mathrm{Sin}^4\theta + 2\left(\mathrm{Q}_{12} + 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}^2\theta\mathrm{Cos}^2\theta + \mathrm{Q}_{22}\mathrm{Cos}^4\theta \\
\bar{\mathrm{Q}}_{16} &= \left(\mathrm{Q}_{11} - \mathrm{Q}_{12} - 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}\theta \cdot \mathrm{Cos}^3\theta + \left(\mathrm{Q}_{12} - \mathrm{Q}_{22} + 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}^3\theta\mathrm{Cos}\theta \\
\bar{\mathrm{Q}}_{26} &= \left(\mathrm{Q}_{11} - \mathrm{Q}_{12} - 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}^3\theta\mathrm{Cos}\theta + \left(\mathrm{Q}_{12} - \mathrm{Q}_{22} + 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}\theta \cdot \mathrm{Cos}^3\theta \\
\bar{\mathrm{Q}}_{66} &= \left(\mathrm{Q}_{11} + \mathrm{Q}_{22} - 2\mathrm{Q}_{12} - 2\mathrm{Q}_{66}\right)\mathrm{Sin}^2\theta\mathrm{Cos}^2\theta + \mathrm{Q}_{66}\left(\mathrm{Sin}^4\theta + \mathrm{Cos}^4\theta\right)
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Her katman izotropik özelliklere sahiptir ve sıfırdan farklı gerilme bileşenleri sadece σ_{xx} ve σ_{yy} $(= \sigma_{xx})$'dir. Denklem (3.3)'deki, plakanın orta düzlemindeki şekil değiştirmeler ve eğrilikler şöyle hesaplanır;

$$\left[\begin{array}{c} N^T \\ M^T \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cc} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{array} \right] \tag{3.7}$$

burada ısıl kuvvet ve moment sonuçları, sırasıyla;

$$\begin{aligned} \{N^T\} &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{z_j}^{z_{j+1}} \{\sigma^T\}_j \, dz \\ \{M^T\} &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{z_j}^{z_{j+1}} \{\sigma^T\}_j \, z dz \end{aligned} \tag{3.8}$$

burada

$$\{\sigma^T\}_j = [\bar{Q}]_j \{\alpha\}_j \Delta T \tag{3.9}$$

Plaka rijitlik matrisleri olan [A], [B] ve [D] sırasıyla şöyle tanımlanır;

$$([A], [B], [D]) = \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{z_j}^{z_{j+1}} [\bar{Q}]_j \, (1, z, z^2) \, dz \tag{3.10}$$

3.2.2 Nümerik Sonuçlar

Isıl gerilme analizleri, kompozisyonel gradyant ve katman sayısının ısıl artık gerilmeler üzerinde oldukça önemli etkilerinin olduğunu göstermiştir. Çok katmanlanmış plakayı oluşturan metal (Ni) ve seramik (TiO_2) malzemelere ait ısıl ve mekanik özellikler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Ni ve TiO_2'nin ısıl ve mekanik özellikleri.

Özellikler	**Bileşenler**	
	Ni	TiO_2
E (GPa)	145	290
α (10^{-6}/°C)	15	8.9
ν	0.31	0.27

Tablo 3.2'de kalınlık boyunca üniform sıcaklık değişimine maruz bir Ni–TiO_2 çok katmanlı plakanın N= 3, 6, 11, 51, 101, 200 ve 250 katman sayılarındaki orta düzleminin şekil değiştirme miktarları ve plakanın eğrilikleri n= 1.0 için gösterilmiştir. Plakanın orta düzlemindeki şekil değiştirme miktarının (ε^0) 51 katman sayısına kadar azaldığı, daha yüksek katman sayılarında hemen hemen aynı kaldığı görülürken, plaka eğriliğinin artan katman sayısıyla azaldığı görülmüştür (Tablo 3.2). Orta düzlemdeki şekil değişiminin plakadaki metal bileşenin miktarıyla ilişkili olduğu

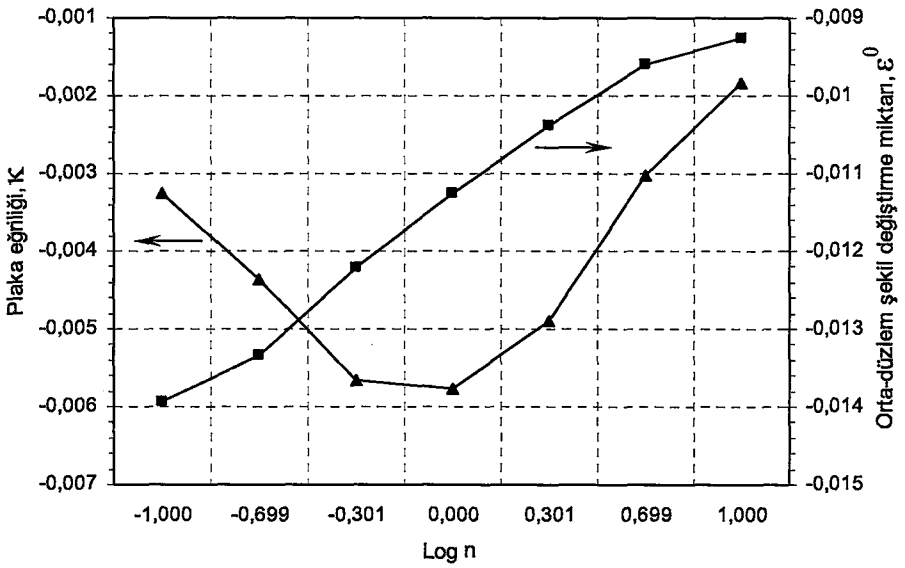
bilinmektedir. Dolayısıyla lineer kompozisyonel gradyantta (n= 1.0) plaka içindeki metal bileşen miktarının artan katman sayısıyla arttığı ve 51 katman sayısından sonra miktarda değişme olmadığı, bundan dolayı da, katman sayısı 51'i geçtikten sonra orta düzlem şekil değiştirme miktarının sabit kaldığı düşünülmektedir.

51 katmanlı bir plakanın orta düzlem şekil değiştirme miktarı (ε^0) ve plaka eğriliğinin (κ) kompozisyonel gradyanta göre değişimi Şekil 3.3'de görülmektedir. Kompozisyonel gradyant azaldıkça, ε^0 artmaktadır. Bunun nedeni ise n'in azalmasıyla çok katmanlı plaka içerisindeki metal bileşenin miktarının artmasıdır. Böylece soğuma esnasında plaka daha fazla büzülecektir. Buna ilave olarak, plakada en büyük eğrilik kompozisyonel gradyant lineer (n= 1.0) iken ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.3).

Tablo 3.2: Ni–TiO_2 çok katmanlı plaka sisteminde artak katman sayısına göre plaka eğrilikleri ve orta düzlem şekil değiştirme miktarları (n= 1.0)

Katman Sayısı	3	6	11	51	101	200	250
$\kappa(10^{-3})$	-7.773662	-6.686503	-6.214675	-5.765538	-5.705961	-5.676112	-5.669926
$\varepsilon^0(10^{-2})$	-1.1515	-1.1368	-1.131	-1.126	-1.1256	-1.125	-1.125

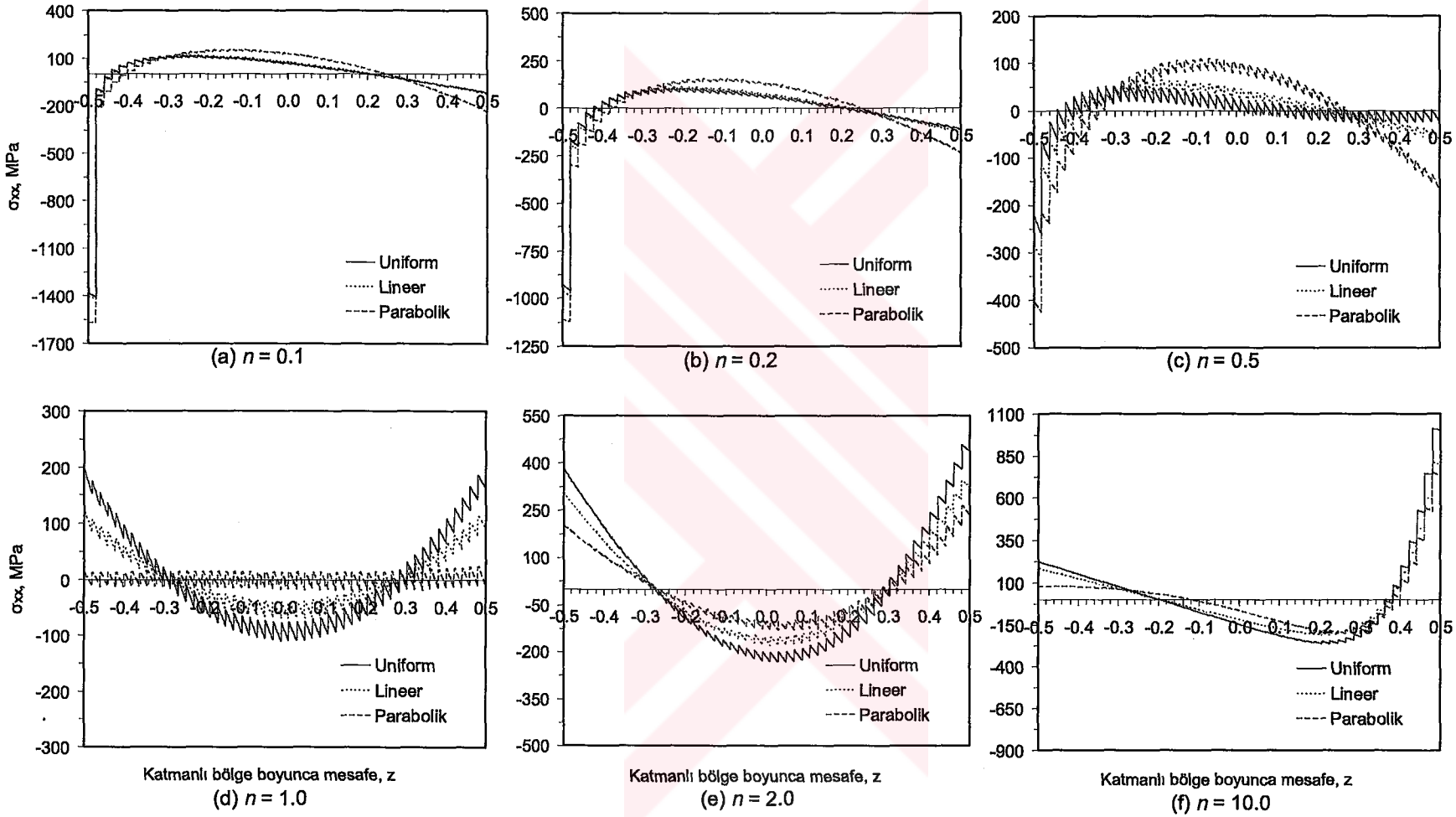
Şekil 3.4'de plaka kalınlığı boyunca üniform lineer ve parabolik sıcaklık dağılımlarına maruz 51 katmanlı plakanın farklı kompozisyonel gradyantlardaki ısıl artık gerilme dağılımları görülmektedir. n= 0.1 için, her üç sıcaklık dağılımında plakanın her iki yüzeyinde de basma gerilmeleri oluşmaktadır. Özellikle, seramikçe zengin yüzeyde oldukça yüksek basma gerilmeleri mevcuttur. Bununla beraber, plaka kalınlığının ortasında geniş bir bölgede düşük çekme gerilmeleri mevcuttur (Şekil 3.4a). n= 0.2 için, gerilme dağılımı n= 0.1 durumuyla benzer profile sahip iken değer olarak biraz daha düşüktür (Şekil 3.4b). n= 0.5 için, her üç sıcaklık dağılımında da gerilme profili yine n= 0.1 ve 0.2 durumlarıyla benzerken, değer olarak daha da düşüktür (Şekil 3.4c). n= 0.1, 0.2 ve 0.5 iken seramik ve metal yüzeylerdeki basma gerilmeleri ve plaka kalınlığının orta bölgesindeki çekme gerilmeleri parabolik sıcaklık dağılımı için en büyük değerlerdeyken üniform sıcaklık dağılımı için en küçük değerlerdedir. n= 1.0 için, üniform ve lineer sıcaklık dağılımlarında plakanın seramik ve metalce



Şekil 3.3: Çok katmanlı plakada kompozisyonel gradyantın fonksiyonu olarak plaka orta-düzleminin şekil değiştirme miktarı ϵ^0 ve plaka eğriliğindeki κ değişimler ($N = 51$) [59].

zengin yüzeylerinde çekme gerilmeleri oluşurken orta bölgelerde basma gerilmeleri oluşmaktadır. Parabolik sıcaklık dağılımında plakanın, kalınlığı boyunca hemen hemen sıfır artık gerilme değerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.4d). $n = 2.0$ için, her üç sıcaklık dağılımında da çok katmanlı plakanın metal ve seramikçe zengin yüzeylerinde çekme, orta bölgelerde ise basma gerilmelerinin olduğu görülmektedir (Şekil 3.4e). Gerilme değerleri özellikle üniform sıcaklık dağılımında en büyük sınırlardadır. $n = 10.0$ olduğunda, $n = 2.0$ durumuna göre seramik yüzeydeki çekme gerilmesi değerinin azaldığı metal yüzeydeki çekme gerilmesi değerinin ise yaklaşık olarak iki katı arttığı görülmektedir. En büyük gerilme değerleri yine üniform sıcaklık dağılımında ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.4f). $n < 1$ iken ve parabolik sıcaklık dağılımında çok katmanlı plakanın her iki yüzeyinde de en büyük artık basma gerilmeleri oluşurken, $n \geq 1.0$ olduğunda üniform sıcaklık dağılımı için plakanın her iki yüzeyinde de en büyük artık çekme gerilmeleri oluşmaktadır. En küçük ısıl artık gerilme $n = 1.0$ iken parabolik sıcaklık dağılımında meydana gelmektedir.

Çok katmanlı plakaların ısıl gerilme analizleri, katmanlar arasında gerilme süreksizliklerinin olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni, katman kalınlığı boyunca ısıl ve mekanik özelliklerin sabit kalıp katmandan katmana kademeli olarak değişmesidir. Farklı kompozisyonel gradyantlar için yapılan ısıl gerilme analizlerinde katmanlar



Şekil 3.4: Plaka kalınlığı boyunca üniform, lineer ve parabolik sıcaklık dağılımlarına maruz çok katmanlı plakanın ısıl artık gerilme dağılımları (N=51) [56].

arası gerilme süreksizliklerinin farklı davranışlar sergilediği görülmüştür (Şekil 3.4). Özellikle $n < 1.0$ iken seramikçe zengin bölgedeki katmanlar arası gerilme süreksizlikleri yüksek iken (Şekil 3.4a,b,c), $n > 1.0$ iken metalce zengin bölgedeki katmanlar arası gerilme süreksizlikleri yüksektir (Şekil 3.4e,f). $n = 1.0$ olduğunda ise tüm plaka kalınlığı boyunca katmanlar arası gerilme süreksizliğinin sabit kaldığı görülmektedir (Şekil 3.4d). Bu gerilme süreksizlikleri ya katman sayısı artırılarak yada fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler kullanılarak azaltılabilir.

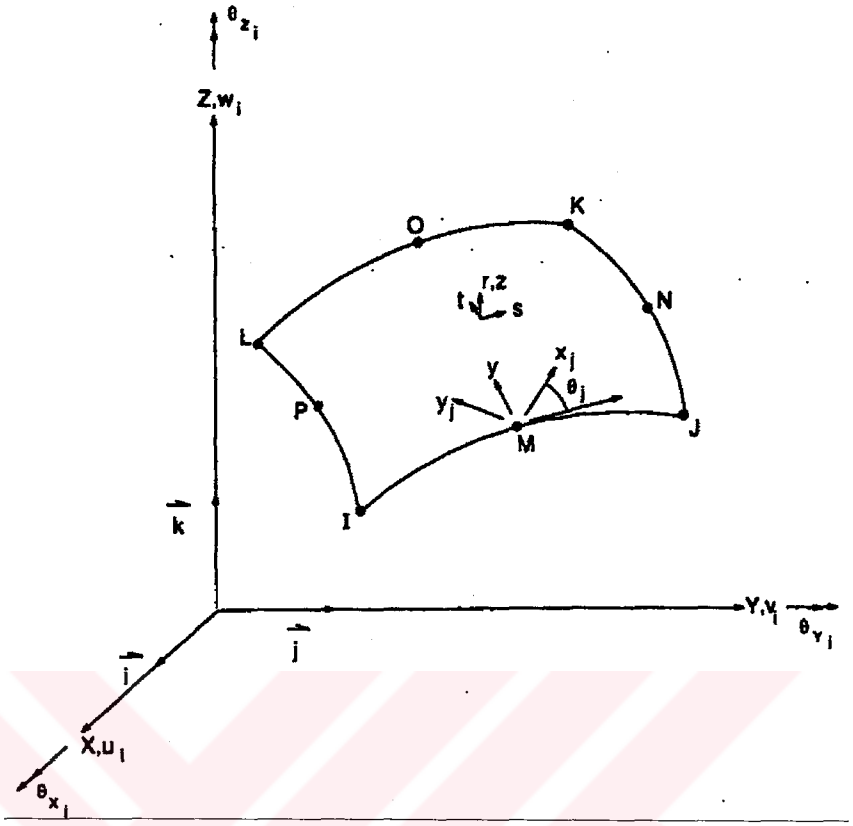
Sonuç olarak, plaka kalınlığı boyunca farklı tip sıcaklık dağılımlarının ısıl artık gerilmelerin profilleri üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı, gerilme değerleri üzerinde ise az da olsa etkisinin olduğu görülmüştür. Buna karşın, ısıl artık gerilmeler üzerinde kompozisyonel gradyantın oldukça etkili olduğu anlaşılmıştır. Analitik metot, her yeni sınır şartı için matematiksel modelin çözümüne ihtiyaç duymaktadır. Bu çözümün oluşturulması sınır şartlarına bağlı olarak büyük çaba gerektirir. Bu nedenle analizlerde sınır şartlarından bağımsız olarak modelin kolayca oluşturulabildiği sonlu elemanlar metodu kullanılabilir.

3.3 Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözüm

Sonlu elemanlar metoduyla yapılan ısıl artık gerilme analizlerinde, analitik çözümlerde kullanılan plaka geometrisi kullanıldı. Isıl yük şartı olarak üniform sıcaklık dağılımı tercih edildi. Ayrıca, çok katmanlı plakayı oluşturan farklı bileşenlerin ısıl artık gerilmeler üzerindeki etkileri de incelendi. Analizlerde, plakanın sonlu eleman modelinin oluşturulması için katmanlı plaka teorisini esas alan; sekiz düğümlü ve dört integrasyon noktalı lineer katmanlı kabuk eleman kullanıldı. Plaka $x-$ ve $y-$eksenleri boyunca 40×40 lineer katmanlı kabuk eleman kullanılarak meshlendi.

3.3.1 Klasik Katmanlanmış Plaka Teorisinin Sonlu Elemanlar Metoduna Uygulanması

Sonlu elemanlar analizinde, çok katmanlı plakanın modellenmesi için lineer katmanlı kabuk eleman kullanıldı. Sekiz düğüm noktalı, izoparametrik, eğrisel kabuk sonlu eleman ve bu elemana ait lokal ve global koordinat sistemleri Şekil 3.5'de



Şekil 3.5: Eğrisel kabuk eleman geometrisi [59].

görülmektedir [60]. Kabuk eleman kalınlığı boyunca N katmandan oluşmaktadır. Kabuk elemanın j'inci katmanındaki ısıl artık gerilme şu şekilde ifade edilir;

$$\{\sigma\}_j = [D]_j \left(\{\varepsilon\}_j - \{\varepsilon^{th}\}_j \right) \tag{3.11}$$

burada $\{\varepsilon^{th}\}_j$: ısıl şekil değiştirme matrisi, $[D]_j$: j'inci katmanda ilgilenilen noktanın gerilme-şekil değiştirme ilişkisidir. j'inci katmandaki şekil değiştirme matrisi;

$$\{\varepsilon\}_j = [T_m]_j \, [B] \, \{u_e\} \tag{3.12}$$

burada $[T_m]_j$: eleman dönüşüm matrisi, $[B]$: şekil değiştirme-yer değiştirme matrisi ve $\{u_e\}$: j'inci katmanın eleman yer değiştirme vektörüdür. Düzlemsel kabuktan alınan birim kare elemandaki ısıl kuvvet ve moment sonuçları;

$$\begin{Bmatrix} \{N^T\} \\ \{M^T\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [E_0] & [E_1] \\ [E_1] & [E_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varepsilon\} \\ \{\kappa\} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{S_0\} \\ \{S_1\} \end{Bmatrix} \tag{3.13}$$

burada $[E_0]$,$[E_1]$ ve $[E_2]$ rijitlik matrisleri ve $\{S_0\}$, $\{S_1\}$ ısıl yük vektörleri olup aşağıdaki gibi tariflenirler;

$$
\begin{aligned}
[E_0] &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{r_j^{alt}}^{r_j^{üst}} [T_m]_j^T \, [D]_j \, [T_m]_j \, dr \\
[E_1] &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{r_j^{alt}}^{r_j^{üst}} r \, [T_m]_j^T \, [D]_j \, [T_m]_j dr \\
[E_2] &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{r_j^{alt}}^{r_j^{üst}} r^2 \, [T_m]_j^T \, [D]_j \, [T_m]_j \, dr
\end{aligned}
\tag{3.14}
$$

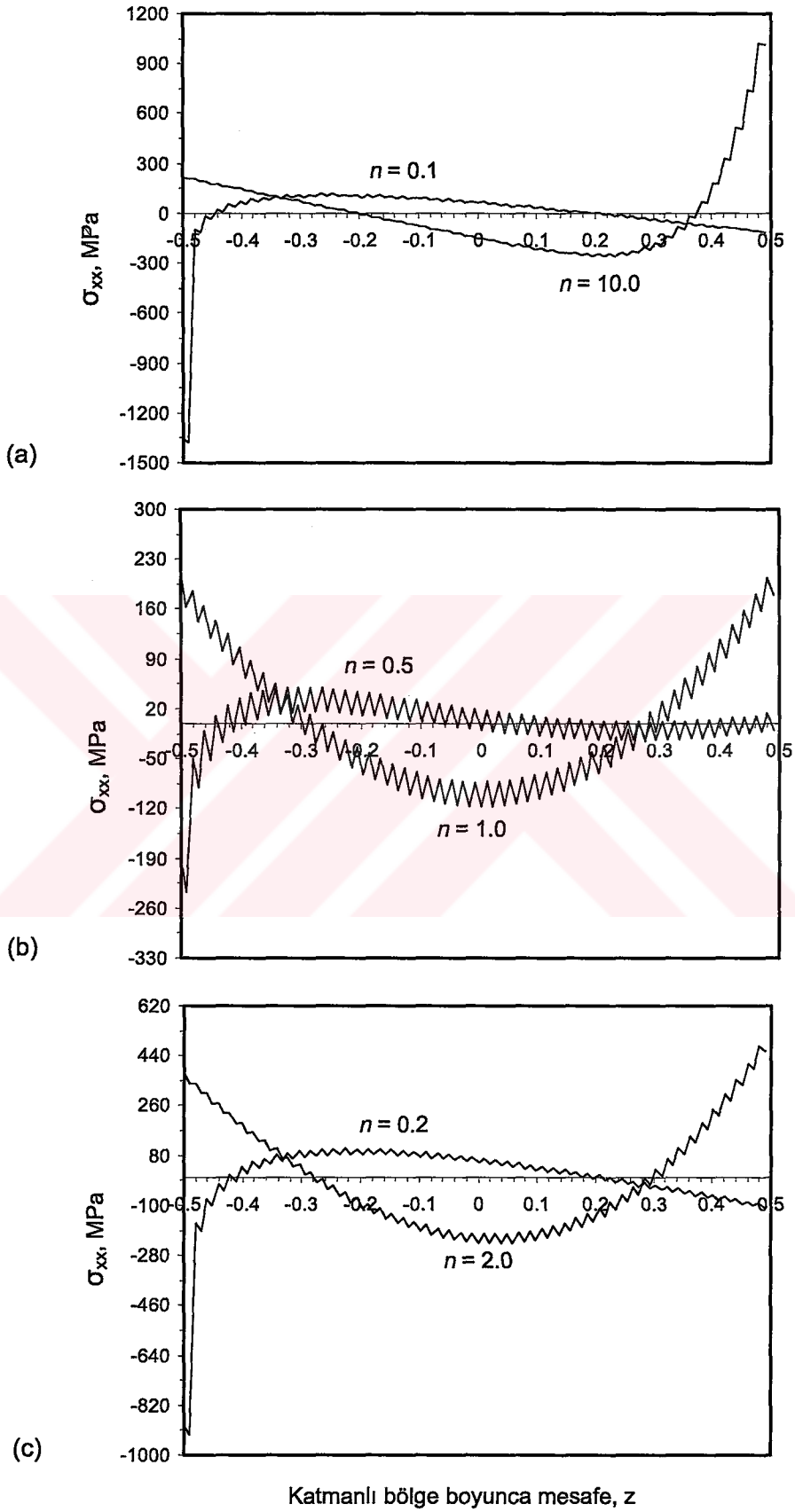
$$
\begin{aligned}
\{S_0\} &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{r_j^{alt}}^{r_j^{üst}} [T_m]_j^T \, [D]_j \, \{\varepsilon^{th}\}_j dr \\
\{S_1\} &= \sum_{j=1}^{N_\ell} \int_{r_j^{alt}}^{r_j^{üst}} r \, [T_m]_j^T \, [D]_j \, \{\varepsilon^{th}\}_j dr
\end{aligned}
\tag{3.15}
$$

3.3.2 Nümerik Sonuçlar

Çok katmanlı plakalarda ısıl artık şekil değiştirmeler nedeniyle oluşan orta düzlem şekil değiştirme miktarları ve plaka eğriliklerini belirlemek amacıyla üniform sıcaklık dağılımına maruz ve farklı seramik/metal bileşimlerinden oluşan çok katmanlanmış basit bir plaka analiz edildi. Çok katmanlı plakaların gerilme analizleri neticesinde ısıl artık gerilmeler üzerinde katman sayısı ve kompozisyonel gradyantın oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Çok katmanlı plakaları oluşturan metal ve seramik bileşenlerin malzeme özellikleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Analizlerde çok katmanlı plakayı oluşturan metal ve seramik bileşenlere ait ısıl genleşme katsayıları ve elastisite modüllerinin plakanın şekil değişimi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla plakayı oluşturan malzeme sistemlerinin seçiminde dikkate alınan hususlar şunlardır: 1) sabit ısıl genleşme katsayısında elastisite modülü etkisinin incelenebileceği ve 2) sabit elastisite modülünde ısıl genleşme katsayısının etkisinin araştırılabileceği tarzda malzeme sistemleri ele alınmıştır. Değerlendirme parametrelerinde eşdeğer özelliklere sahip seramik/metal sistemleri tabloda parantez içerisinde gösterilmiştir.

Tablo 3.3'de Ni–SiC üç farklı bileşimde, Ti–SiC iki farklı bileşimde Ni–TiO_2



Şekil 3.6: Plaka kalınlığı boyunca üniform sıcaklık dağılımına maruz $Ni - TiO_2$ çok katmanlı plakanın ısıl artık gerilme dağılımları (N=51) [59].

Tablo 3.3: Üniform sıcaklık dağılımına maruz çok katmanlanmış plakaları oluşturan seramik ve metal bileşenlerin özellikleri, hesaplanmış artık gerilme değerleri, plaka eğrilikleri ve orta düzlem şekil değiştirme miktarları ($n=$ 0.5).

Malzeme	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Sistem	*(Ni/SiC)*			*(Ti/SiC)*		*(Ni/TiO_2)*	*(Ti/Y_2O_3)*	
E_m(GPa)	145	110	110	110	145	145	110	145
E_c(GPa)	475	475	475	475	475	290	170	290
$\alpha_m(10^{-6}/℃)$	15	15	15	10.3	15	15	10.3	10.3
$\alpha_c(10^{-6}/℃)$	4.5	4.5	8.9	4.5	8.9	8.9	8.3	8.3
E_c/E_m	3.27	4.32	4.32	4.32	3.27	2.0	1.55	2.0
$\Delta\alpha=(\alpha_m-\alpha_c)$	10.5	10.5	6.1	5.8	6.1	6.1	2.0	2.0
$(\alpha_m+\alpha_c)/2$	9.75	9.75	11.95	7.4	11.95	11.95	9.3	9.3
ν_m	0.31	0.31	0.31	0.34	0.34	0.31	0.34	0.34
ν_c	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.27	0.27	0.27
$\kappa(10^{-3})$	-9.56147	-9.11986	-5.29820	-5.04572	-5.55965	-5.66128	-1.81164	-1.85477
$\varepsilon^0(10^{-2})$	-0.92882	-0.87694	-1.138	-0.68588	-1.1683	-1.2217	-0.94782	-0.93879
Seramik yüzeyde σ_{xx} *(MPa)*	-4.044 -107.599	160.565 61.792	93.281 35.898	90.697 36.049	-1.106 -61.319	-193.2 -237.301	-63.287 -71.563	-63.547 -77.999
Metal yüzeyde σ_{xx} *(MPa)*	235.001 195.601	294.785 266.275	171.256 154.693	169.511 153.02	142.171 118.22	13.238 -10.091	-8.09 -14.013	4.628 -3.364

tek bileşimde ve Ti–Y_2O_3 iki farklı bileşimde olmak üzere toplam sekiz farklı malzeme sisteminden oluşan çok katmanlı plakaların $n=$ 0.5 için ilk ve son katmanlardaki ısıl artık gerilmeleri, plaka eğrilikleri ve orta düzlem şekil değiştirme miktarları görülmektedir. Ayrıca, tabloda metal ve seramiğin ısıl genleşme katsayıları arasındaki farklar $\Delta\alpha = (\alpha_m - \alpha_c)$ ve seramik ve metalin elastisite modülleri arasındaki oranlarda (E_c/E_m) gösterilmiştir. Tüm malzeme sistemlerinde seramik ve metalin elastisite modülleri sabit iken, artan $\Delta\alpha$ ile artık gerilmelerde artmaktadır. Yine tüm malzeme sistemlerinde $\Delta\alpha$ sabit iken, artan (E_c/E_m) oranıyla artık gerilmelerde artmaktadır. Tüm malzeme sistemlerinde bileşenlerin elastisite modülleri oranı (E_c/E_m) sabit iken artan $\Delta\alpha$ ile artık gerilmelerde artmaktadır. Orta düzlem şekil değiştirme miktarı (ε^0) metal ve seramiğin elastisite modüllerinden bağımsızdır ve esasen metal ve seramiğin ısıl genleşme katsayıları vasıtasıyla hesaplanır. Bundan dolayı, orta düzlem şekil değiştirme miktarının büyüklüğü, $(\alpha_m + \alpha_c)/2$ ifadesinin değerine göre sıralanabilir. Yani, $(\alpha_m + \alpha_c)/2$ arttıkça çok katmanlı plakanın orta düzlem şekil değiştirme miktarı da artar. Buna ilave olarak, plakanın eğriliği $\Delta\alpha$ 'dan etkilenmektedir. Yani, $\Delta\alpha$ arttıkça plaka eğriliği de

artmaktadır (Tablo 3.3).

Kalınlık boyunca üniform sıcaklık dağılımına maruz, 51 katmandan oluşan Ni–TiO_2 çok katmanlı plakanın farklı kompozisyonel gradyantlardaki ısıl artık gerilme dağılımları Şekil 3.6'da görülmektedir. n= 0.1 iken seramikçe zengin yüzeyde yüksek basma gerilmesi oluşurken, n= 10.0 olduğunda metalce zengin yüzeyde yüksek çekme gerilmesi oluşmaktadır (Şekil 3.6a). n= 0.5 olduğunda, seramik yüzeyde yine basma gerilmesi oluşmaktadır. n= 1.0 iken, seramik ve metal yüzeylerde eşdeğer çekme gerilmeleri oluşurken plaka kalınlığının orta bölgesinde basma gerilmesi oluşmaktadır. Ayrıca n= 0.5 ve 1.0 iken katmanlar arası gerilme süreksizlikleri plaka kalınlığı boyunca hemen hemen sabit kalmaktadır (Şekil 3.6b). n= 0.2 ve 2.0 iken, oluşan artık gerilme dağılımları n= 0.1 ve 10.0 olduğunda oluşan artık gerilme dağılımlarıyla benzerdir. Ancak artık gerilme değerleri daha küçüktür (Şekil 3.6c).

Üniform sıcaklık dağılımına maruz Ni–TiO_2 çok katmanlı plakada oluşan ısıl artık gerilmeler sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edildi. Elde edilen neticelerin (Şekil 3.6) analitik metotla elde edilen neticelerle (Şekil 3.4) birebir örtüştüğü görülmektedir. Bundan dolayı, bu tip problemlerin çözümünde, gerek modelin oluşturulması gerekse sınır şartlarının tatbiki bakımından sağlamış olduğu kolaylıklar nedeniyle sonlu elemanlar metodunun kullanılması uygun olacaktır.

3.4 Sonuçlar

Yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılan çok katmanlı plakaların ısıl gerilme analizleri neticesinde katmanlar arasında gerilme süreksizlikleri olduğu görülmüştür. Bu gerilme süreksizliklerinin nedeni katman kalınlığı boyunca metal ve seramiğin ısıl ve mekanik özelliklerinin sabit kalıp katmandan katmana kademeli olarak değişmesidir. Bu gerilme süreksizlikleri plaka katmanları arasında çatlamaya ve takiben kırılmaya neden olabilir. Bu durumun ortadan kaldırılması için gerilmenin plaka kalınlığı boyunca sürekli bir değişim gösterdiği fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar kullanılabilir. Bu amaçla, Bölüm 4'de fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakaların farklı sıcaklık alanlarındaki ısıl gerilme analizleri yapılacaktır. Plakaların sonlu elemanlar modeli, teorisi Bölüm 4'de ayrıntılı anlatılan üç boyutlu katmanlı

sonlu eleman tipiyle oluşturulacaktır. Bu eleman tipi, gerilmeye maruz plakalardaki Poisson etkisini ve plakalarda oluşan enine kayma gerilmelerinin plaka sistemindeki artık gerilme dağılımlarına olan katkısını dikkate almamıza imkan sağlayacaktır.

BÖLÜM 4

FARKLI SICAKLIK ALANLARINA MARUZ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ PLAKALARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

4.1 Giriş

Bu bölümde Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC bileşimlerinden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakaların kalınlık boyunca üniform, lineer ve parabolik sıcaklık alanlarına maruz bırakılması nedeniyle oluşan ısıl artık gerilmelerin üç boyutlu elastik analizi yapıldı. Bununla beraber, malzeme kompozisyonunun ısıl artık gerilmelere olan etkileri de incelendi. Malzemelerin ısıl ve mekanik özelliklerinin plaka kalınlığı boyunca seramik ve metal yüzeyler arasında bir üstel denkleme göre sürekli bir değişime sahip olduğu kabul edilmiştir.

Artık gerilme problemini çözmek için Ahmad ve arkadaşları [58] ve Yunus ve Khonke [60] tarafından geliştirilen kabuk elemana benzeyen üç boyutlu sekiz düğüm noktalı ve her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesi olan izoparametrik eleman kullanıldı.

4.2 Bünye İlişkileri

Seramik ve metal, ısıl ve mekanik farklılıkları nedeniyle artık gerilmelere maruz kalırlar. Bu artık gerilmeleri azaltmak ve düzeltmek için seramik ve metal arasında kademelendirilmiş bir ara yüzey (*Functionally Graded Material* = *FGM*) kullanılır. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme, seramikçe zengin yüzeyden metalce zengin yüzeye bileşimin sürekli olarak değiştiği bir yapıdır. Malzeme bileşimindeki seramiğin düşük ısıl geçirgenliği yüksek sıcaklık direnci sağlar.

Aslında, fonksiyonel kademelendirilmiş malzeme keyfi şekillere sahip seramik ve

metal partiküllerin rasgele ve belli hacimsel oranlara göre dağılmış bir karışımıdır. Bir fonksiyonel kademelendirilmiş malzemenin termomekanik özellikleri seramik ve metal partiküllerin şekli ve yönünün bir fonksiyonudur.

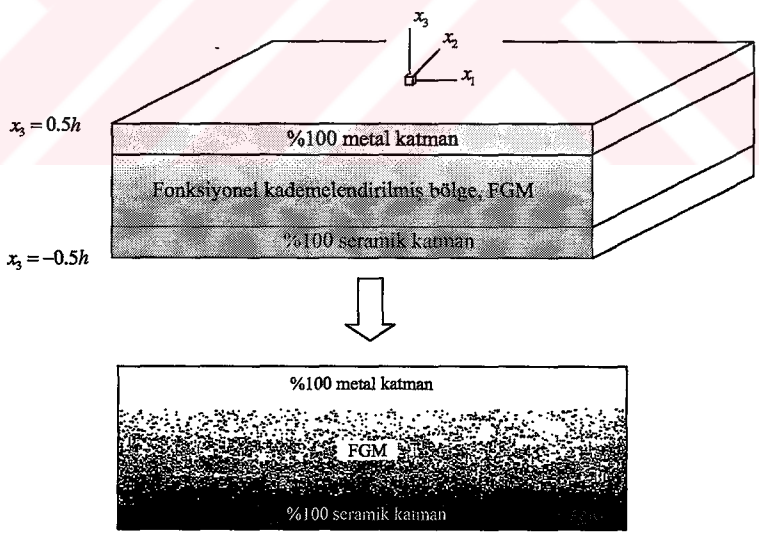
Bu amaçla, basit bir hesaplama metodu olan lineer karışım kuralı ile kademelendirilmiş bölgenin herhangi bir ξ noktasında genel malzeme özelliği P, seramik (c) ve metalin (m) hacimsel oranlarının lineer bileşimi ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$P(\xi) = V_m(\xi) P_m(\xi) + V_c(\xi) P_c(\xi) \tag{4.1}$$

burada;

$$V_m + V_c = 1 \tag{4.2}$$

Bu metod, partikül, dağılmış yapı ve iki bileşenin birbiriyle etkileşimlerinin tesirini dikkate almaz. Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin termomekanik davranışları, elastisite modülü ve ısıl genleşme katsayılarının doğru olarak hesaplanmasına kuvvetle bağlıdır [36,61-67]. Bir fonksiyonel kademelendirilmiş

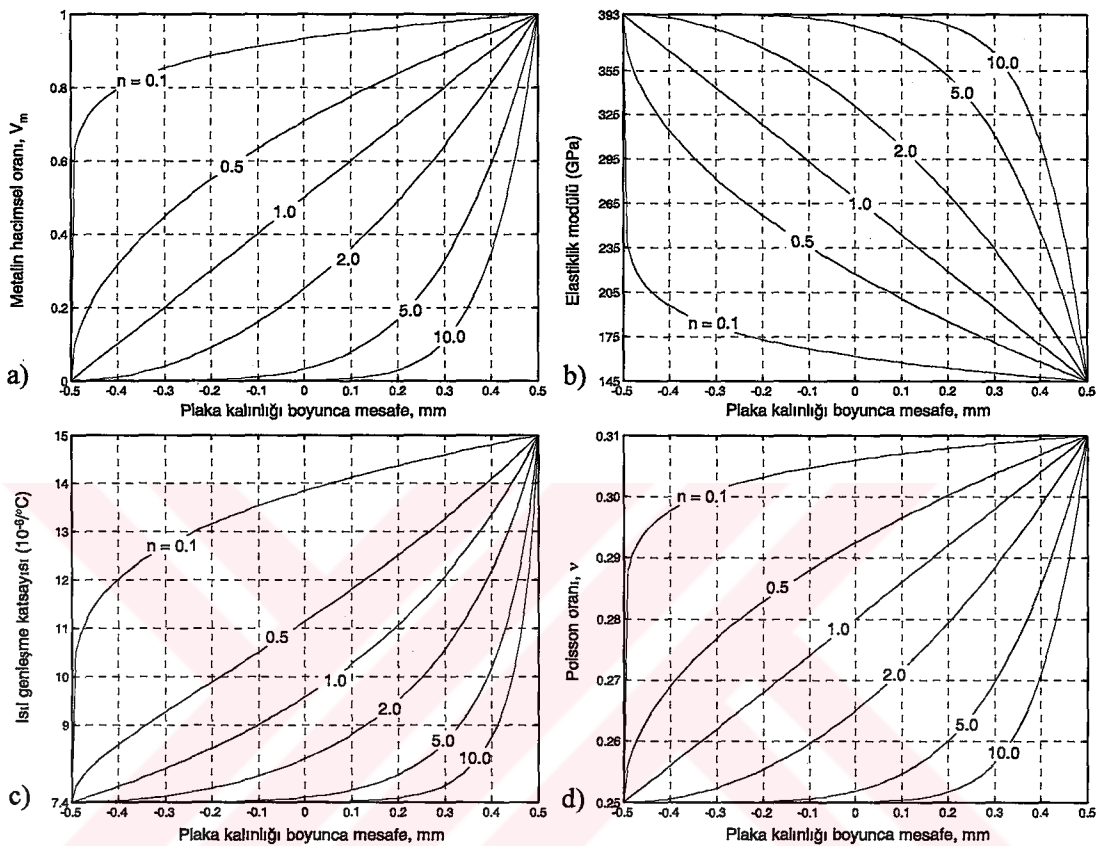


Şekil 4.1: Fonksiyonel kademelendirilmiş plaka

kompozit plaka Şekil 4.1'de gösterildiği gibi homojen izotropik seramik ve metal fazlar arasındaki kademelendirilmiş tabakadan ibarettir. Metal fazın hacimsel oranı aşağıda verilen üstel denklem ile hesaplanır;

$$V_m(z) = \left(\frac{z + 0.5h}{h}\right)^n \tag{4.3}$$

burada, n bileşimin gradyantıdır. Şekil 4.2(a) kalınlık boyunca en alttaki seramikçe zengin yüzey ve en üstteki metalce zengin yüzey arasındaki n= 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için metalin hacimsel oranındaki değişimi göstermektedir. Tamura ve



Şekil 4.2: Bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyantlar n için (a) metal fazın hacimsel oranı V_m, (b) elastisite modülü E, (c) ısıl genleşme katsayısı α, ve (d) Poisson oranı ν değişimleri.

arkadaşları [65] elastisite modülü için aşağıdaki modifiye edilmiş karışım kuralını sunmuşlardır;

$$E = \left[\left(\frac{q+E_c}{q+E_m}\right)V_m E_m + (1-V_m)\,E_c\right]\left[\left(\frac{q+E_c}{q+E_m}\right)V_m + (1-V_m)\right]^{-1} \qquad (4.4)$$

burada gerilme-şekil değiştirme transfer oranı;

$$q = \frac{\sigma_c - \sigma_m}{\varepsilon_c - \varepsilon_m} \qquad (0 < q < +\infty) \qquad (4.5)$$

q değerinin seçimi, modifiye edilmiş karışım kuralına dayanan ortalama elastisite modülünü etkiler. İyi dağıtılmış bir *metal*–Al_2O_3 kompoziti için q'nun değeri

500GPa olarak alınabilir [61]. Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca elastisite modülündeki değişim Şekil 4.2(b)'de gösterilmiştir. Ni–Al_2O_3 kompozit malzemenin bileşimlerine ait ısıl ve mekanik özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir. İzotropik tanecikli kompozitler için Wakashima-Tsukamoto [66] temsilinde, çift-fazlı malzemeler için ortalama ısıl genleşme katsayısı Levin bağıntısını kullanan ortalama bulk modülü ile ilişkilidir [68];

$$\bar{\alpha} = \alpha_m + \frac{\left(\frac{1}{\bar{K}} - \frac{1}{K_m}\right)(\alpha_c - \alpha_m)}{\frac{1}{K_c} - \frac{1}{K_m}} \tag{4.6}$$

burada ortalama bulk modülü $\bar{K}$;

$$\bar{K} = K_m + \frac{aV_cK_m(K_c - K_m)}{V_mK_c + aV_cK_m} \tag{4.7}$$

ve kayma modülü $\bar{\mu}$;

$$\bar{\mu} = \mu_m + \frac{bV_c\mu_m(\mu_c - \mu_m)}{V_m\mu_c + bV_c\mu_m} \tag{4.8}$$

ve

$$a = \frac{K_c(3K_m + 4\mu_m)}{K_m(3K_c + 4\mu_c)}$$

$$b = \frac{(1+e)\mu_c}{\mu_m + e\mu_c}$$

$$e = \frac{9K_m + 8\mu_m}{6K_m + 12\mu_m}$$

Ortalama Poisson oranı ν ise aşağıdaki gibidir;

$$\bar{\nu} = \frac{3\bar{K} - 2\bar{\mu}}{2\left(3\bar{K} + \bar{\mu}\right)} \tag{4.9}$$

Tablo 4.1: Bileşenlerin ısıl ve mekanik özellikleri: Ni, Ti, Al_2O_3, TiO_2 and SiC.

Özellikler	**Bileşenler**				
	Ni	*Ti*	Al_2O_3	TiO_2	*SiC*
E (GPa)	145	110	393	290	475
$\alpha\ (10^{-6}/°C)$	15	10.3	7.4	8.9	4.5
ν	0.31	0.34	0.25	0.27	0.14

Denklem 4.4'teki modifiye edilmiş karışım kuralına dayanan ortalama elastisite modülüne alternatif olarak aşağıdaki denklem kullanılabilir;

$$\bar{E} = \frac{9\bar{K}\bar{\mu}}{3\bar{K} + \bar{\mu}} \tag{4.10}$$

Elastisite modülü için modifiye edilmiş karışım kuralı kullanılmıştır. Şekil 4.2(c) ve (d) Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakanın kalınlığı boyunca ısıl genleşme katsayısı α ve Poisson oranının ν değişimini göstermektedir. Ni–TiO_2 ve Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların kalınlıkları boyunca mekanik özelliklerindeki benzer değişimler gösterilmemiştir.

4.3 Sonlu Elemanlar Formülasyonu

Bir lineer elastik cisim içerisindeki potansiyel enerji aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\begin{aligned}\Pi_p = &\int_V \left\{ \tfrac{1}{2} \{\dot{\varepsilon}\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}^T \{\sigma_0\} \right\} dV \\ &- \int_V \{u\}^T \{F\} dV - \int_S \{u\}^T \{\phi\} dS - \{Q\}^T \{P\}\end{aligned} \tag{4.11}$$

burada $\{u\}$ yer değiştirme alanı, $\{\varepsilon\}$ şekil değiştirme alanı, $[D]$ malzeme mekanik özellik matrisi, $\{\varepsilon_0\}, \{\sigma_0\}$ başlangıç şekil değiştirme ve gerilmeleri, $\{F\}$ cisim kuvvetleri, $\{\phi\}$ yüzey çekilmesi, $\{Q\}$ yapının düğüm serbestlik derecesi ve $\{P\}$ serbestlik derecesine uygulanan yükler [69].

Elemandaki yer değiştirmeler elemanın düğüm serbestlik derecesinden $\{q\}$ interpolasyon yapılarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\{u\} = [N] \{q\} \tag{4.12}$$

burada $[N]$ şekil fonksiyon matrisidir. Şekil değiştirmeler, yer değiştirmeler cinsinden ifade edilebilir;

$$\{\varepsilon\} = [\partial] \{u\} \tag{4.13a}$$

denkleminden;

$$\{\varepsilon\} = [B] \{q\} \tag{4.13b}$$

burada

$$[B] = [\partial] [N] \tag{4.14}$$

Şimdi, denklem (4.11)'den;

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{numel} \{q\}_n^T [k]_n \{q\}_n - \sum_{n=1}^{numel} \{q\}_n^T \{r_e\}_n - \{Q\}^T \{P\} \tag{4.15}$$

burada eleman rijitlik matrisi;

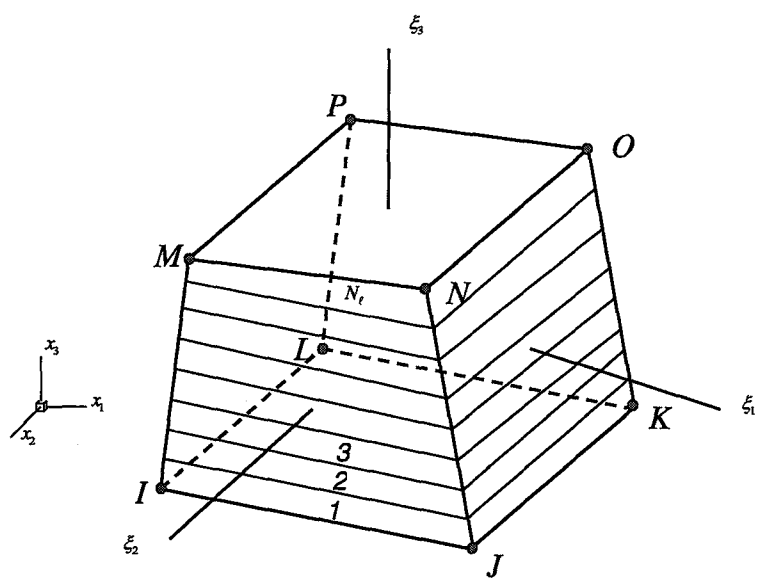
$$[k] = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] \, dV \tag{4.16}$$

ve eleman yük vektörü;

$$\{r_e\} = \int_{V_e} [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} \, dV - \int_{V_e} [B]^T \{\sigma_0\} \, dV + \int_{V_e} [N]^T \{F\} \, dV + \int_{S_e} [N]^T \{\phi\} \, dS \tag{4.17}$$

4.3.1 Çok Katmanlı 3B İzoparametrik Sekiz-düğüm Noktalı Sonlu Eleman

Sekiz düğüm noktalı, 3B katmanlı sonlu eleman Şekil 4.3'de gösterildiği gibi ortak (ξ_1, ξ_2, ξ_3) lokal ve (x_1, x_2, x_3) global koordinat sistemlerine sahiptir. Herbir eleman ξ_3 kalınlık doğrultusunda N_ℓ sayıda katmana sahiptir. Elemanın formülasyonu üç boyutlu elastisite teorisine dayanmakta ve Ahmad ve arkadaşları [58] ve Yunus ve Khonke [60] tarafından verilen tek ve çok katmanlı izotropik kabuk elemanın benzeridir. Eleman geometrisi şu şekilde tariflenir;



Şekil 4.3: 3B izoparametrik katmanlı 8-düğüm noktalı sonlu eleman.

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{8} N_i \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{Bmatrix}_i \tag{4.18}$$

Eleman içerisinde herhangi bir noktadaki u yer değiştirmesi düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler cinsinden yazılacak olursa;

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{8} N_i \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}_i \tag{4.19}$$

burada, N_i şekil fonksiyonu ve $(u_1)_i$,$(u_2)_i$,$(u_3)_i$ global düğüm yer değiştirmeleridir. ξ_3 kalınlık boyunca tüm integrasyon noktalarının aynı malzeme doğrultularına sahip olduğu kabul edilmiştir.

4.3.2 Şekil değiştirme-Yer değiştirme İlişkileri

Global yer değiştirmeler cinsinden şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\{\varepsilon\} = [H]\,\{E\} \tag{4.20}$$

burada

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{33} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{31} \end{Bmatrix}^T$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\{E\} = \begin{bmatrix} [E^{(u_1)}] & [E^{(u_2)}] & [E^{(u_3)}] \end{bmatrix}^T$$

$$[E^{(u_1)}] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial u_1}{\partial x_1} & \dfrac{\partial u_1}{\partial x_2} & \dfrac{\partial u_1}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

$[E^{(u_2)}]$ ve $[E^{(u_3)}]$ ifadeleride benzer şekilde tanımlanır. Global yer değiştirmeler, lokal koordinatlara (ξ_1, ξ_2, ξ_3) bağlı olarak yazılabilir;

$$\{E\} = [A]\,\{e\} \tag{4.21}$$

burada

$$[A] = \text{diag}\begin{bmatrix} [J]^{-1} & [J]^{-1} & [J]^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\{e\} = \begin{Bmatrix} [e^{(u_1)}] & [e^{(u_2)}] & [e^{(u_3)}] \end{Bmatrix}^T$$

$$[e^{(u_1)}] = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial u_1}{\partial \xi_1} & \dfrac{\partial u_1}{\partial \xi_2} & \dfrac{\partial u_1}{\partial \xi_3} \end{bmatrix}$$

$[e^{(u_2)}]$ ve $[e^{(u_3)}]$ ifadeleride benzer şekilde tariflenir. $[J]$ koordinat Jakobyen matrisidir. Lokal koordinat yer değiştirmesi düğüm yer değiştirmeleri cinsinden yazılabilir;

$$\{e\} = \{\eta\}\ \{u_t\} \tag{4.22}$$

burada

$$\{\eta\} = \text{diag}\left[\ [\eta^*]\ \ [\eta^*]\ \ [\eta^*]\ \right]$$

$$\{\eta^*\} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial N_1}{\partial \xi_1} & \dfrac{\partial N_2}{\partial \xi_1} & \cdots & \dfrac{\partial N_8}{\partial \xi_1} \\ \dfrac{\partial N_1}{\partial \xi_2} & \dfrac{\partial N_2}{\partial \xi_2} & \cdots & \dfrac{\partial N_8}{\partial \xi_2} \\ \dfrac{\partial N_1}{\partial \xi_3} & \dfrac{\partial N_2}{\partial \xi_3} & \cdots & \dfrac{\partial N_8}{\partial \xi_3} \end{bmatrix}$$

$$\{u_t\} = \left[\ \left[u_t^{(u_1)}\right]\ \ \left[u_t^{(u_2)}\right]\ \ \left[u_t^{(u_3)}\right]\ \right]^T$$

$$\left[u_t^{(u_1)}\right] = \left[\ (u_1)_1\ \ (u_1)_2\ \ \cdots\ \ (u_1)_8\ \right]$$

$\left[u_t^{(u_2)}\right]$ ve $\left[u_t^{(u_3)}\right]$ ifadeleride benzer şekilde tariflenir. Matris denklem (4.22) parçalanırsa ve en üstteki parça olan $\left\{e^{(u_1)}\right\}$ aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{e^{(u_1)}\right\} = [\eta^*]\ \left\{u_t^{(u_1)}\right\} \tag{4.23}$$

Denklem (21) ve (23) birleştirilerek aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{E^{(u_1)}\right\} = \left[b^{(u_1)}\right]\ \{\bar{u}\} \tag{4.24}$$

burada

$$\left[b^{(u_1)}\right] = [J]^{-1}\ [\eta^*]$$

ve

$$\{\bar{u}\} = [u]^T$$

$\left\{E^{(u_2)}\right\}$ ve $\left\{E^{(u_3)}\right\}$ ifadeleride benzer şekilde geliştirilir ve bu ifadelerin üçü de denklem (4.20)'de birleştirilirse şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\{\varepsilon\} = [B]\ \{\bar{u}\} \tag{4.25}$$

burada

$$[B] = [H] \begin{bmatrix} \left[b^{(u_1)}\right] \\ \left[b^{(u_2)}\right] \\ \left[b^{(u_3)}\right] \end{bmatrix}$$

$[B]$ matrisi, Jakobyen $[J]$ matrisinin tersini içerir.

4.3.3 Gerilme-Şekil değiştirme İlişkileri

Elastiklik matrisi $[D]_j$, j'inci katman için yazılacak olursa;

$$[D]_j = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix}_j \tag{4.26}$$

Katmanlar arasındaki gerilmenin sürekliliğini sağlamak amacıyla, elastiklik matrisi j'inci katman için yeniden düzenlenirse;

$$[D^*]_j = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu^*_{13}}{E^*_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu^*_{23}}{E^*_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu^*_{13}}{E^*_3} & -\frac{\nu^*_{23}}{E^*_3} & \frac{1}{E^*_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix}_j \tag{4.27}$$

burada

$$\nu^*_{13} = E^*_3 \left(\frac{\nu_{13}}{E_3}\right)_j, \quad \nu^*_{23} = E^*_3 \left(\frac{\nu_{23}}{E_3}\right)_j \quad \text{ve} \quad E^*_3 = \frac{t}{\sum_{j=1}^{N_\ell} \left(\frac{t}{E_3}\right)_j}$$

t_j : j'inci katmanın ortalama kalınlığı, N_ℓ: katman sayısı ve t: elemanın ortalama toplam kalınlığı.

4.3.4 Rijitlik Matrisi Formülasyonu

Local koordinatlar cinsinden eleman rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[K] = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1} [B]^T [D^*]_j \, [B] \det [J] \, d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{4.28}$$

burada $[D^*]$, eleman içerisinde ilgilenilen noktadaki değiştirilmiş gerilme-şekil değiştirme matrisidir. Katmanlı bir eleman için denklem (4.28) aşağıdaki gibi verilebilir;

$$[K] = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\sum_{j=1}^{N_\ell}\int_{(\xi_3)_j^{bot}}^{(\xi_3)_j^{top}} [B]^T \, [D^*]_j \, [B] \det [J] \, d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{4.29}$$

Kalınlık boyunca nümerik integrasyon, j'inci katmanda ξ_3 değişkeni $(\xi_3)_j$ ye dönüştürülerek ve ilgili katmanda ξ_3'ün -1'den 1'e değiştiği düşünülerek yapılır [70, 71].

$$\xi_3 = -1 + \frac{1}{t}\left[2\sum_{k=1}^{j} h_k - h_j\,(1-\xi_{3j})\right] \tag{4.30}$$

ve

$$d\xi_3 = \frac{h_j}{t} d\xi_j \tag{4.31}$$

Denklem (4.30) ve (4.31), denklem (4.29)'da yerine yazılırsa;

$$[K] = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\sum_{j=1}^{N_\ell}\int_{-1}^{1} [B]^T \, [D^*]_j \, [B] \det [J] \left(\frac{h_j}{t}\right) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{4.32}$$

denklemi elde edilir. Eleman rijitliğine katmanın tesirini hesap etmek için herbir katmanda $(2 \times 2 \times 2)$ Gauss integrasyon planına ihtiyaç vardır.

4.3.5 Isıl Yük Vektörü

Isıl yük vektörünü türetmek için, üst $(MNOP)$ ve alt $(IJKL)$ yüzeylerde sıcaklığın dördüncü dereceden olduğu varsayıldı ve kalınlık boyunca lineer değiştiği kabul edildi (Şekil 4.3). (ξ_1, ξ_2) koordinatına göre j'inci katman içerisindeki ısıl şekil değiştirme aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{\varepsilon^{th}\right\}_j = \{\alpha\}_j \, [T_1 + \xi_3 T_2 - T_{ref}] \tag{4.33}$$

burada

$$\{\alpha\}_j = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_j^T \tag{4.34}$$

$(\alpha_1)_j$, $(\alpha_2)_j$ ve $(\alpha_3)_j$ sırasıyla x_1, x_2 ve x_3 -yönlerindeki ısıl genleşme katsayılarıdır. j'inci katman için;

$$T_1 = \frac{T^t + T^b}{2} \; ve \; T_2 = \frac{T^t - T^b}{2} \tag{4.35}$$

burada T^t ve T^b, (ξ_1, ξ_2) koordinatına göre elemanın üst ve alt yüzeylerindeki sıcaklık değerleridir. Denklem (4.33)'deki ısıl şekil değiştirme vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{\varepsilon^{th}\right\}_j = \xi_3 \left\{\varepsilon_1^{th}\right\}_j + \xi_3 \left\{\varepsilon_2^{th}\right\}_j \tag{4.36}$$

burada

$$\left\{\varepsilon_1^{th}\right\}_j = \{\alpha\}_j (T_1 - T_{ref})$$
$$\left\{\varepsilon_2^{th}\right\}_j = \{\alpha\}_j T_2$$

Isıl yük vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{F^{th}\right\} = \int_V [B]^T [D^*] \{\varepsilon_{th}\} dV \tag{4.37}$$

katmanlı eleman için ise;

$$\left\{F^{th}\right\} = \sum_{j=1}^{N_L} \int_V [B]^T [T_m]_j^T [D^*]_j \left\{\varepsilon_j^{th}\right\} d(V_j) \tag{4.38}$$

burada V_j, j'inci katmanın hacmi ve $[T_m]$, global koordinat sisteminden (x_1, x_2, x_3) lokal koordinat sistemine (ξ_1, ξ_2, ξ_3) dönüşüm matrisidir [60].

4.4 Nümerik Sonuçlar

Bu çalışmada, çeşitli bileşenlerden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakaların yüksek sıcaklıktan soğutulması nedeniyle meydana gelen ısıl artık gerilmeler üç boyutlu (3B) katmanlı sonlu eleman kullanılarak araştırıldı. Bu amaçla, kullanılan plakanın birim kalınlıkta olduğu ve diğer boyutlarının kalınlığına oranla çok büyük olduğu kabul edildi (Şekil 4.1). Alt ve üst yüzeyleri sırasıyla seramik ve metal olan plakanın kalınlığı boyunca meydana gelen ısıl gerilme dağılımını azaltmak için seramik ve metal katmanlar arasındaki bölge fonksiyonel olarak kademelendirildi. Katmanların farklı ısıl ve mekanik özelliklere sahip olması

Tablo 4.2: 3B sürekli ortam sonlu eleman ile 3B katmanlı sonlu elemanın performans testlerinin karşılaştırılması.

Katman Sayısı	Eleman Tipi	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı	Serbestlik Derecesi	CPU Zamanı (sn)
20	Katmanlı	2541	2000	7623	5.875
	Katı	2541	2000	7623	4.078
40	Katmanlı	2541	2000	7623	5.875
	Katı	18081	16000	54243	64.859
80	Katmanlı	2541	2000	7623	6.344
	Katı	136161	128000	408483	3094.266
100	Katmanlı	2541	2000	7623	6.453
200	Katmanlı	2541	2000	7623	7.469
400	Katmanlı	2541	2000	7623	9.093
1000	Katmanlı	2541	2000	7623	14.203
2000	Katmanlı	2541	2000	7623	22.244
2500	Katmanlı	2541	2000	7623	26.328

nedeniyle soğuma esnasında meydana gelen artık gerilmeler üzerinde bileşenlerin kompozisyonu ve ısıl alanın önemli bir rolü vardır. Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC bileşimlerinden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda soğuma esnasında kalınlık boyunca üniform, lineer ve parabolik sıcaklık dağılımları için artık gerilmeler incelendi. Bu esnada katmanların mükemmel şekilde birbirlerine bağlı oldukları, elastik oldukları ve plakanın başlangıçta gerilmesiz olduğu kabul edildi.

Simetri nedeniyle plakanın dörtte biri modellendi ve 3B katmanlı sonlu eleman kullanılarak mesh işlemi gerçekleştirildi. Plaka, kenarları boyunca 10 parçaya, kalınlığı boyunca 20 parçaya bölündü. Böylece plaka 2000 adet 3B katmanlı sonlu elemanla modellenmiş oldu.

Analizlerde kullanılan katmanlı sonlu eleman tipinin performansını göstermek amacıyla klasik 3B sürekli ortam sonlu elemanı tipiyle mukayesesi test edilmiştir. Bu amaçla, Ni–Al_2O_3 malzeme sisteminden oluşan plakanın üniform sıcaklık dağılımındaki soğuma problemi hem 3B katmanlı sonlu eleman tipiyle hem de klasik 3B sürekli ortam sonlu eleman tipiyle çözülmüştür. Kullanılan 3B katı sonlu eleman her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir.

Çözümde plaka kalınlığı boyunca katman sayısı 20'den 2500'e kadar çıkartılmıştır. Böylece 3B sürekli ortam sonlu eleman tipiyle oluşturulan modelde düğüm sayısı ve serbestlik dereceleri oldukça artarken, 3B katmanlı sonlu eleman tipiyle oluşturulan modelde bu değerler sabit kalmıştır (Tablo 4.2). Gerilme analizi için 1.6 GHz CPU hızına ve 512 Mb Ram'e sahip olan bir PC kullanılmıştır ve çözümlere ait CPU zamanları Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Bilgisayar donanımındaki sınırlamalar nedeniyle 3B sürekli ortam sonlu eleman tipiyle yapılan analizlerde plaka kalınlığı boyunca 80'den fazla katman sayıları için çözüme ulaşılamamıştır. Halbuki, 3B katmanlı sonlu eleman tipiyle yapılan analizler tüm katman sayıları için çözülmüştür. Çözüm için sürekli ortam sonlu eleman tipinde CPU zamanı oldukça artmışken, katmanlı eleman tipinde CPU zamanı oldukça küçük kalmıştır (Tablo 4.2). Sonuç olarak, bu tip problemlerin çözümünde klasik 3B sürekli ortam sonlu eleman tipinin uygun olmadığı anlaşılmıştır.

Yapılan testler neticesinde bu çalışmada, simetri nedeniyle plakanın dörtte bir modeli kullanıldı ve plaka geometrisi ($10 \times 10 \times 20$) üniform katmanlı sonlu eleman kullanılarak meshlendi. Herbir sonlu eleman 125 katmandan oluşmakta ve plaka, kalınlığı boyunca kompozisyonel olarak değişen 2500 katmandan oluşmaktadır. Böylece herbir katmanın kalınlığı $0.4\mu m$'dir. Tüm ısıl şartlar için referans sıcaklık 25°C olup üst ve alt yüzey sıcaklıkları sırasıyla 800°C ve 1000°C alınmıştır.

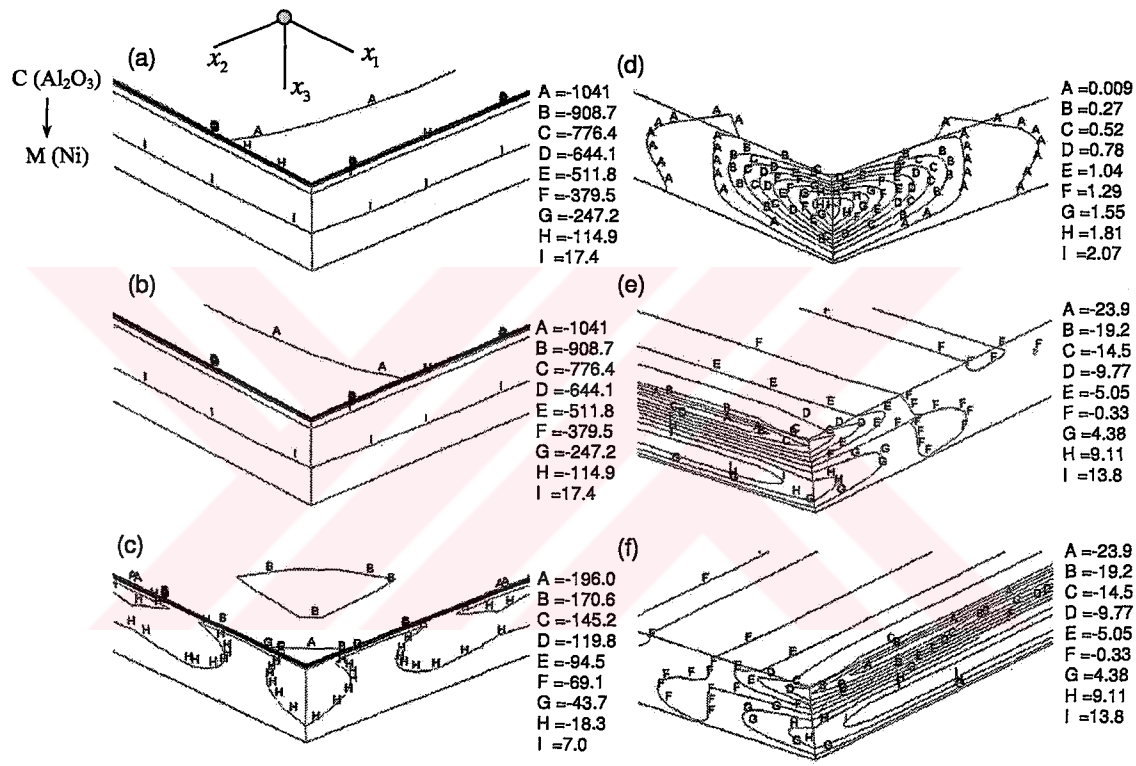
4.4.1 Üniform Sıcaklık Dağılımı

Kalınlığı boyunca kompozisyonel değişimi belli olan bir fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın ısıl gerilme durumunu belirlemek amacıyla, temel olarak Ni–Al_2O_3 plaka sistemi incelendi. Plaka kalınlığı boyunca üniform sıcaklık

dağılımı;

$$\Delta T = -975°C \tag{4.39}$$

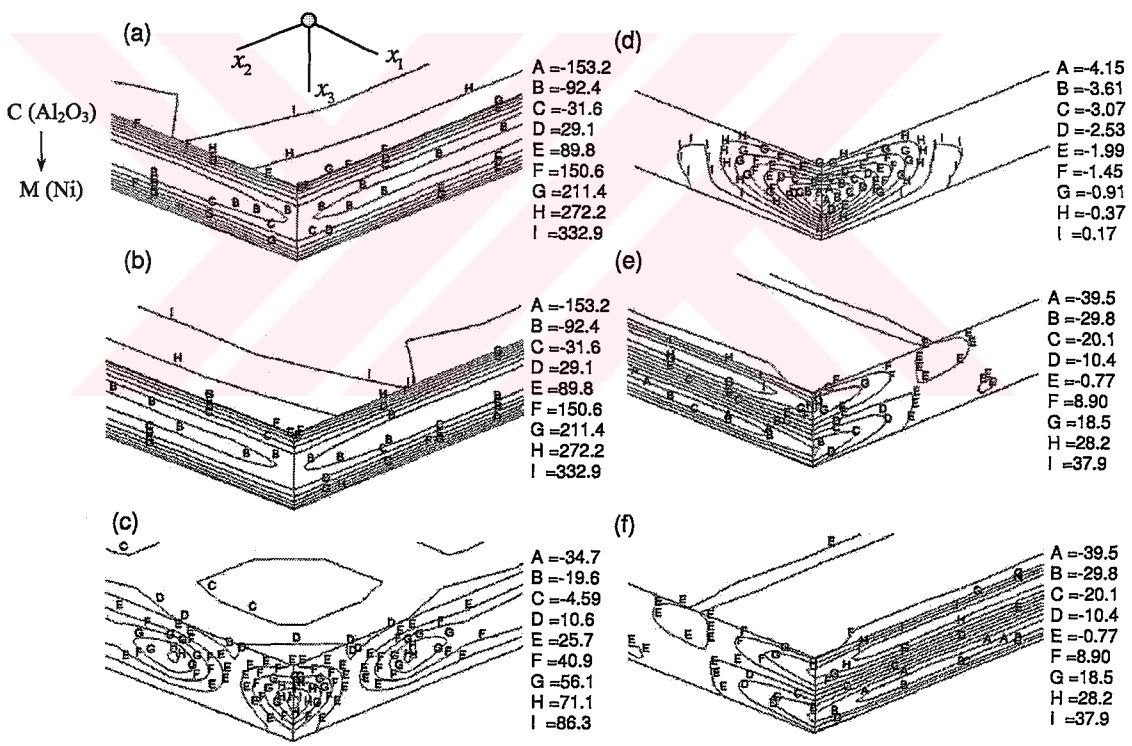
olarak belirlendi ve Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın gerilme analizi kompozisyonel gradyant n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için yapıldı. Plaka kalınlığı boyunca sırasıyla kompozisyonel gradyant n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için normal gerilme bileşenleri σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} ve kayma gerilmesi bileşenleri σ_{12}, σ_{23}, σ_{13} Şekil 4.4-6'da gösterilmiştir. n= 0.1 durumu için, seramikçe zengin yüzey oldukça yüksek değerde basma normal



Şekil 4.4: Üniform sıcaklık alanına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki normal gerilme (a) σ_{11}, (b) σ_{22}, (c) σ_{33} ve kayma gerilmesi (d) σ_{12}, (e) σ_{23}, (f) σ_{13} dağılımları (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).

gerilmesi σ_{11} ve σ_{22} dağılımına maruzdur (Şekil 4.4a,b). Plaka kalınlığı boyunca metal bileşen Ni baskın durumda olduğu için seramikçe zengin yüzey ve bu yüzeye yakın olan bölgeler haricinde plaka düşük değerde gerilme dağılımına sahiptir. Normal gerilme σ_{33}'ün değeri σ_{11} ve σ_{22}'ye oranla oldukça küçüktür (Şekil 4.4c). Plakanın serbest köşesi oldukça düşük değerde kayma gerilmesi σ_{12} dağılımına sahip iken (Şekil 4.4d), kayma gerilmesi bileşenleri σ_{23}, σ_{13} plaka kalınlığı boyunca üniform olarak dağılmış ve dikkate değer mertebededirler (Şekil 4.4e,f).

n= 1.0 durumu için, Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın üniform sıcaklık dağılımı altındaki normal gerilme bileşenleri σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} ve kayma gerilmesi bileşenleri σ_{12}, σ_{23}, σ_{13} dağılımları Şekil 4.5'de verilmiştir. n= 0.1 için seramikçe zengin yüzey basma gerilmesine maruz iken metalce zengin yüzey çekme gerilmesine maruzdu. Halbuki, n= 1.0 için plaka kalınlığı boyunca normal gerilme dağılımları daha küçük değerde ve süreklilik gösterecek şekilde ortaya çıkmıştır (Şekil 4.5a,b,c). Nitekim kompozisyonel gradyantın lineer (n= 1.0) olduğu durumda, n= 0.1 durumunun tersine normal gerilmeler seramikçe zengin yüzeyde çekme tarzında oluşmuştur. Bununla birlikte, metalce zengin yüzeyde yine çekme normal gerilmesi meydana gelmiş ve n= 0.1 durumundan daha yüksek değerdedir. Ayrıca, plaka kesitinin orta bölgeleri basma gerilmelerine maruzdur. Plaka kalınlığı boyunca

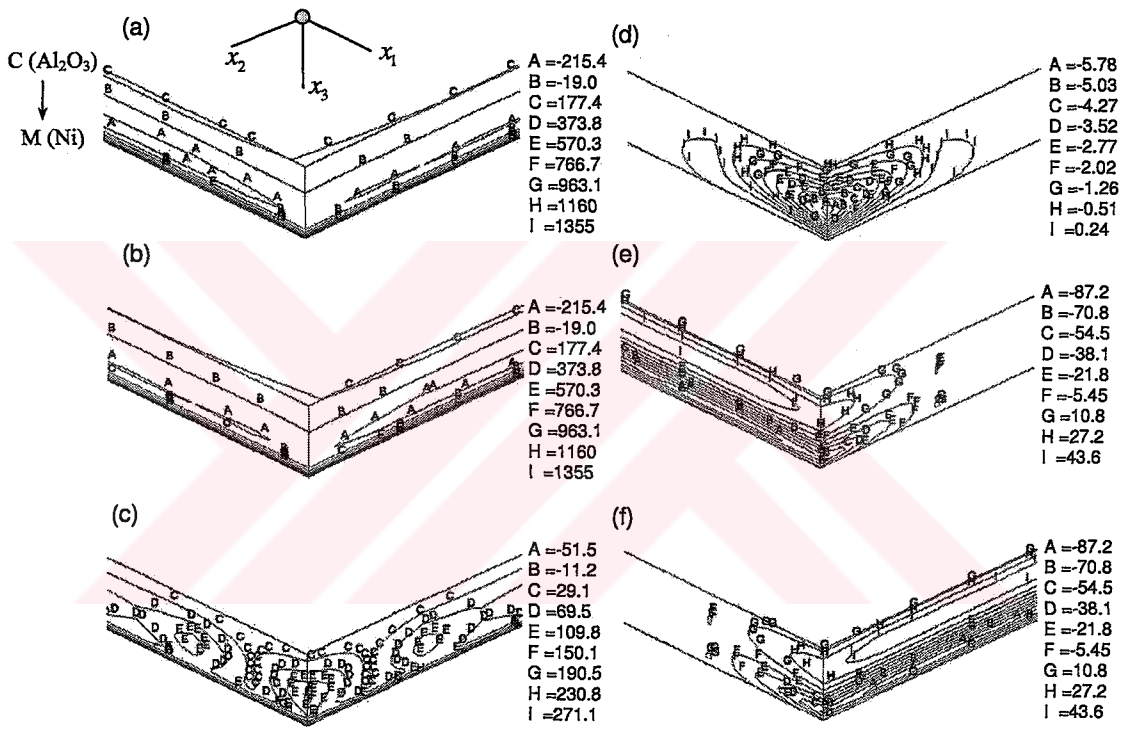


Şekil 4.5: Üniform sıcaklık alanına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki normal gerilme (a) σ_{11}, (b) σ_{22}, (c) σ_{33} ve kayma gerilmesi (d) σ_{12}, (e) σ_{23}, (f) σ_{13} dağılımları (n= 1.0) (Tüm gerilmeler MPa).

kayma gerilmeleri σ_{12}, σ_{23}, σ_{13} dağılımlarının kompozisyonel gradyanttan çok fazla etkilenmediği gözlenmiştir. Böylece, plaka kalınlığı boyunca dengeli kayma gerilmesi σ_{23} ve σ_{13} dağılımları gözlemlenmiştir. Buna ilave olarak, tüm kayma gerilmesi

bileşenlerinin %125 oranında arttığı görülmektedir.

$n=$ 10.0 durumu için, çekme normal gerilmeleri σ_{11} ve σ_{22}'nin metalce zengin yüzeyde toplandığı ve dikkate değer oranda arttığı gözlenir iken, diğer bölgelerde düşük çekme gerilmeleri ortaya çıkmıştır. Normal gerilmeler σ_{11} ve σ_{22}'nin plaka kalınlığının orta bölgelerinde basma tarzında ortaya çıktığı ve çekme normal gerilmesi σ_{33}'ün dikkate değer bir orana ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.6a,b,c). Benzer tarzda, kayma gerilmeleri σ_{23} ve σ_{13}'ün plaka kalınlığı boyunca oldukça



Şekil 4.6: Üniform sıcaklık alanına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki normal gerilme (a) σ_{11}, (b) σ_{22}, (c) σ_{33} ve kayma gerilmesi (d) σ_{12}, (e) σ_{23}, (f) σ_{13} dağılımları ($n=$ 10.0) (Tüm gerilmeler MPa).

üniform dağılımda oldukları ve metalce zengin yüzeyde en büyük değerlere ulaştıkları görülmektedir. Kayma gerilmesi σ_{12} plakanın serbest köşesinde yığılmakta ve kayma gerilmeleri σ_{23} ve σ_{13} kadar yüksek değerlerde olmadığı görülmektedir (Şekil 4.6d,e,f).

Görüldüğü gibi, normal ve kayma gerilmelerinin mertebesi ve kalınlık boyunca dağılımları kompozisyonel gradyanttan oldukça etkilenmektedir. Bundan dolayı,

plaka kalınlığı boyunca daha makul artık gerilme dağılımlarının elde edilmesinde optimum kompozisyonel gradyantın seçimi önem arzeder.

4.4.1.1 Kompozisyonel Gradyantın "n " Etkisi

Kompozisyonel gradyantın, plaka kalınlığı boyunca normal ve kayma gerilmeleri üzerindeki etkisini belirlemek için Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC malzeme sistemlerinden oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üniform sıcaklık alanı altındaki ısıl gerilme analizleri kompozisyonel gradyant n= 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için yapıldı. Her üç malzeme sistemi içinde düzlem içi normal gerilmeler σ_{11} ve σ_{22} benzer dağılımlar gösterdiği için (Şekil 4.4-6) sadece σ_{11} düzlem içi normal gerilmesine ait değişimler gösterilmiştir (Şekil 4.7,10 ve 13). Ayrıca plaka kalınlığı doğrultusundaki düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, σ_{11} ve σ_{22} düzlem içi normal gerilmelerine oranla çok daha küçük olmasına rağmen yinede özellikle kompozisyonel gradyantın n= 0.1 ve 10.0 değerlerinde, dikkate değer oranlara ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.8,11,14).

i) Ni–Al_2O_3 **sistemi**

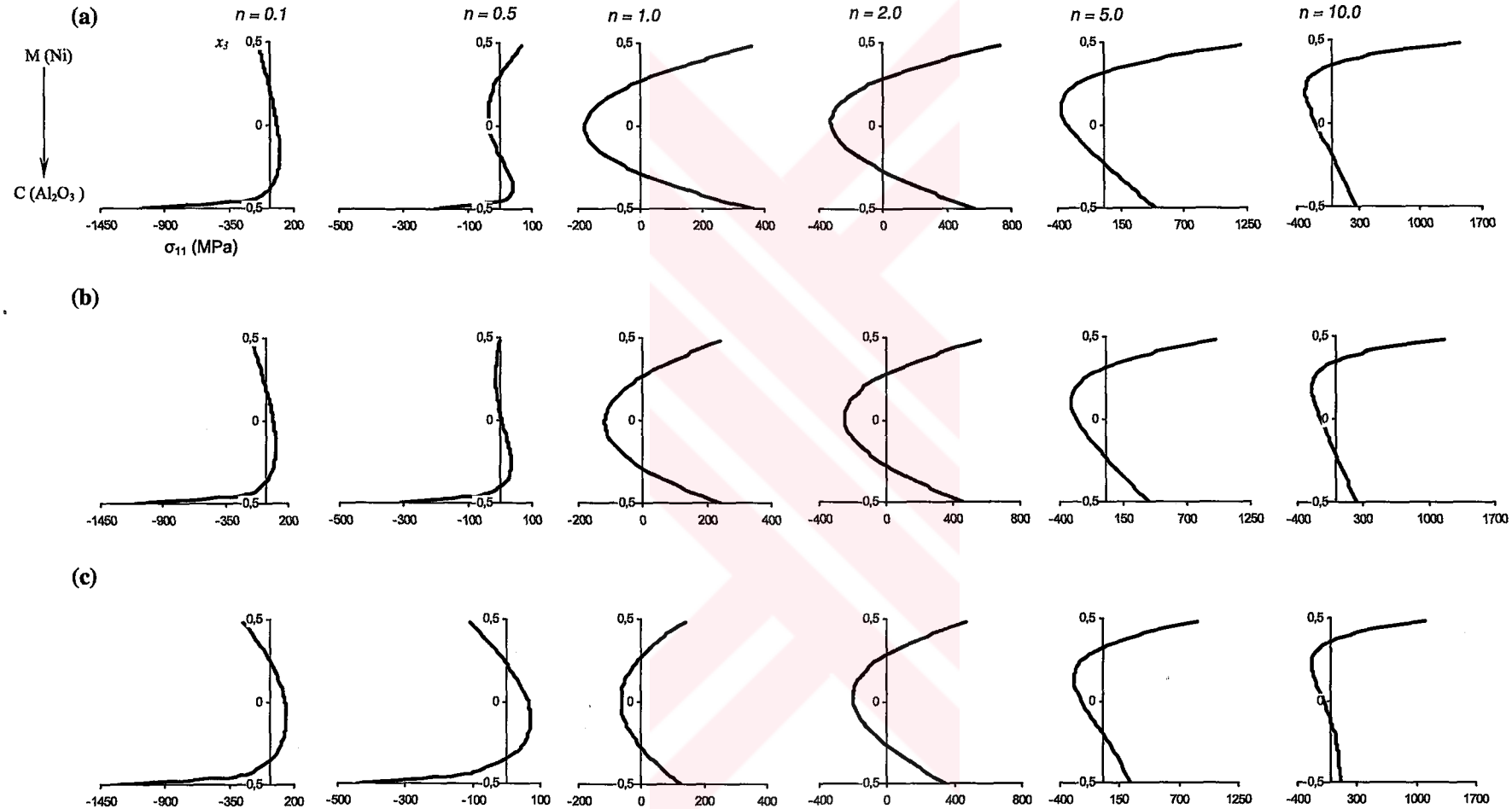
Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın n= 0.1 durumu için düzlem içi normal gerilme σ_{11}, metal ve seramik yüzeylerde basma gerilmesi şeklinde ve plaka kalınlığının ortasında geniş bir bölgede ise çekme gerilmesi şeklinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.7a). n= 0.5 için seramik yüzey, n= 0.1 durumuna oranla daha düşük değerde basma gerilmesine maruz iken metal yüzey düşük çekme gerilmesine maruzdur. En büyük düzlem içi normal gerilmeler seramik yüzeyde oluşmaktadır. n= 1.0 ve n= 2.0 için, plaka kalınlığı boyunca bir üniform normal gerilme σ_{11} dağılımı gözlendi. Seramik ve metal yüzeyler hemen hemen aynı değerdeki çekme gerilmelerine maruz iken plaka kalınlığının orta bölgesinde basma gerilmeleri oluştu. Bununla birlikte n= 5.0 ve n= 10.0 durumu için fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın normal gerilme σ_{11} seviyesi metal yüzeyde artarken seramik yüzeyde azalmış olduğu görülmektedir. Grafiklerden anlaşılacağı gibi kompozisyonel gradyantın 1.0'den küçük değerlerinde σ_{11} normal gerilmeleri seramik yüzeyde oldukça yüksek basma gerilmesi şeklinde oluşurken, metal yüzeyde ihmal edilebilir seviyede çekme gerilmesi tarzındadır. $n > 1.0$ için normal gerilme

σ_{11} her iki yüzeyde de çekme gerilmesi tarzında oluşmuştur.

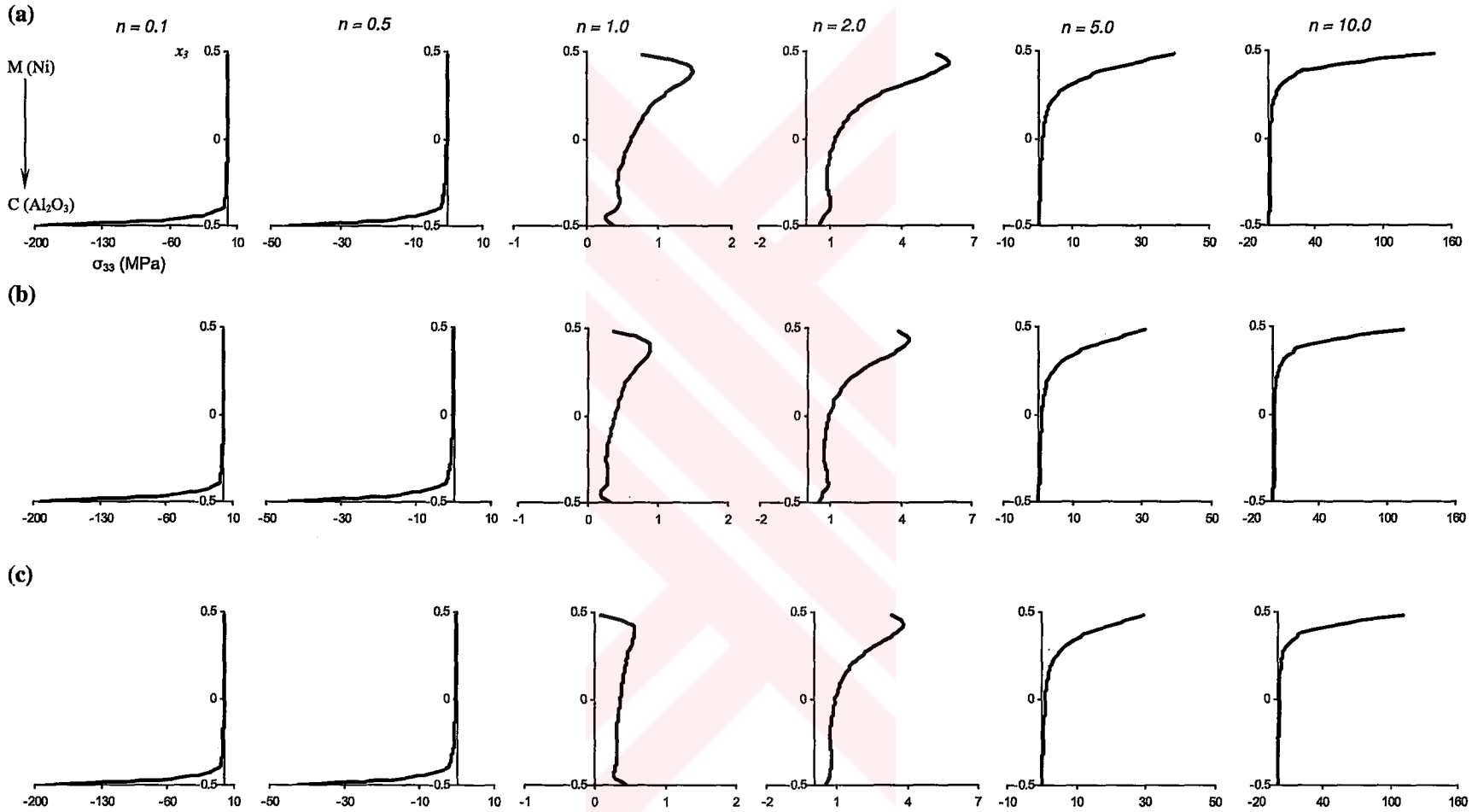
σ_{33} normal gerilmesi, kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 olduğunda seramik yüzeyde basma gerilmesi şeklinde görülürken diğer bölgelerde hemen hemen sıfır değerindedir (Şekil 4.8a). $n=$ 0.5 iken σ_{33} normal gerilme profili $n=$ 0.1 durumunun benzeridir. Fakat gerilmenin değeri %75 daha küçüktür. $n=$ 1.0 ve 2.0 iken plaka kalınlığı boyunca σ_{33} gerilmesi ihmal edilebilecek kadar küçüktür. $n=$ 5.0 ve 10.0 olduğunda metal yüzey çekme gerilmesine maruz iken diğer bölgelerdeki gerilme değeri sıfır olmaktadır. $n=$ 10.0 için metal yüzeydeki çekme gerilmesinin değeri $n=$ 5.0 durumundan %75 daha fazla olduğu görülmektedir. Plaka kalınlığı boyunca üniform sıcaklık dağılımı için Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakada $n=$ 0.1, 1.0 ve 10.0 için düzlem içi kayma gerilmesi bileşenleri σ_{23} ve σ_{13} daha baskındır ve Şekil 4.4-6'da gösterilmektedir. Buna göre, Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plaka için kompozisyonel gradyantın kalınlık boyunca kayma gerilmeleri üzerindeki etkisi Şekil 4.9(a)'da sadece σ_{13} kayma gerilmesi için gösterilmiştir. Kayma gerilmesi σ_{13}'ün seviyesi normal gerilme σ_{11}'e oranla 24-27 kat daha azdır. $n=$ 0.1 için kayma gerilmesi plaka kalınlığı boyunca parabolik bir değişime sahiptir, böylece σ_{13} kayma gerilmesinin sıfır olduğu bir düzlem mevcuttur ve zıt yönlü iki kayma gerilmesi bölgesi vardır. Kompozisyonel gradyant "n " arttıkça kayma gerilmesi σ_{13}'ün değer olarak arttığı görülmekte ancak yönü değişmektedir.

Sonuç olarak kayma gerilmesi σ_{13}'ün dağılımı $n=$ 0.5 için en düşük $n=$ 10.0 için en yüksek değerler erişmektedir.

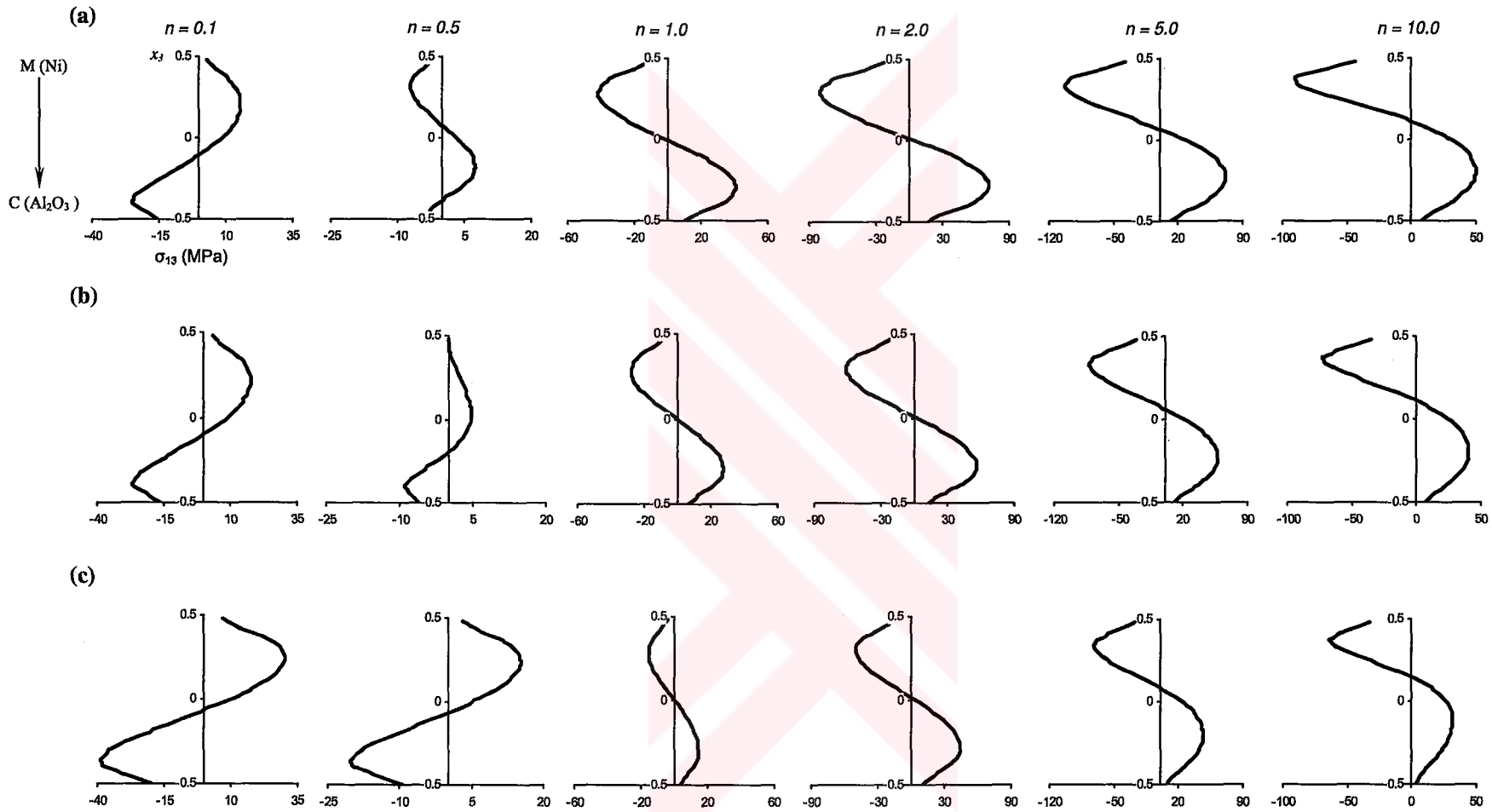
Bununla beraber, en büyük düzlem içi kayma gerilmesi σ_{13} seramik ve metal fazlı bölgelerde oluşmamaktadır. En büyük kayma gerilmeleri plakanın üst ve alt yüzeylerinden plaka kalınlığının yaklaşık dörtte birlik mesafesinde meydana gelmektedir. Kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant "n" artmasına rağmen metal ve seramik yüzeylerde oldukça küçük değerlerde olduğu görülmektedir. $n=$ 0.1 için seramik yüzeyde metal yüzeyden daha yüksek iken $n=$ 10.0 için metal yüzeyde daha yüksektir. Buna ilave olarak, kayma gerilmeleri seramik ve metalce zengin yüzeylerde zıt yönlüdür. Anlaşılacağı üzere kompozisyonel gradyantın $n > 2.0$ olduğu değerlerde kayma gerilmesi katmanlar arasıda hasarların oluşmasına katkıda



Şekil 4.7: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).



Şekil 4.8: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).



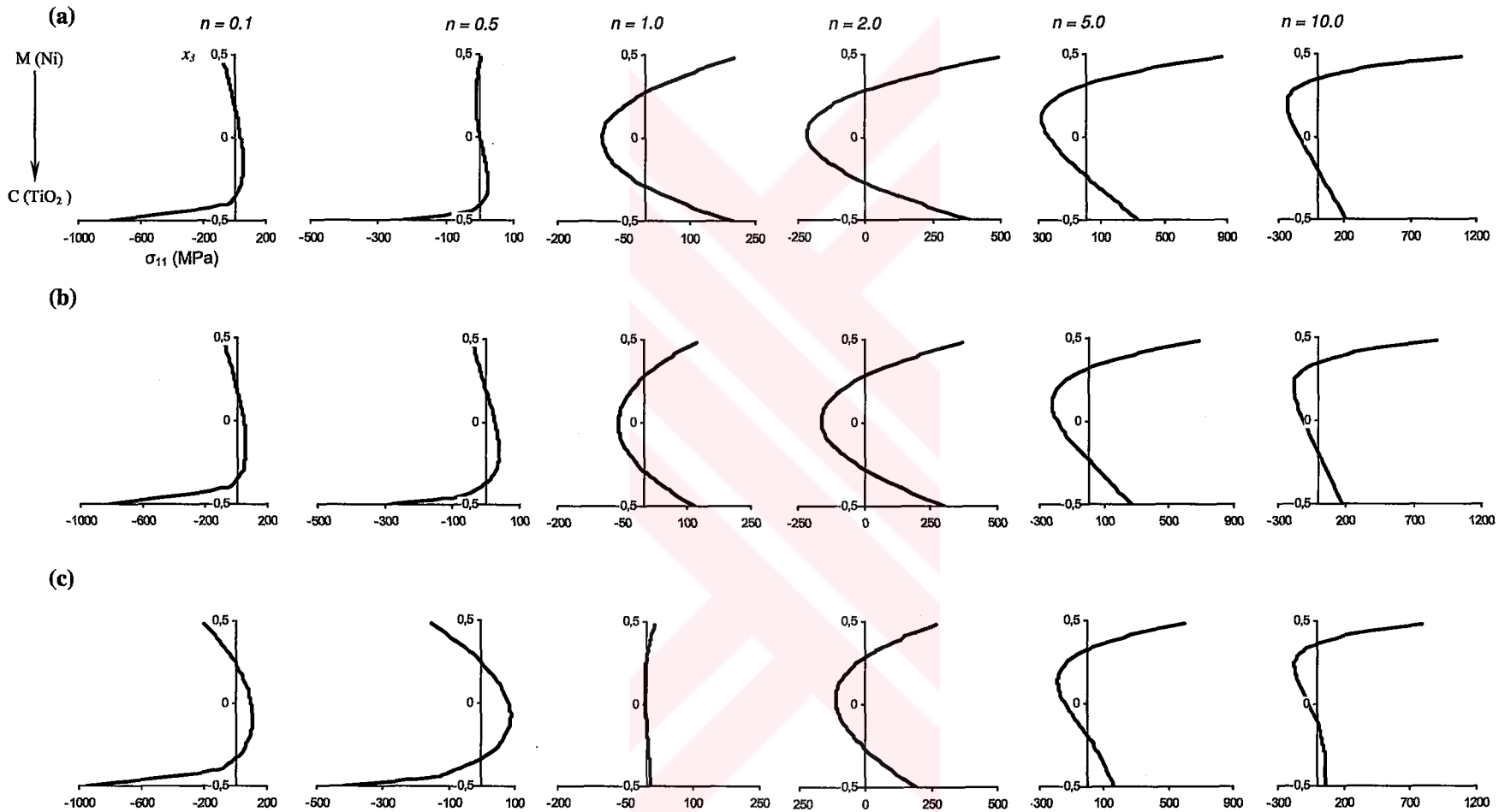
Şekil 4.9: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).

bulunabilir. Plaka kalınlığı boyunca üniform kayma gerilmesi dağılımı n= 1.0-2.0 için elde edilmişken en küçük kayma gerilmesi σ_{13} dağılımı n= 0.5 için ortaya çıkmıştır.

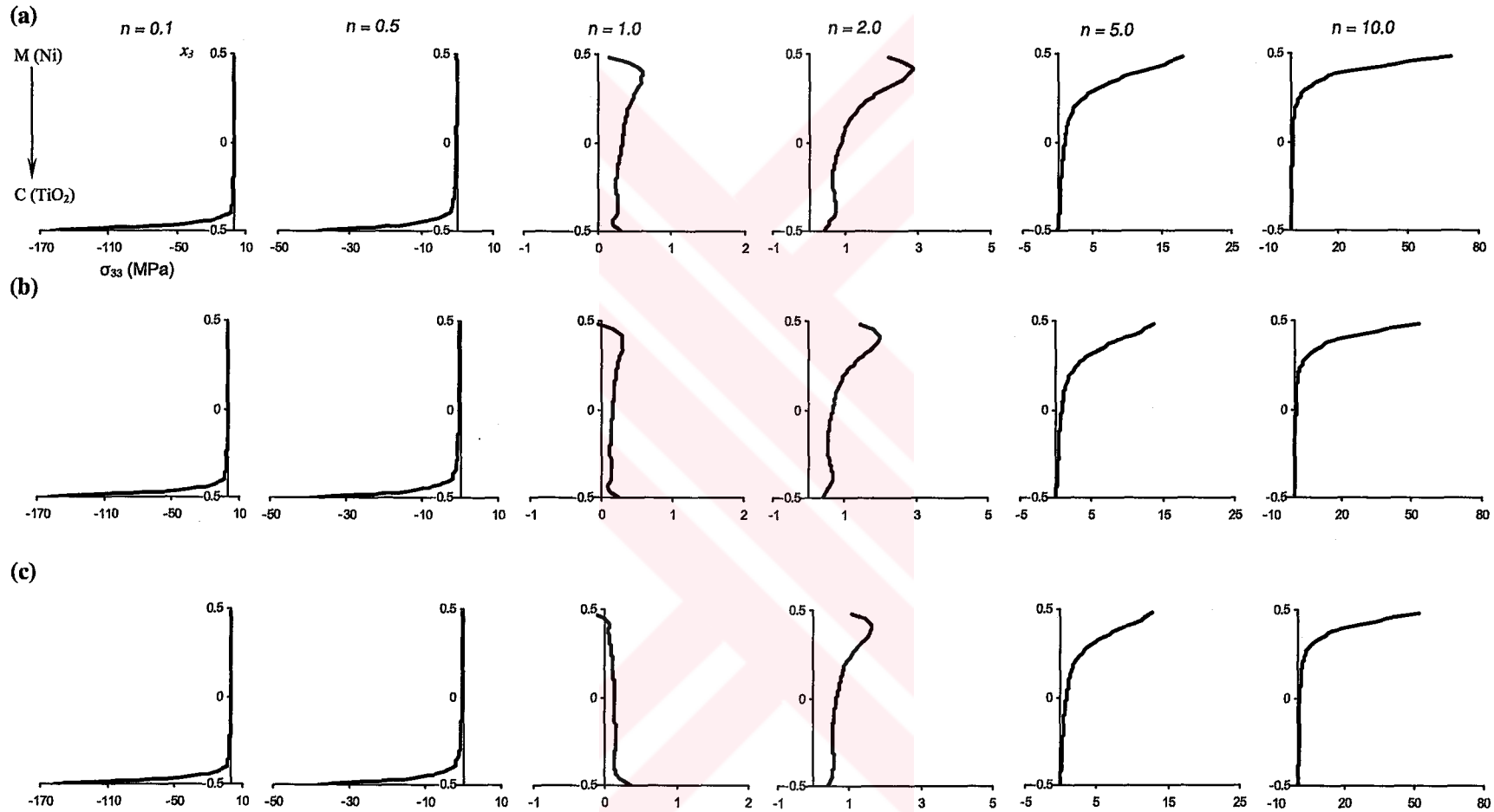
ii) Ni–TiO_2 **sistemi**

Isıl artık gerilmeler üzerinde farklı malzeme sistemlerinin etkilerini araştırmak amacıyla Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakanın üniform sıcaklık alanı için ısıl artık gerilme analizi yapıldı. Kompozisyonel gradyant $n <$ 1.0 için plakanın her iki yüzeyinde de normal gerilmeler σ_{11} basma tarzındadır. Özellikle, seramik olan yüzey oldukça yüksek basma gerilmesine maruzken plaka kalınlığının orta bölgesindeki geniş bir alan düşük çekme gerilmesine maruzdur (Şekil 4.10a). Kompozisyonel gradyantın "n " değeri arttıkça normal gerilme büyük oranda artmakta ve seramik ve metal yüzeylerin her ikisinde çekme gerilmesi olarak ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber, normal gerilme σ_{11} metal yüzeyde daha yüksek değerde ve plaka kalınlığının ortasındaki geniş bölgede yine basma gerilmeleri oluşmaktadır.

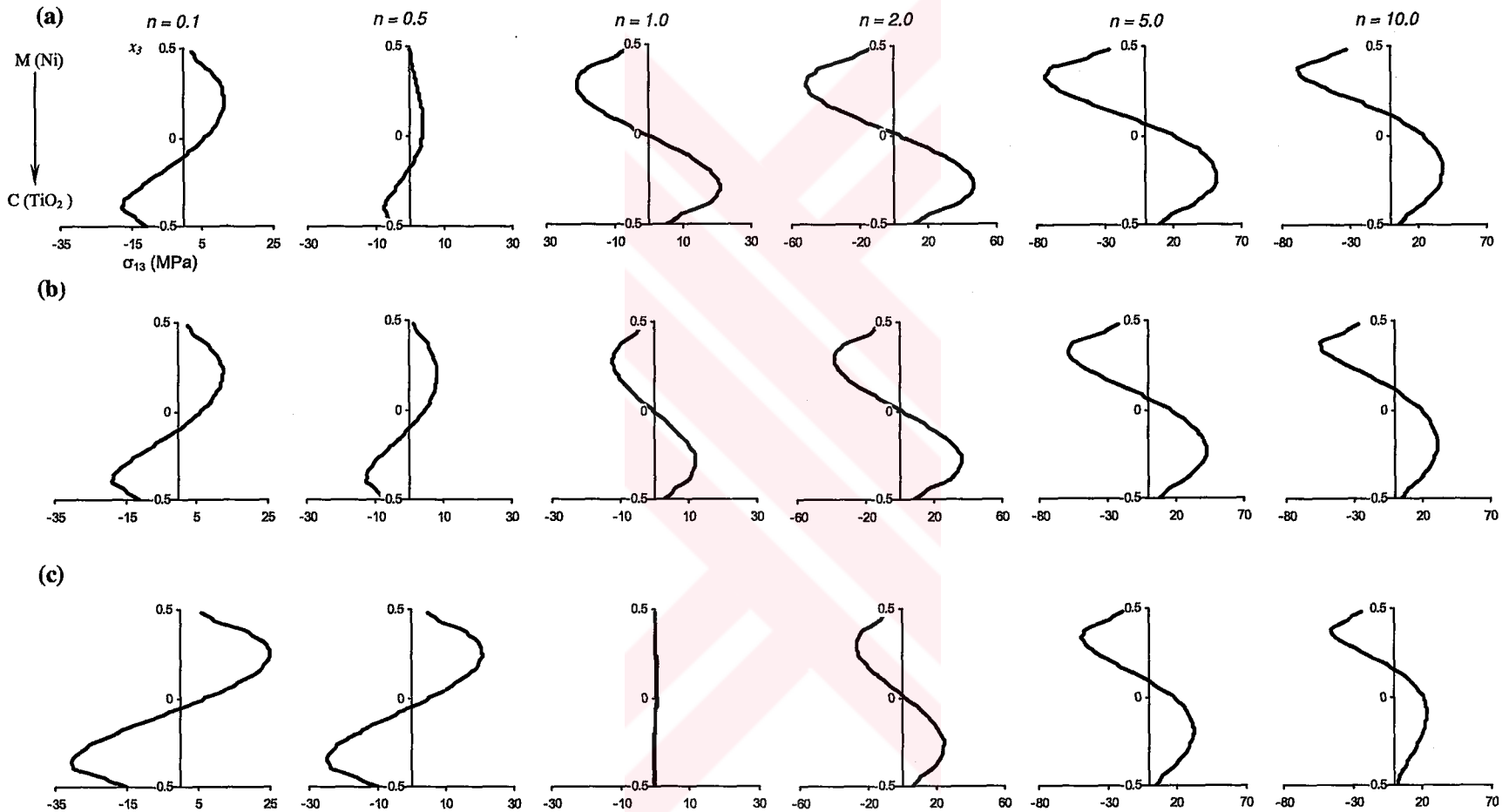
Ni–TiO_2 sistemindeki normal gerilme σ_{11}, Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın σ_{11} normal gerilmesi (Şekil 4.7a) ile karşılaştırıldığında normal gerilme profilinin plaka kalınlığı boyunca değişiminin aynı kaldığı görülmektedir. Seramikçe zengin bölgede normal gerilme σ_{11}'in benzerlik göstermesinin sebebi TiO_2 ve Al_2O_3 bileşenlerinin birbirlerine yakın mekanik ve ısıl özelliklere sahip olmalarıdır. Ni–Al_2O_3 ve Ni–TiO_2 sistemlerindeki metal bileşen Ni'e bakıldığında normal gerilme σ_{11}'in Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanınkinden n= 1.0 ve n= 10.0 için sırasıyla %90 ve %60 daha küçük olduğu görülmektedir. Tablo 4.1'de gösterildiği gibi TiO_2'in ısıl genleşme katsayısı ($\alpha_{TiO_2} = 8.9 \times 10^{-6}/°\text{C}$), Al_2O_3'in ısıl genleşme katsayısından ($\alpha_{Al_2O_3} = 7.4 \times 10^{-6}/°\text{C}$) daha büyüktür, ayrıca metal bileşen Ni'in ısıl genleşme katsayısı $\alpha_{Ni} = 15 \times 10^{-6}/°\text{C}$'dir. Basit bir hesaplamayla Ni–Al_2O_3 sisteminin ısıl şekil değiştirme farkının $\Delta\varepsilon^t = (\alpha_{Ni} - \alpha_{Al_2O_3})\,\Delta T = 7.6 \times 10^{-6}$ /°C, Ni–TiO_2 sisteminin ısıl şekil değiştirme farkından $\Delta\varepsilon^t = (\alpha_{Ni} - \alpha_{TiO_2})\,\Delta T = 6.1 \times 10^{-6}$ /°C daha yüksek olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, normal gerilme σ_{11}'in Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakada, Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakadan daha düşük seviyede olması



Şekil 4.10: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).



Şekil 4.11: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).



Şekil 4.12: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).

beklenebilir (Şekil 4.7a ve 10a). Fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın seramik bileşeninin ısıl genleşme katsayısının, ısıl artık gerilmenin (σ_{11}) büyüklüğü üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlenirken kalınlık boyunca σ_{11}'in değişim profilini etkilememektedir. Bundan dolayı, kullanılan metal ve seramik bileşenlerin ısıl genleşme katsayılarının değerleri birbirlerine yakın olursa metal ve seramik arasındaki ısıl şekil değiştirme farkı azalacağından, ısıl artık gerilmeler de azalır.

Ni–TiO_2 sistemi için plaka kalınlığı boyunca σ_{33} normal gerilmesinin değişimi Şekil 4.11(a)'da gösterilmiştir. Gerilmenin tüm kompozisyonel gradyantlardaki davranışı Ni–Al_2O_3 ile aynıdır. Fakat $n=$ 0.1 ve 0.5 iken σ_{33} gerilmesi %15 daha küçük, $n=$ 5.0 ve 10.0 olduğunda ise %50 daha küçük değerdedir.

Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca kayma gerilmesi σ_{13}'ün değişimi Şekil 4.12(a)'da gösterilmiştir. Tüm kompozisyonel gradyantlar $n=$ 0.1-10.0 için Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plaka, Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakayla benzer kayma gerilmesi dağılımları göstermektedir. Böylece seramik ve metal bileşenlerin, plaka kalınlığı boyunca kayma gerilmesi σ_{13}'ün profili üzerinde etkilerinin olmadığı anlaşılmaktadır. Halbuki, metalce ve seramikçe zengin bölgelerdeki kayma gerilmesi σ_{13}'ün değeri $n=$ 1.0 için %27 ve $n=$ 10.0 için %14 oranlarında azalmaktadır (Şekil 4.9a ve 12a).

Sonuç olarak, seramik bileşenin ısıl ve mekanik özelliklerinin, plaka kalınlığı boyunca oluşan normal gerilme σ_{11} ve kayma gerilmesi σ_{13}'ün profillerinden ziyade büyüklükleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

iii) Ti–SiC sistemi

İlave olarak, bileşenlerin elastisite modülleri oranı $E_c/E_m = 4.318$ ve ısıl genleşme katsayıları farkı $\alpha_m - \alpha_c = 5.8 \times 10^{-6}$ /°C olan Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakadaki ısıl artık gerilmeler araştırıldı. Metal ve seramiğin elastisite modülü ve ısıl genleşme katsayılarının oranlarının ısıl artık gerilmeler üzerindeki etkileri tespit edildi. Ni–Al_2O_3 ve Ni–TiO_2'nin de elastisite modülü oranları sırasıyla 2.71 ve 2.0'dır. Ti–SiC sisteminde kalınlık boyunca düzlem içi gerilme σ_{11}'deki değişim Şekil 4.13(a)'da gösterilmiştir. Isıl genleşme katsayısı ve elastisite modülü oranlarının

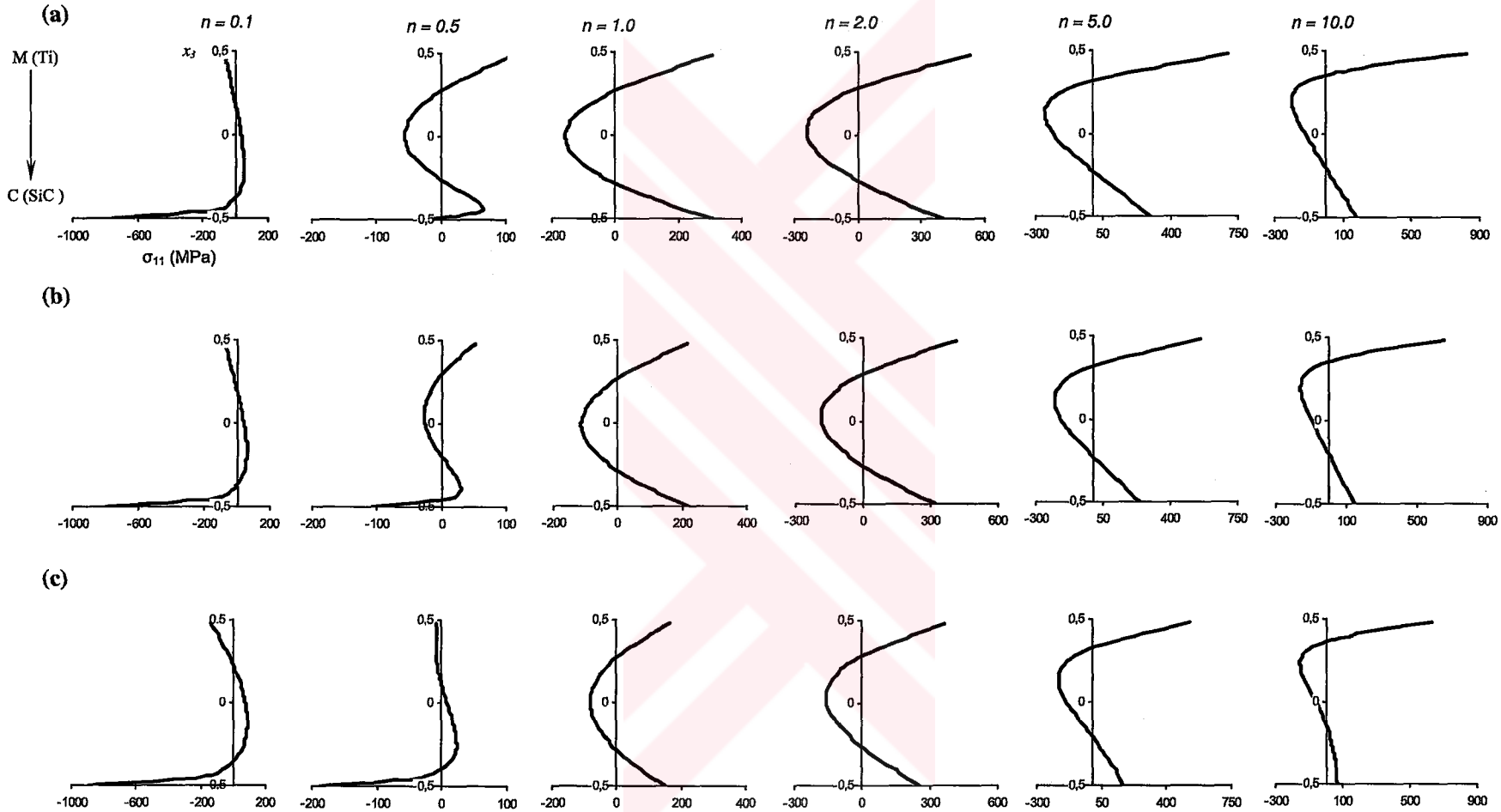
kalınlık boyunca normal gerilme σ_{11} dağılımının profili üzerinde çok küçük etkiye sahip oldukları, buna karşın gerilmenin büyüklüğü üzerinde oldukça etkili oldukları görülmüştür. SiC'ün elastisite modülü TiO_2 ve Al_2O_3'in elastisite modüllerinden daha yüksek olmasına rağmen, seramikçe zengin bölgede normal gerilme σ_{11}'in değeri Ni–Al_2O_3 ve Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarınkinden daha düşüktür (Şekil 4.13a). σ_{33} düzlem dışı normal gerilmesi $n=$ 0.1 ve 0.5 için Ni–Al_2O_3 ve Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarınkiyle aynı profile sahiptir, ancak değer olarak daha küçüktür (Şekil 4.14a). Yine $n=$ 1.0 ve 2.0 için σ_{33} normal gerilmesi ihmal edilebilecek kadar küçüktür. $n=$ 5.0 ve 10.0 iken σ_{33} gerilmesi Ni–Al_2O_3 ve Ni–TiO_2 sistemlerinden farklı olarak, hem metal hem de seramik yüzeylerde sıfırdır. Gerilmenin değeri %100 metal yüzeye yakın bölgede en büyük değere bir sıçrama yapmakta olup bu değer $n=$ 10.0'da $n=$ 5.0'den daha yüksektir. Buna ilaveten, kalınlık boyunca σ_{13} kayma gerilmesinin değişimi, Ni–Al_2O_3 ve Ni–TiO_2 fonksiyonel kademelendirilmiş plakalardaki σ_{13} kayma gerilmesi değişiminin benzer şekilde olduğu ve artan kompozisyonel gradyant "n" ile gerilmenin büyüklüğünde dikkate değer oranda artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.15a). Sonuç olarak, üniform sıcaklık alanına maruz fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın bileşenlerinin elastisite modülleri arasındaki orandan ziyade ısıl genleşme katsayıları arasındaki farkların ısıl artık normal gerilme σ_{11} ve kayma gerilmesi σ_{13} üzerinde daha etkili bir faktör olduğunu söyleyebiliriz. Bundan dolayı, metal ve seramik bileşenlerin ısıl özelliklerinin birbirlerine yakın değerlerde olması, plaka kalınlığı boyunca ısıl artık normal ve kayma gerilmelerinin azalması konusunda yararlı olacaktır.

4.4.2 Lineer Sıcaklık Değişimi

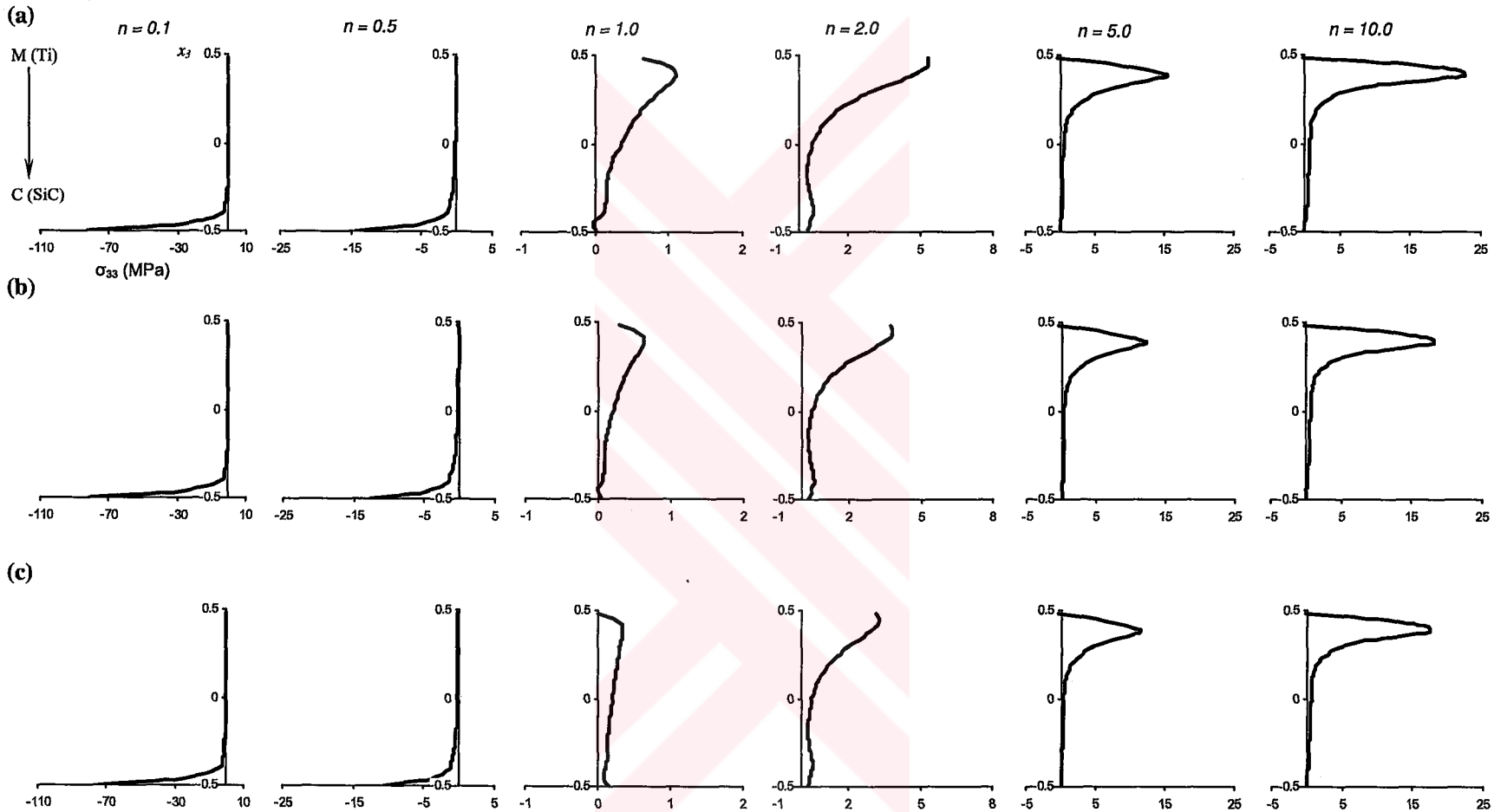
Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş kompozit plakalar, kalınlık boyunca lineer sıcaklık dağılımı için analiz edildi.

$$\Delta T(x_3) = 200\left(\frac{x_3}{h}\right) - 875 \tag{4.40}$$

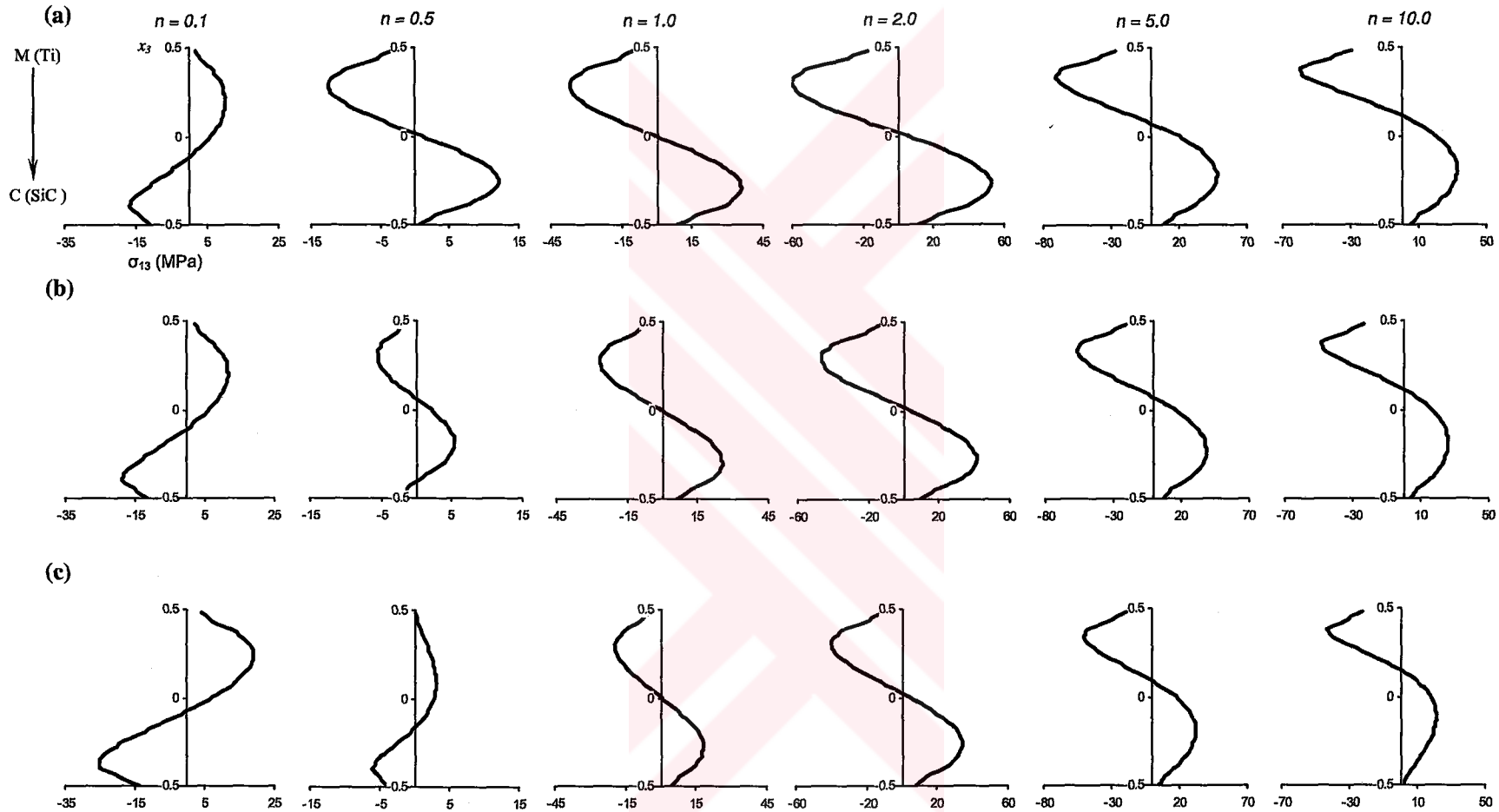
burada, x_3 plaka kalınlığı h boyunca mesafedir. Her üç Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın ısıl gerilme analizleri kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1-10.0 için gerçekleştirildi ve plakaların kalınlıkları boyunca düzlem



Şekil 4.13: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir *Ti–SiC* fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).



Şekil 4.14: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı normal gerilme σ_{33}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).



Şekil 4.15: (a) üniform, (b) lineer ve (c) parabolik sıcaklık alanlarına maruz bir Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13}'ün, kompozisyonel gradyant n ile değişimleri (gerilmeler MPa).

içi artık gerilme σ_{11}'deki değişimler sırasıyla Şekil 4.7,10,13(b)'de gösterilmiştir. Ni–Al_2O_3 sistemi, üniform sıcaklık alanında elde edilen normal gerilme σ_{11} ile benzer dağılım sergilemektedir. Böylece, normal gerilme σ_{11}'in profilinin pek fazla değişmediği görülmektedir. Bununla birlikte, n= 0.1 için normal gerilme σ_{11} değeri çekme ve basma bölgelerinde azalmaktadır. σ_{13} artık normal gerilmesi, her üç malzeme sisteminin tüm kompozisyonel gradyantlarında üniform sıcaklık dağılımıyla aynı gerilme profillerine sahipken değer olarak daha küçük oldukları görülmektedir (Şekil 4.8b). Benzer şekilde, Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda, plaka kalınlığı boyunca kayma gerilmesi σ_{13}'ün değişimi üzerinde sıcaklık dağılımı tipinin küçük bir etkiye sahip olduğu sırasıyla Şekil 4.9,12,15(b)'de görülmektedir. Üniform sıcaklık alanıyla karşılaştırıldığında, kayma gerilmesi σ_{13}'ün profili azda olsa değişmekte ve değeri de azalmaktadır. Normal gerilme σ_{11} ve kayma gerilmesi σ_{13}'ün büyüklüklerindeki farklar, sıcaklık alanı tipinden ziyade ısıl genleşme katsayılarının farkı nedeniyle oluşmaktadır.

4.4.3 Parabolik Sıcaklık Değişimi

Son olarak, Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC plakaların ısıl artık gerilme analizleri kompozisyonel gradyant n= 0.1-10.0 ve parabolik sıcaklık değişimi için yapıldı.

$$\Delta T\left(x_3\right) = -775 - \frac{200}{h^2}\left(x_3 - \frac{h}{2}\right)^2 \tag{4.41}$$

Her üç malzeme sistemi için düzlem içi normal gerilme σ_{11}'in kalınlık boyunca değişimi sırasıyla Şekil 4.7,10,13(c)'de gösterilmiştir. n= 0.1 ve 0.5 durumunda normal gerilme σ_{11} plaka kalınlığının ortasındaki geniş bir bölgede çekme tarzında oluşmuştur. Genelde, normal gerilme σ_{11} önemsiz oranlarda azalmakta ve normal gerilmenin plaka kalınlığı boyunca profili pek fazla değişmemektedir. Mevcut üniform, lineer ve parabolik sıcaklık değişimlerinde σ_{11} normal gerilmenin kalınlık boyunca, farklı büyüklüklerde benzer dağılımlara sahip olduğu görülmektedir. Parabolik sıcaklık dağılımı altındaki Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakalara ait σ_{33} artık normal gerilmeye ait değişimler Şekil 4.8,11,14(c)'de görülmektedir. Her üç malzeme sisteminde de σ_{33} normal gerilmesi yine üniform ve lineer sıcaklık dağılımlarıyla aynı gerilme profillerine sahipken

gerilme değerleri azda olsa küçüktür. Kayma gerilmesi σ_{13}'de her üç fonksiyonel kademelendirilmiş plaka için sırasıyla Şekil 4.9,12,15(c)'de gösterildiği gibi kalınlık boyunca benzer değişim göstermektedir. $n=$ 0.1 ve 0.5 durumu için kayma gerilmesi σ_{13} üniform ve lineer sıcaklık dağılımlarına göre daha yüksek değerdeyken $n=$ 1.0-10.0 için daha küçük değerlerdedir. Fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca σ_{13} kayma gerilmesinin profili hemen hemen aynı kalırken değeri değişmektedir.

Farklı bileşenlere sahip fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl gerilme analizleri göstermiştir ki; plaka kalınlığı boyunca sürekli ısıl alanlar, normal gerilme σ_{11} ve kayma gerilmesi σ_{13}'ün kalınlık boyunca oluşan profilleri üzerinde pek fazla etkili olmamaktadır. Kayma gerilmesi ve normal gerilme büyüklükleri, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaları oluşturan bileşenlerin ısıl genleşme katsayılarının farkına kuvvetle bağlıdır.

4.5 Sonuçlar

Bu çalışmada, plaka kalınlığı boyunca üniform, lineer ve parabolik sıcaklık alanlarına maruz Ni–Al_2O_3, Ni–TiO_2 ve Ti–SiC fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl artık gerilmeleri araştırıldı. Isıl artık gerilme problemi için katmanlı izoparametrik sonlu eleman tipi kullanılarak plaka kalınlığı boyunca 2500 katmanlı bir fonksiyonel kademelendirilmiş plaka modeli oluşturuldu. Aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

i) Gerilme bileşenleri arasında düzlem içi normal gerilme σ_{11} baskındır. Kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 ve 0.5 iken seramik ve metalce zengin bölgelerde basma gerilmeleri mevcutken, $n > 0.5$ için seramik ve metalce zengin bölgelerde çekme, plaka kalınlığının orta bölgelerinde ise basma gerilmeleri mevcuttur.

ii) Düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{13} plaka kalınlığı boyunca simetrik bir değişime sahiptir ve plakanın serbest kenarları boyunca öneme sahiptir. Seramik ve metalce zengin bölgelerde kayma gerilmesi σ_{13} çok küçük iken plakanın iç taraflarında en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Böylece plaka kalınlığı boyunca kayma gerilmesi σ_{13}'ün sıfır olduğu bir düzlem mevcuttur.

iii) Düzlem dışı σ_{33} normal gerilme bileşeni, kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 ve 10.0 iken plaka üzerinde dikkate değer bir etkiye sahiptir. Özellikle, $n < 1.0$ iken seramik yüzeyde basma gerilmesi tarzında, $n > 2.0$ iken metal yüzeyde çekme gerilmesi tarzında ortaya çıkmaktadır. Ayrıca farklı sıcaklık alanlarının σ_{33} gerilme profili üzerinde etkili olmadığı, gerilme değerlerini ise az miktarda değiştirdiği görülmüştür.

iv) Fonksiyonel kademlendirilmiş plakaların bileşenlerinin ısıl ve mekanik özellikleri, kalınlık boyunca oluşan normal gerilme σ_{11} ve kayma gerilmesi σ_{13}'ün profilleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Özellikle, bileşenlerin ısıl genleşme katsayılarının farkı artık normal ve kayma gerilmelerinin büyüklüğü üzerinde önemli bir role sahiptir.

v) Seramik bileşenin elastisite modülünün, normal ve kayma gerilmeleri üzerindeki etkisi ısıl genleşme katsayısına kıyasla daha küçüktür.

vi) Son olarak, plaka kalınlığı boyunca sürekli sıcaklık alanları neticesinde oluşan normal gerilmeler σ_{11} ve σ_{33} ile kayma gerilmesi σ_{13}'e ait sonuçlar benzerdir.

BÖLÜM 5

YAPISAL YÜKLERE MARUZ FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ TEK BİNDİRME BAĞLANTILARININ GERİLME ANALİZİ

5.1 Giriş

Bu bölümde, yapısal yüklere maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantılarının üç boyutlu lineer elastik gerilme analizleri yapıldı. Analizlerde mekanik özellikleri Tablo 5.1'de verilmiş olan epoxy yapıştırıcıyla birleştirilmiş metal (Ni) ve seramikten (Al_2O_3) oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar kullanıldı.

Analizler için, yapıştırıcı ve plakaların çekme ve kesme mukavemetlerinin değerlendirilmesinde, basit geometrisi nedeniyle tek bindirme bağlantı tipi kullanılmıştır. Bununla beraber, analizlerde üç boyutlu model kullanılarak gerilmeler üzerinde Poisson tesirleri de incelenmiştir.

Bağlantı sisteminde yapısal yüklemeler neticesinde oluşabilecek gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımını tespit edebilmek amacıyla sistemin çekme ve üç nokta eğme analizleri yapıldı. Çekme testi ile bağlantı sisteminin boyuna çekme kuvvetlerine

Tablo 5.1: Fonksiyonel kademelendirilmiş yapıştırıcı bağlantısını oluşturan plakaların ve yapıştırıcının mekanik özellikleri.

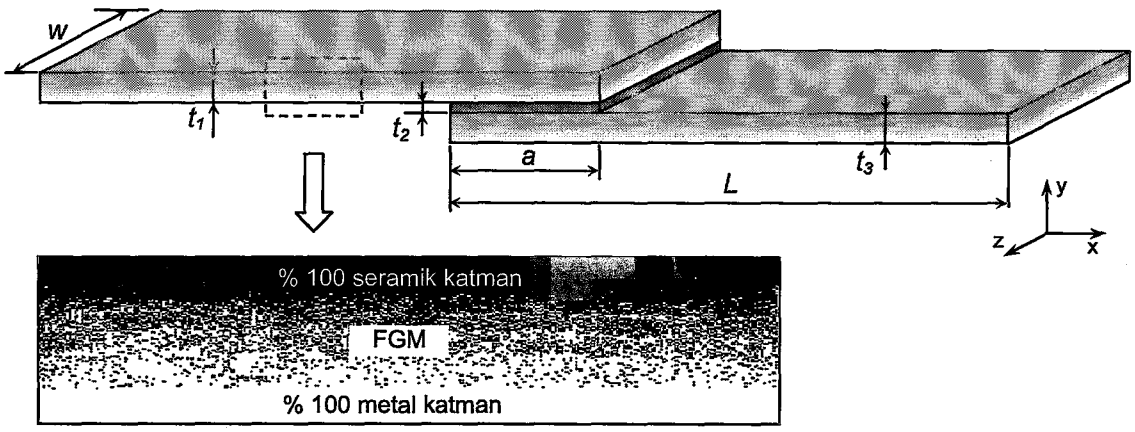
Özellikler	**Bileşenler**		**Epoxy yapıştırıcı**
	Ni	Al_2O_3	
E (GPa)	199.5	393	4.39
v	0.3	0.25	0.34

karşı mukavemeti incelenirken, üç nokta eğme testi ile de yapıştırıcının soyulmaya karşı mukavemeti incelenmiştir. Plakaları oluşturan bileşenlerin kompozisyonu ve katman sayısının plakalarda oluşan ısıl artık gerilme dağılımları üzerinde önemli etkilerinin olduğu Bölüm 3 ve 4'de yapılan düz fonksiyonel kademelendirilmiş plaka analizlerinde gösterilmişti. Burada, kompozisyonel gradyant ve katman sayısındaki değişimlerin yapısal yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantılarında meydana gelen gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımları üzerindeki etkileri araştırıldı. Bu amaçla plaka kalınlıkları boyunca katman sayısı k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250 için analizler tekrarlanırken kompozisyonel gradyant n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için de analizler tekrarlanmıştır.

5.2 Fonksiyonel Kademelendirilmiş Tek Bindirme Bağlantısının Çekme Analizi

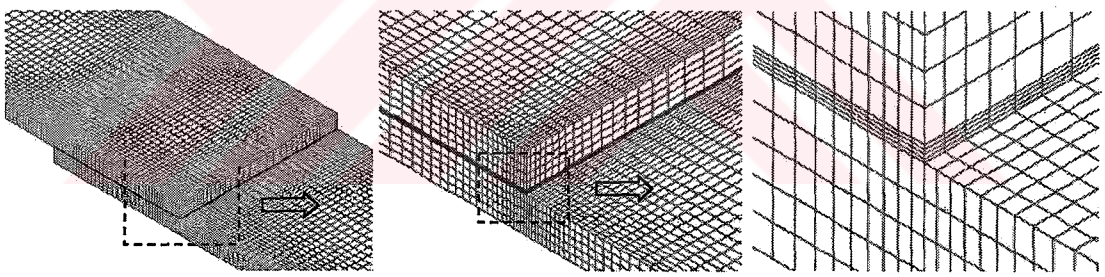
5.2.1 Teorik Model

Bu bölümde, çekme yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üç boyutlu gerilme analizleri yapıldı. Analizlerde Şekil 5.1'de gösterilen fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısı kullanıldı. Burada, yapıştırıcı tabakasının kalınlığı t_2= 0.2 mm, üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların kalınlığı sırasıyla t_1 ve t_3= 2 mm, plakaların uzunluğu L= 160 mm, plakaların genişliği ω= 25 mm ve bindirme bölgesinin uzunluğu a= 20 mm'dir. Plakaların üst ve alt yüzeyleri sırasıyla saf seramik (Al_2O_3) ve saf metal (Ni) olup malzeme bileşimi üst yüzeyden alt yüzeye bir üstel fonksiyona bağlı olarak değişmektedir. Üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların hacimsel oranları ve buna bağlı olarak elastisite modülü ve Poisson oranlarının hesaplanmasıyla ilgili ayrıntılar Bölüm 4.2'de verilmişti. Gerilme analizleri için üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında üç boyutlu sekiz düğüm noktalı ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesi olan izoparametrik katmanlı sonlu eleman kullanıldı. Bu elemanın sonlu elemanlar formülasyonu Bölüm 4.3'de ayrıntılı anlatılmıştı. Buna ilave olarak, yapıştırıcı tabakasının sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında üç boyutlu sekiz düğüm noktalı ve her düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahip olan yapısal sonlu eleman kullanıldı. Plakalar kalınlık boyunca 5 elemana bölünürken



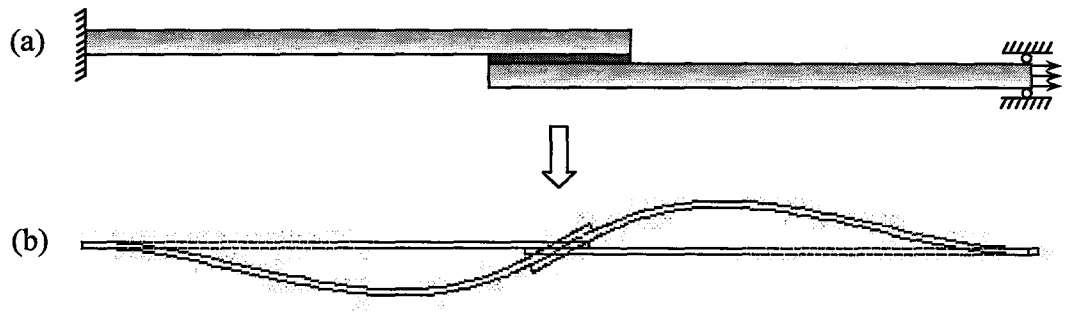
Şekil 5.1: Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısı.

yapıştırıcı tabakası 4 elemana bölündü. Ayrıca, yapıştırıcı serbest uçları tatbik edilen çekme yükü neticesinde yüksek gerilme yığılmalarına maruz kaldığı için bu kritik bölgelerde daha yoğun eleman kullanılarak hesaplamalarda daha doğru neticelerin elde edilebilmesi amaçlanmıştır (Şekil 5.2). Tek bindirme bağlantısının çekme analizi



Şekil 5.2: Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının mesh ayrıntıları.

için, alt plaka sağ ucunun 0.1 mm yatay doğrultuda hareket etmesine müsaade edilirken üst plakanın sol ucu her yönde sabitlenmiştir (Şekil 5.3a). Oluşan çekme yükü neticesinde bindirme bölgesinin yüksek rotasyonlara maruz kaldığı görülmüş ve buna bağlı olarak da yapıştırıcı serbest uçlarında yüksek eğilme momentleri ve yüksek soyulma gerilmelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri Şekil 5.3b'de görülmektedir. Uygulanan çekme yükü neticesinde, üst plakanın alt yüzeyi ve alt plakanın üst yüzeyi çekmeye maruzken, alt plakanın alt yüzeyi ve üst plakanın üst yüzeyi basmaya maruzdur (Şekil 5.3b).

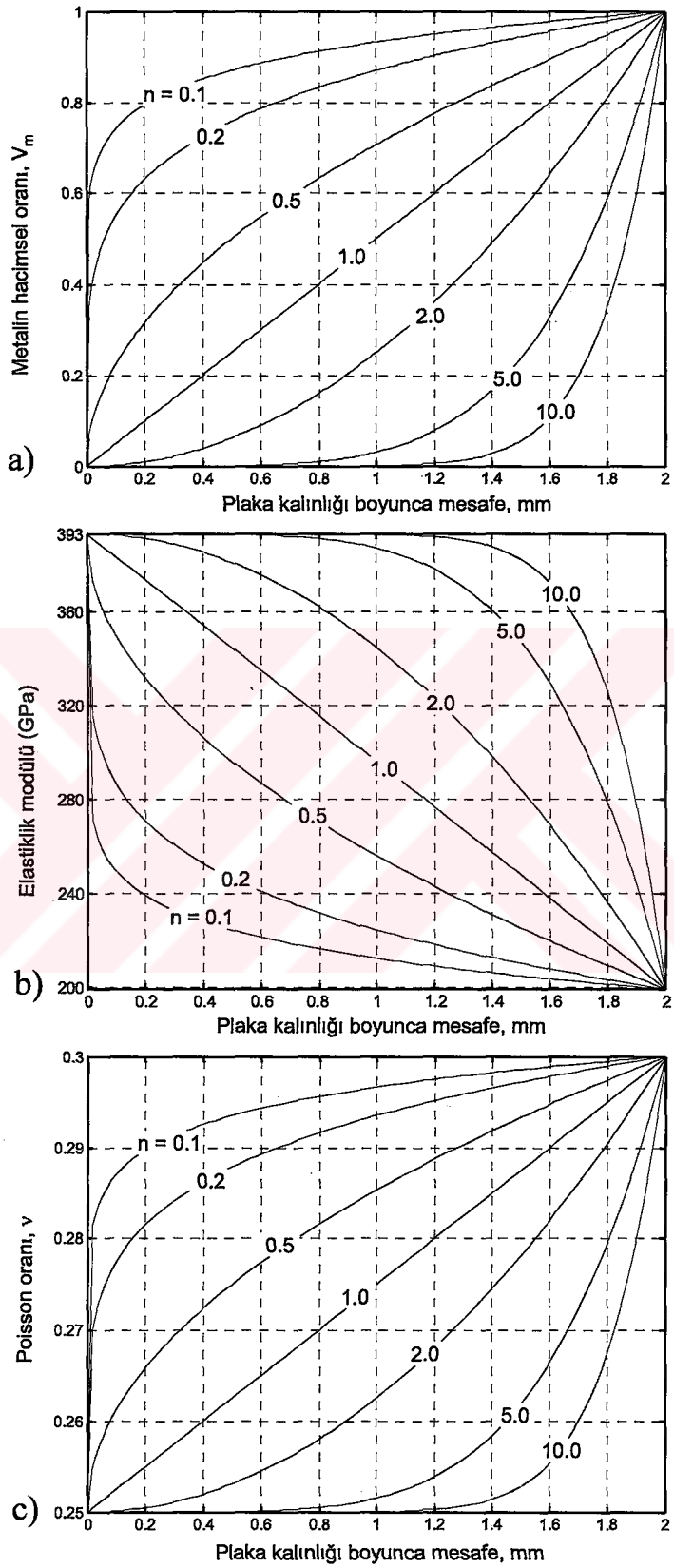


Şekil 5.3: (a) Yükleme şartı, (b) deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri.

5.2.2 Gerilme Analizi

Tek bindirme bağlantıları, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların performanslarının ve yapıştırıcı özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılırlar. Bu çalışmada, çekme yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üç boyutlu elastik gerilme analizleri yapıldı. Bağlantıda kullanılan plakaların üst ve alt yüzeyleri sırasıyla seramik (Al_2O_3) ve metal (Ni) olup plaka kalınlıkları boyunca oluşacak gerilmeleri azaltmak için seramik ve metal katmanlar arasındaki bölge fonksiyonel olarak kademelendirilmiştir. Şekil 5.4'de üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların kalınlıkları boyunca metal bileşenin hacimsel oranındaki değişim ile elastisite modülü ve Poisson oranlarındaki değişimler kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için görülmektedir. Yapılan analizler neticesinde, tek bindirme bağlantısına uygulanan çekme yükünün özellikle bağlantının bindirme bölgesinde yüksek gerilmelere neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle bağlantının en kritik bölgesi bindirme bölgesidir.

Sonuçların değerlendirilmesinde, plakalar için baskın olan σ_{xx} ve yapıştırıcı tabakası için baskın olan σ_{yy} normal gerilme bileşenleri, plakalar ve yapıştırıcı tabakasında baskın olan σ_{xy} kayma gerilmesi bileşeni ve σ_{eqv} von Mises gerilmesi dikkate alınmıştır. Şekil 5.5-7'de kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için sırasıyla üst plaka bindirme bölgesi, yapıştırıcı tabakası ve alt plaka bindirme bölgelerindeki normal gerilme (plakalar için σ_{xx}, yapıştırıcı tabakası için σ_{yy}), kayma gerilmesi (σ_{xy}) ve von Mises (σ_{eqv}) gerilmesi dağılımları görülmektedir.



Şekil 5.4: Bir Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca farklı kompozisyonel gradyantlar n için (a) metal fazın hacimsel oranı V_m, (b) elastisite modülü E, ve (c) Poisson oranı ν değişimleri.

Şekil 5.5'de fonksiyonel kademelendirilmiş üst plaka bindirme bölgesinin üst, orta ve alt yüzeylerindeki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları $n=$ 0.1 için görülmektedir. Gerilme değerleri her bir elemanın üst düğüm noktasına extrapole edildiğinden üst plakanın alt yüzeyindeki ve alt plakanın üst yüzeyindeki en büyük gerilme değerleri Şekil 5.9'dan görülebilir. Bağlantıya tatbik edilen çekme yükü neticesinde, normal gerilme σ_{xx}'in özellikle bindirme bölgesinin sol tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda yoğunlaştığı ve sağ kenara doğru üniform olarak azaldığı görülmektedir. Üst plakanın metalce zengin alt yüzeyinde en büyük çekme gerilmesi oluşurken, seramikçe zengin üst yüzeyde en büyük basma gerilmesi oluşmaktadır (Şekil 5.5a,c). En büyük kayma gerilmesi σ_{xy} üst plakanın orta katmanında bindirme bölgesi sol tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda meydana gelmektedir (Şekil 5.5b). Kayma gerilmesi değer olarak normal gerilmeden 7-8 kat daha küçüktür. Tüm gerilme bileşenleri arasında σ_{xx} normal gerilme bileşeninin değer olarak çok büyük olması nedeniyle von Mises gerilmesinin dağılımı üzerinde σ_{xx} normal gerilme bileşeni oldukça etkilidir. Bu nedenle en büyük von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımı üst plakanın metalce zengin alt yüzeyinde bindirme bölgesinin sol tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda meydana gelmektedir (Şekil 5.5c). Seramikçe zengin üst yüzeyde von Mises gerilmesinin değeri nispeten daha küçüktür.

Şekil 5.6'da yapıştırıcı tabakasının üst, orta ve alt yüzeylerindeki normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. En büyük normal (soyulma) gerilme σ_{yy}, yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarının alt ve üst yüzeylerinde çekme tarzında oluşmaktadır. Yapıştırıcı tabakasının orta yüzeyindeki normal gerilme değerinin yaklaşık olarak alt ve üst yüzeylerdeki normal gerilme değerlerinin yarısına eşit olduğu görülmektedir. Normal gerilme σ_{yy} bileşeni yapıştırıcı tabakasının her doğrultusunda simetrik bir davranışa sahiptir (Şekil 5.6a,b,c). Kayma gerilmesi σ_{xy} bileşeninin benzer şekilde yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarının alt ve üst yüzeylerinde en büyük olduğu görülmektedir (Şekil 5.6a,c). Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca kayma gerilmesi değerinin hemen hemen aynı kaldığı ve normal gerilmeye göre yaklaşık olarak %140 daha küçük olduğu görülmektedir. Normal gerilme gibi kayma gerilmesi de simetrik

bir davranış sergilemektedir (Şekil 5.6a,b,c). Benzer şekilde von Mises gerilmesi de yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarında yoğunlaşmakta ve yine simetrik bir davranış göstermektedir (Şekil 5.6a,b,c). Tüm gerilme bileşenlerine göre yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarının kritik bölgeler olması nedeni ile çekme yüküne maruz tek bindirme bağlantısında hasarın bu bölgelerden başlaması beklenebilir.

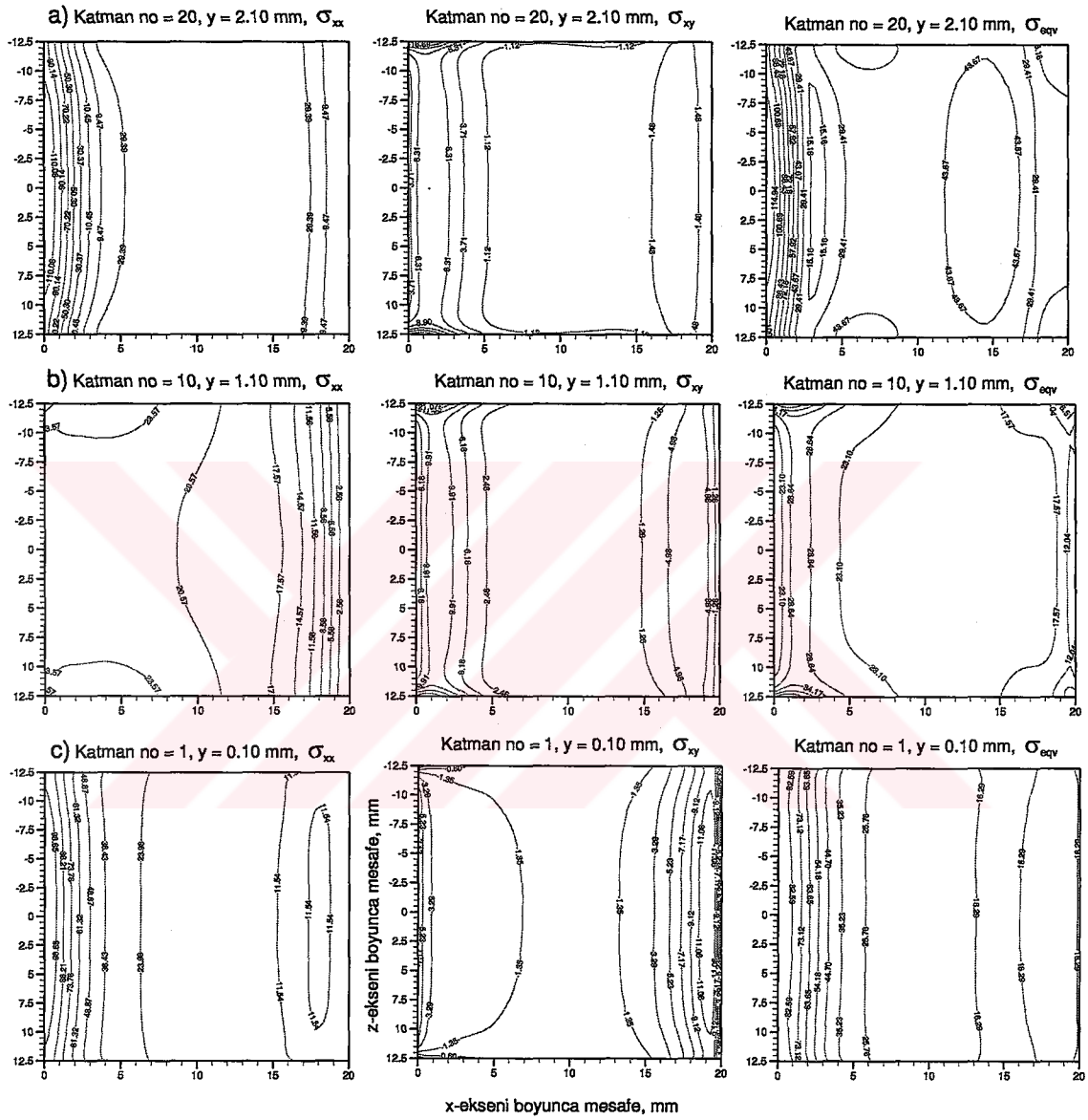
Şekil 5.7'de kompozisyonel gradyant n= 0.1 için fonksiyonel kademelendirilmiş alt plaka bindirme bölgesinin üst, orta ve alt yüzeylerindeki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. Normal gerilme σ_{xx}'in bindirme bölgesinin sağ tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda yoğunlaştığı görülmektedir. Normal gerilme σ_{xx} alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde çekme tarzında, metalce zengin alt yüzeyinde ise basma tarzında oluşmuştur (Şekil 5.7a,c). En büyük kayma gerilmesi σ_{xy} alt plaka orta katmanın sağ tarafında yapıştırıcı serbest ucunda yoğunlaşmış ve yaklaşık olarak normal gerilmeden 11 kat daha küçüktür (Şekil 5.7b). von Mises gerilmesi plaka bindirme bölgesinin seramikçe zengin üst yüzeyinin sağ tarafında yoğunlaşmış ve bu defa seramikçe zengin üst yüzeyde en büyük, metalce zengin alt yüzeyde nispeten daha küçük değerdedir (Şekil 5.7a,b,c).

Sonuç olarak, çekme yükü neticesinde en yüksek gerilme değerleri yapıştırıcı serbest uçlarında oluşmuştur. Özellikle, üst plakanın alt yüzeyi ve alt plakanın üst yüzeyinde büyük gerilmeler meydana gelmiştir. Bununla beraber, yapıştırıcı tabakasının sol ve sağ kenarlarında oluşan gerilme değerlerinin yapıştırıcı malzemesinin akma gerilmesi sınırını aştığı görülmüştür. Uygulanan çekme yükü neticesinde bağlantı sisteminde simetrik bir deformasyon oluşmakta ve buna bağlı olarakta yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol kenarlarında oluşan gerilmelerinde simetrik olduğu görülmektedir. Ancak yapıştırıcıyla arayüz oluşturan üst plaka alt yüzeyindeki ve alt plaka üst yüzeyindeki gerilme değerlerinin bu simetrikliğe uymadığı görülmektedir. Bunun nedeni metalce zengin olan üst plaka alt yüzeyine göre seramikçe zengin olan alt plaka üst yüzeyinde yapının daha rijit olmasıdır. Bunun sonucunda da alt plaka üst yüzeyinde σ_{xx} normal gerilme değerinin yaklaşık olarak %45 daha yüksek olduğu görülmektedir. Kompozisyonel gradyant n= 1.0 ve 10.0 için yapılan analizlerinde de

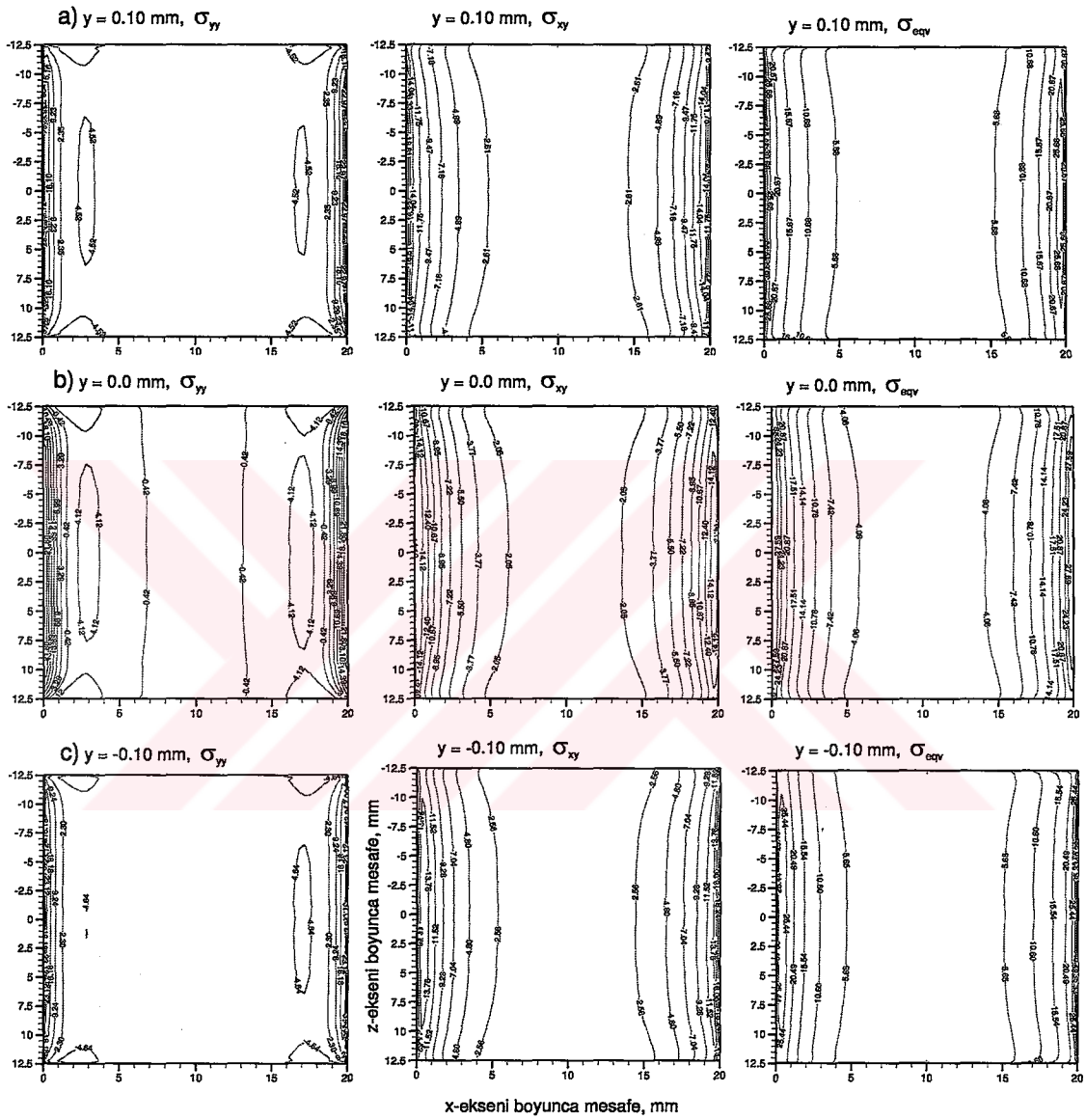
alt ve üst plakalar ile yapıştırıcı tabakasında benzer gerilme durumlarının oluştuğu görülmüştür.

Şekil 5.9'da yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üst plaka, yapıştırıcı tabakası ve alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda (Şekil 5.8'e bak) kalınlık boyunca normal gerilme, kayma gerilmesi ve von Mises gerilmesi değişimleri kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 iken görülmektedir.

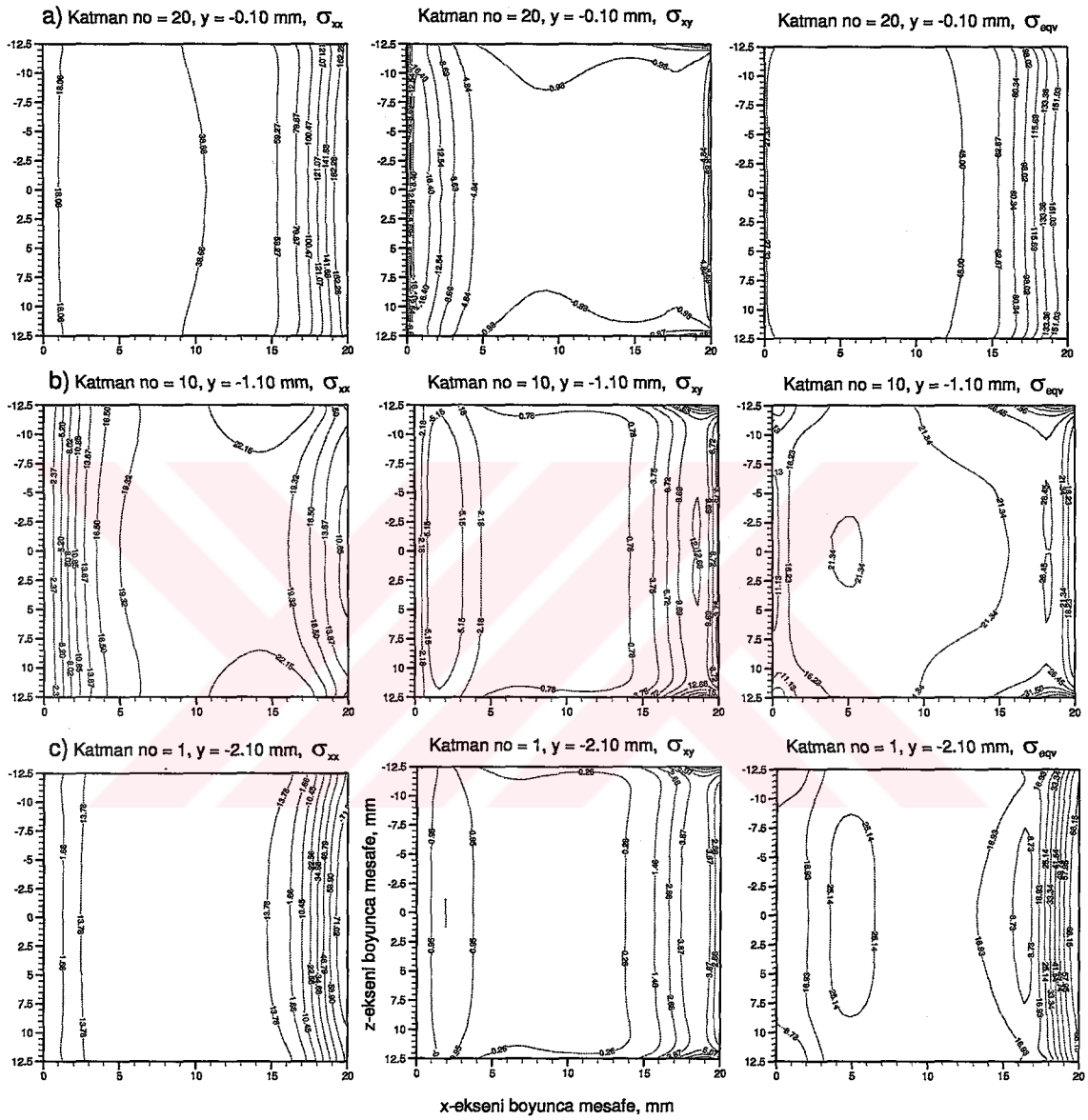
Analizler neticesinde, üst fonksiyonel kademelendirilmiş plaka için bindirme bölgesinin sol tarafının (AHG hattı) en kritik bölge olduğu görülmüştür. Bu bölgede σ_{xx} nomal gerilmesi seramikçe zengin üst yüzeyde basma tarzında meydana gelirken, metalce zengin alt yüzeyde çekme tarzında meydana gelmiştir. Böylece üst plaka kalınlığı boyunca normal gerilme σ_{xx}'in sıfır olduğu bir düzlem mevcuttur. Bu düzlem plakanın üst yüzeyinden 0.6 mm aşağıdadır. En büyük kayma gerilmesi σ_{xy} AHG hattında plakanın üst yüzeyinden 0.8 mm aşağıda meydana gelmiştir. von Mises gerilmesi σ_{eqv} AHG hattında plakanın alt yüzeyinde en büyük değerde iken üst yüzeyinde nispeten daha küçük değerdedir. Yaklaşık olarak normal gerilmenin sıfır olduğu düzlemde en küçük değere ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.9a). A ve G noktalarında yapıştırıcı tabakası ve plakaların kalınlıkları boyunca gerilmelerdeki değişimlerin aynı olduğu, H noktasında ise farklı değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bağlantı elemanlarında meydana gelen Poisson tesirleridir. Üç boyutlu model kullanılarak bağlantı elemanlarında Poisson tesirlerinin görülebilmesi sağlanmıştır. Özellikle yapıştırıcı ve plakaların kenarlarına doğru Poisson tesirlerinin dikkate değer olduğu görülmektedir. Şekil 5.9b'de yapıştırıcı tabakasının bazı kritik noktalarında kalınlık boyunca normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri görülmektedir. σ_{yy} normal gerilmesi yapıştırıcı tabakasının H noktasında üst yüzeyde en büyük iken D noktasında alt yüzeyde en büyüktür. Kayma gerilmesi σ_{xy}'de normal gerilme ile aynı yerlerde en büyüktür ve değer olarak normal gerilmeden yaklaşık % 140 daha küçüktür. Benzer davranış von Mises σ_{eqv} gerilmesi içinde geçerlidir. H ve D noktaları yapıştırıcı tabakası için kritik noktalardır ve bu noktalarda kalınlık boyunca gerilmelerin değişimi simetrik bir davranış sergilemektedir. Bunun nedeni, çekme deformasyonuna bağlı olarak



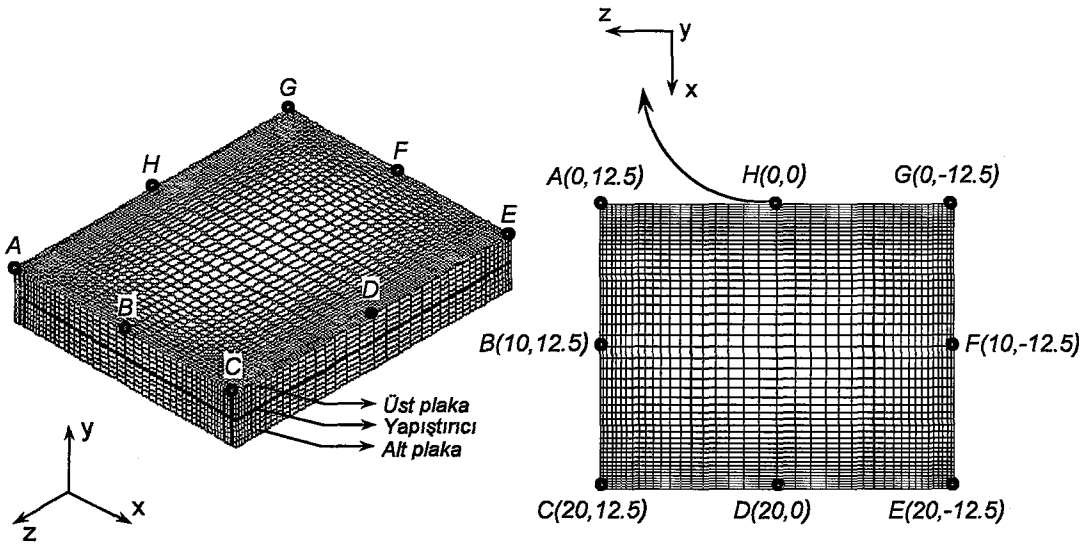
Şekil 5.5: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.6: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.7: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).

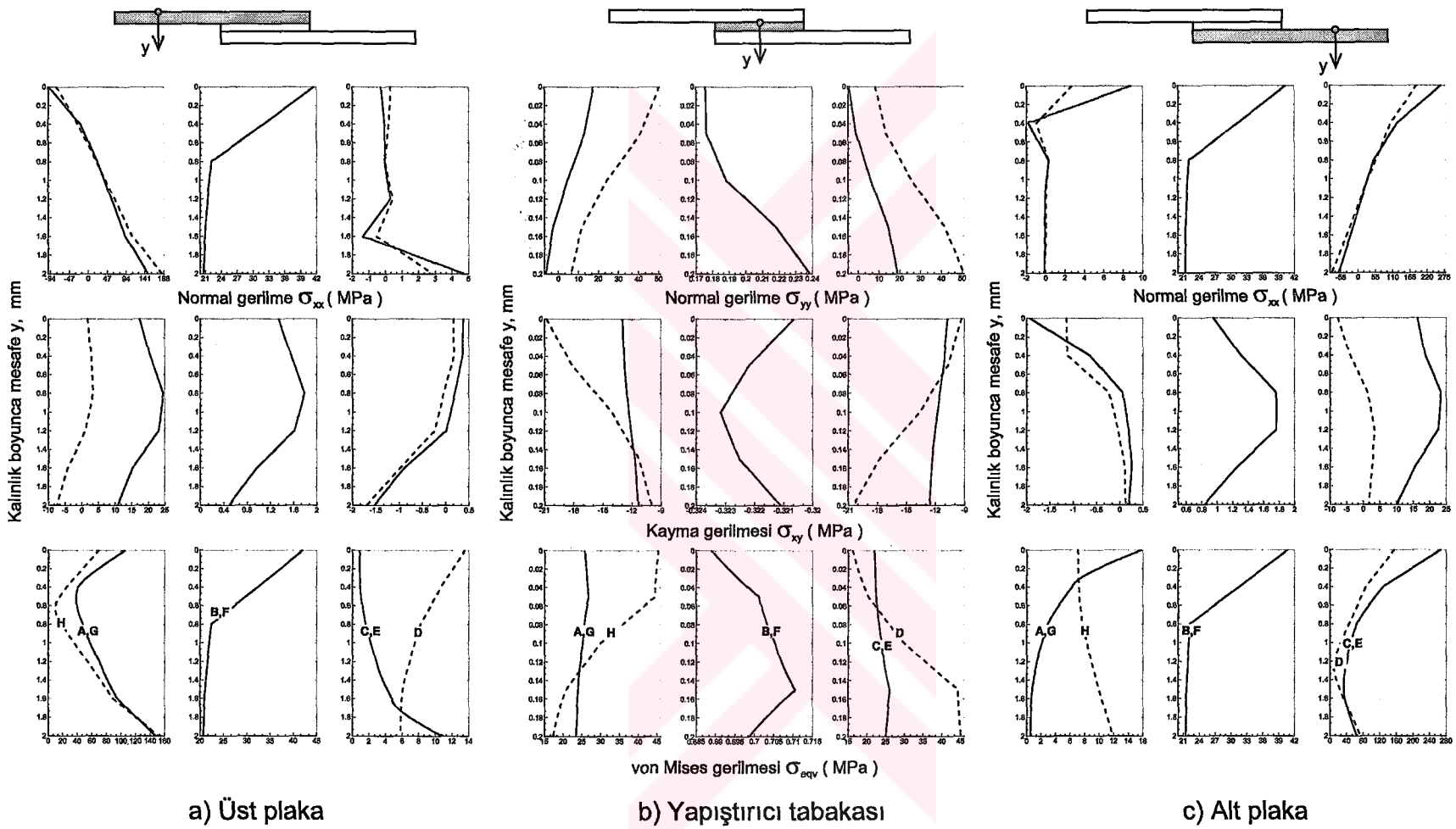


Şekil 5.8: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek bindirme bağlantısının bindirme bölgesinde bazı kritik noktalar.

yapıştırıcı tabakasının üst ve alt plakalar tarafından soyulmaya zorlanmasıdır.

Şekil 5.9c'de alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın bazı kritik noktalarında kalınlık boyunca normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri $n=$ 0.1 için görülmektedir. Üst plakanın tersine normal gerilme σ_{xx} bindirme bölgesinin sağ tarafında (CDE hattı) plaka üst yüzeyinde çekme, alt yüzeyinde ise basma tarzında oluşmuştur. Burada normal gerilme σ_{xx}'in sıfır olduğu düzlem plaka üst yüzeyinden 1.4 mm aşağıdadır. Kayma gerilmesi σ_{xy}'de CDE hattında yığılmakta ve alt plaka üst yüzeyinden 0.8 mm aşağıda en büyük olmaktadır. Benzer şekilde von Mises gerilmesi de CDE hattında yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu değer seramikçe zengin plaka üst yüzeyinde metalce zengin alt yüzeyden yaklaşık olarak % 350 daha büyüktür. von Mises gerilmesi σ_{eqv}, normal gerilme bileşeni σ_{xx}'in sıfır olduğu düzlemde en küçük değeri almaktadır (Şekil 5.9c). Poisson tesirlerinin alt plakada özellikle plaka kenarına doğru önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

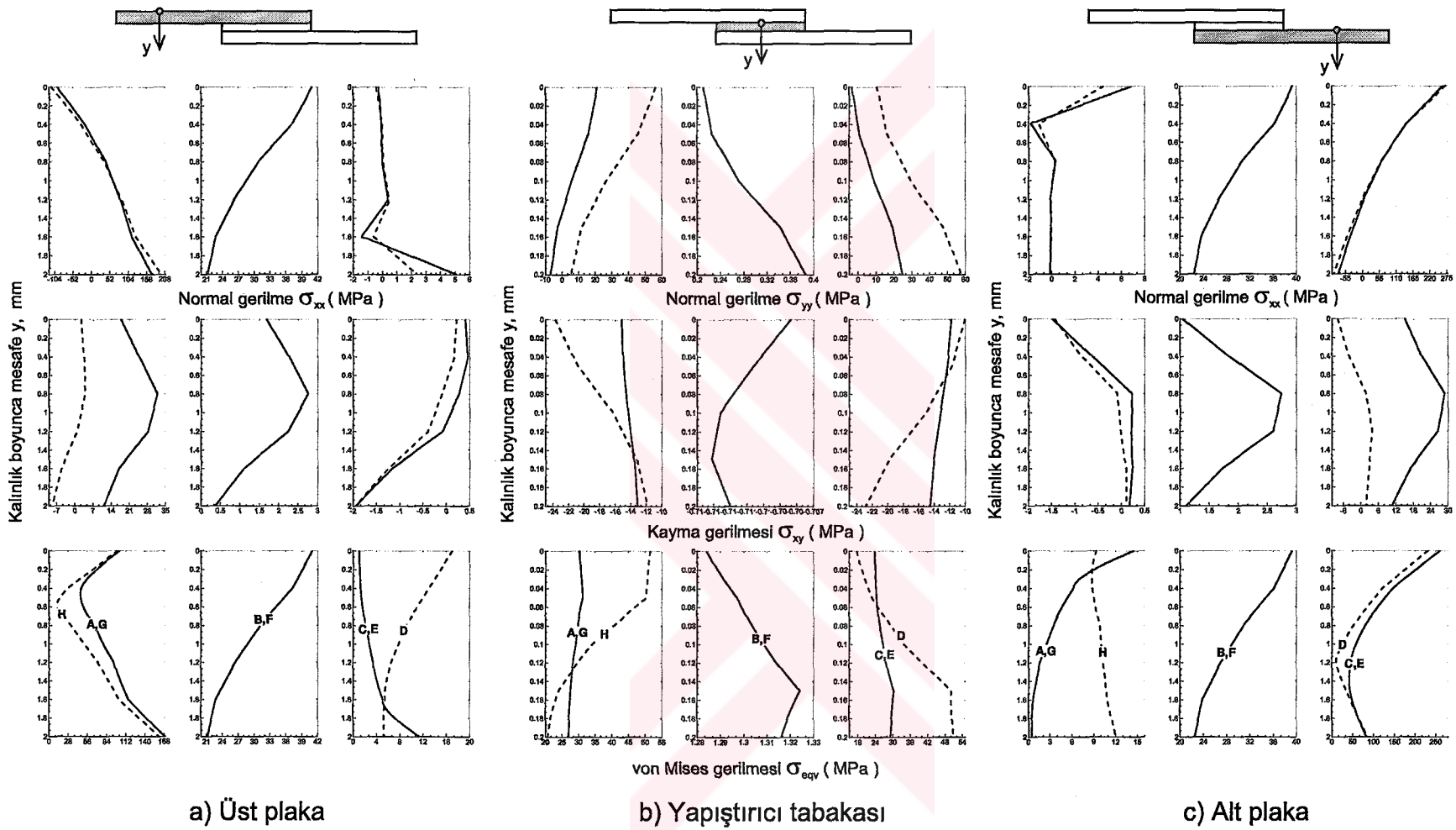
Şekil 5.10'da $n=$ 1.0 (lineer kompozisyon değişimi) için üst fonksiyonel kademelendirilmiş plaka, yapıştırıcı tabakası ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda (Şekil 5.8'e bak) kalınlıklar boyunca normal gerilme (σ_{xx}, σ_{yy}), kayma gerilmesi (σ_{xy}) ve von Mises (σ_{eqv})



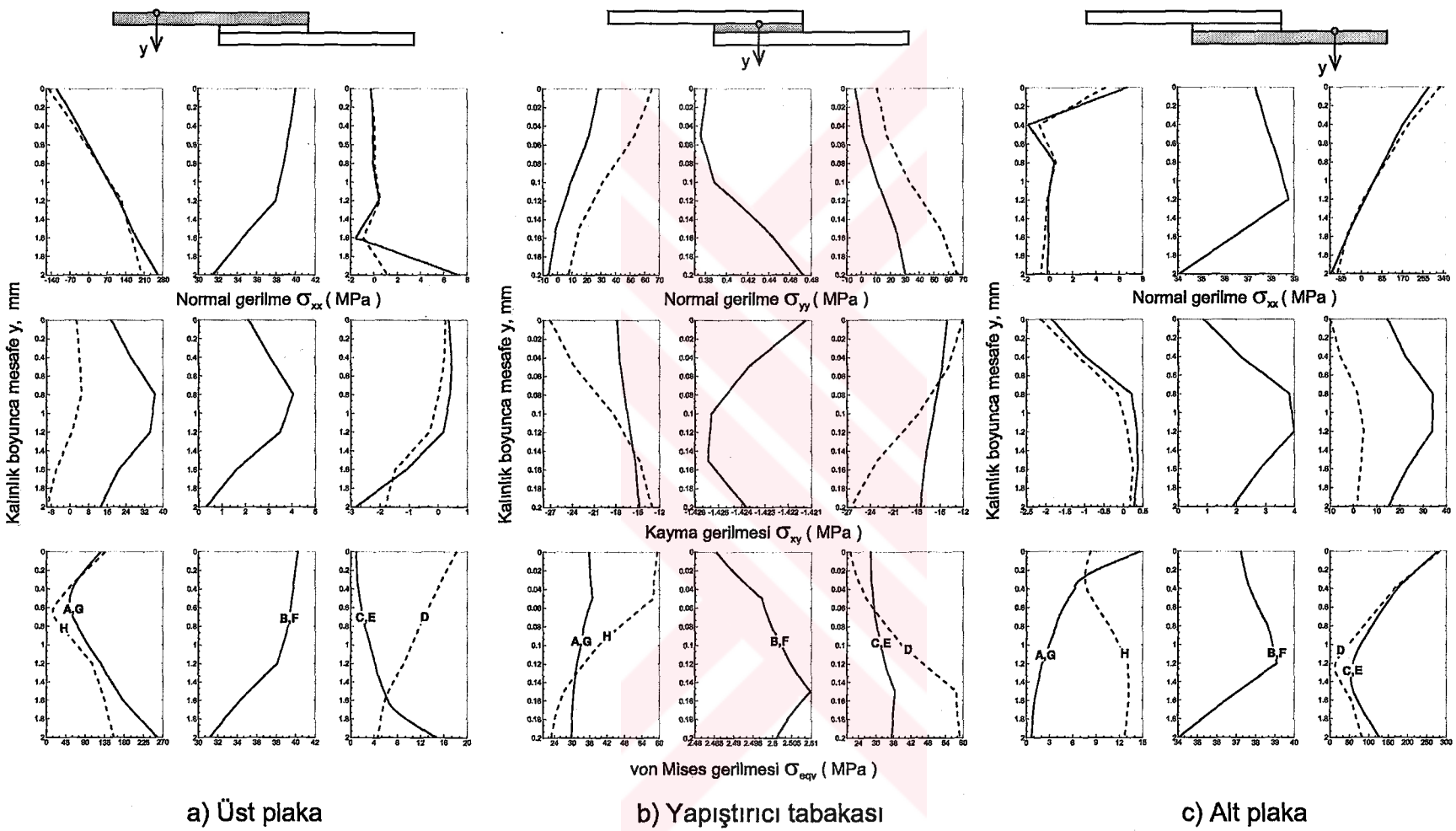
Şekil 5.9: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri ($n = 0.1$) (Şekil 5.8'e bak).

gerilmesindeki değişimler görülmektedir. Gerilme profillerinin $n=$ 0.1 durumuyla aynı olduğu görülmektedir. Normal gerilme ve von Mises gerilmeleri üst plakanın metalce zengin alt yüzeyinde AHG hattında en büyüktür. Bununla beraber kayma gerilmesi σ_{xy}'nin aynı hatta plaka kalınlığının ortalarında en büyük olduğu görülmektedir. Kompozisyonel gradyant n'in kritik bölgelerdeki normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı görülürken, gerilme değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Yani, en yüksek gerilme değerleri $n=$ 0.1 durumuyla karşılaştırıldığında normal gerilme yaklaşık olarak %11 artarken, kayma gerilmesi %21 ve von Mises gerilmesi %12 oranlarında artmıştır (Şekil 5.10a). Yapıştırıcı tabakasında, $n=$ 1.0 için gerilme yığılmalarının yapıştırıcı serbest uçlarında (AHG ve CDE) meydana geldiği ve kalınlık boyunca gerilme profillerinde değişme olmadığı görülmektedir. En yüksek gerilmeler yapıştırıcı tabakasının sol tarafında (AHG hattı) üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde ve sağ tarafında (CDE hattı) alt plaka-yapıştırıcı arayüzünde meydana gelmiştir. $n=$ 0.1 durumuyla mukayese edildiğinde en yüksek normal gerilme σ_{yy}'nin %9.5, en yüksek kayma gerilmesi σ_{xy}'nin %13 ve en yüksek von Mises gerilmesi σ_{eqv}'in %20 arttığı görülmektedir (Şekil 5.10b). Bunun nedeni yapıştırıcı tabakasının daha rijit plakalar tarafından çevrelenmiş olmasıdır. Benzer şekilde, alt plakada en yüksek gerilmeler plaka bindirme bölgesinin sağ tarafında (CDE hattı) ve plaka-yapıştırıcı arayüzünde meydana gelmiştir. Kompozisyonel gradyantın plaka kalınlığı boyunca gerilmelerdeki değişimleri etkilemediği ve en yüksek normal, kayma ve von Mises gerilme değerlerinin hemen hemen aynı kaldığı görülmektedir (Şekil 5.10c). Üst ve alt plakalarda seramik bileşenin artması plaka kalınlıkları boyunca oluşan gerilme profillerini ve plakaların nötr düzlemlerini etkilememektedir, ancak yapıştırıcı bağlantısının daha rijit olması nedeniyle üst plaka ve yapıştırıcı tabakasındaki yüksek gerilme değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

Kompozisyonel gradyant $n=$ 10.0 iken alt ve üst plakalar seramikçe zengin bir yapıya sahiptirler. Bu durumda plakalarda gerilme bileşenleri arasında normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} baskın iken yapıştırıcı tabakasında normal gerilme σ_{yy} baskındır. Benzer şekilde, gerilme bileşenleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisi yoktur, ancak gerilme bileşenlerinin büyüklükleri üzerinde etkilidir. Şekil 11a'da görüldüğü



Şekil 5.10: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak).



Şekil 5.11: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak).

gibi üst plakada gerilme yığılmaları yine üst plaka-yapıştırıcı bölgesinin sol tarafında (AHG hattı) meydana gelmiştir. Normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin profilleri plaka kalınlığı boyunca aynı iken değer olarak artmıştır. Normal gerilme σ_{xx}, plaka üst yüzeyinde basma gerilmesinden alt yüzeyde çekme gerilmesine lineer olarak değişmekte ve alt yüzeyde üst yüzeyin iki katı değere ulaşmaktadır. Kayma gerilmesi σ_{xy} normal gerilmeye oranla daha küçük değerdedir. Bununla beraber, üst plakanın orta bölgelerinde en büyük değere ulaşmaktadır. Seramikçe zengin kompozisyon $n=$ 10.0 durumunu (Şekil 5.11a) metalce zengin $n=$ 0.1 durumu (Şekil 5.9a) ile karşılaştıracak olursak; sırasıyla en yüksek normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değerleri %98, %44 ve %67 oranlarında artmıştır. Yapıştırıcı tabakasında, normal (soyulma) gerilme σ_{yy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmesi yapıştırıcı serbest uçlarında yüksektir. Bu gerilmeler, alt plaka-yapıştırıcı arayüzünden üst plaka-yapıştırıcı arayüzüne AHG serbest kenarı boyunca ve üst plaka-yapıştırıcı arayüzünden alt plaka-yapıştırıcı arayüzüne CDE serbest kenarı boyunca artmaktadır (Şekil 5.11b). $n=$ 10.0 iken oluşan gerilme profilleri, $n=$ 0.1 (Şekil 5.9b) ve $n=$ 1.0 (Şekil 5.10b) iken oluşan gerilme profilleriyle aynıdır. Yani, kompozisyonel gradyant n'in yapıştırıcı tabakası boyunca meydana gelen gerilme profilleri üzerinde etkisi yoktur. Bununla beraber, en yüksek normal, kayma ve von Mises gerilmeleri, metalce zengin kompozisyona sahip $n=$ 0.1 durumunda meydana gelen gerilmelerle mukayese edildiğinde sırasıyla %40, %29 ve %33 daha yüksektir. Alt plakada, normal, kayma ve von Mises gerilmeleri yine $n=$ 0.1 ve $n=$ 1.0 durumlarıyla benzer davranışlar sergilemektedir. Yani, normal ve von Mises gerilmeleri alt plaka-yapıştırıcı arayüzünün sağ tarafında CDE serbest kenarı boyunca en büyük değerlere ulaşmaktayken, kayma gerilmesi plaka kalınlığının orta bölgelerinde en büyük olmaktadır. $n=$ 10.0 iken malzeme kompozisyonundaki seramik bileşenin fazla olması nedeniyle $n=$ 0.1 durumuyla mukayese edildiğinde, normal, kayma ve von Mises gerilmeleri sırasıyla %24, %56 ve %15 oranlarında artmıştır (Şekil 5.11c). Kompozisyonel gradyant $n=$ 10.0 için de üst ve alt plakaların nötr düzlemlerinin yeri değişmemiş ve $n=$ 0.1 ve 1.0 durumlarıyla aynıdır.

Metalce zengin ($n=$ 0.1), lineer ($n=$ 1.0) ve seramikçe zengin ($n=$ 10.0) malzeme

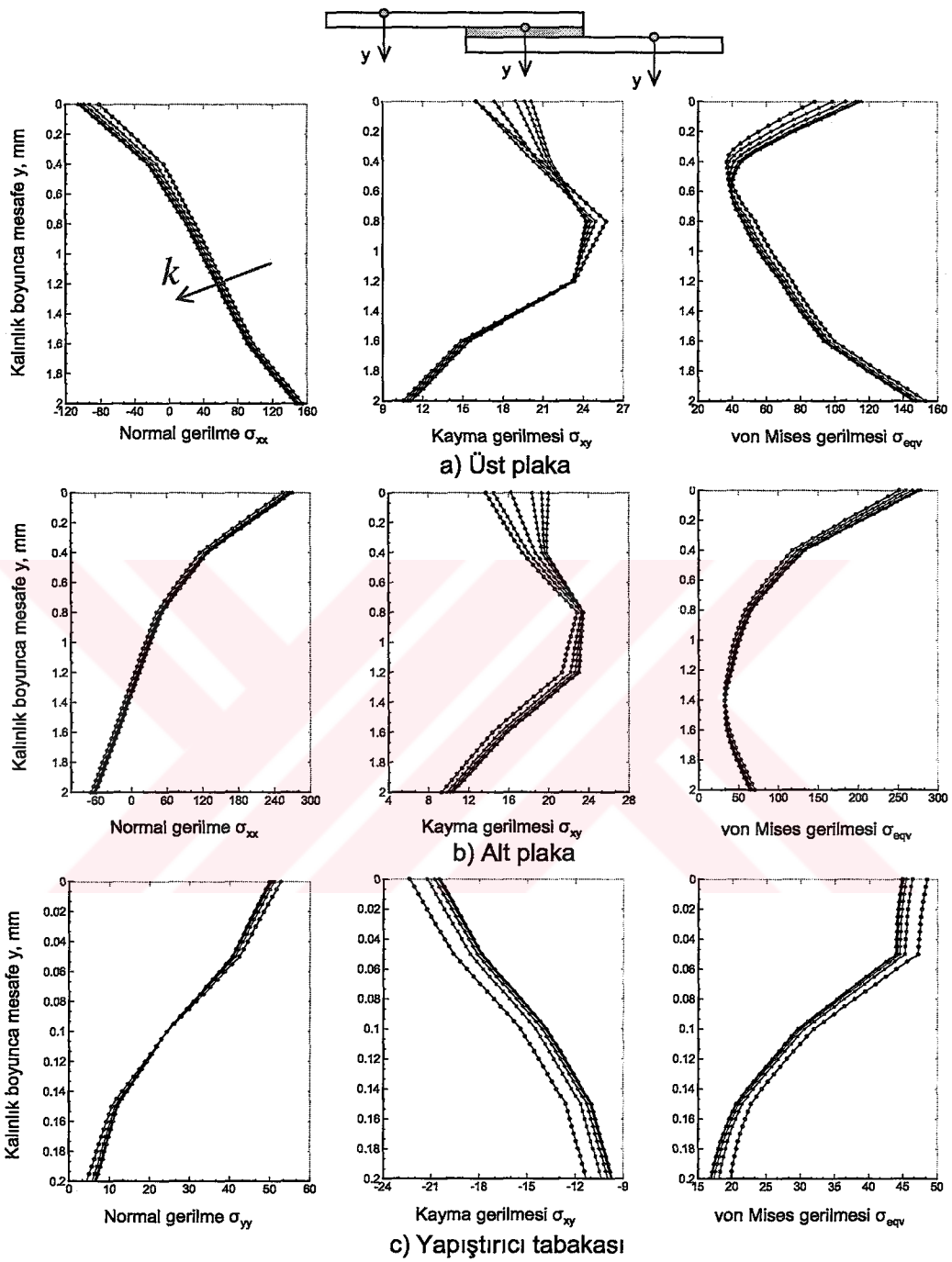
kompozisyonları için yapılan gerilme analizlerinde, kompozisyonel gradyant n'in plakalar ve yapıştırıcı kalınlıkları boyunca oluşan gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı, fakat yüksek gerilme değerleri üzerinde dikkate değer bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, artan kompozisyonel gradyant n ile alt ve üst plakalardaki seramik (Al_2O_3) malzemenin hacimsel oranının artması ve plakaların daha rijit bir yapıya kavuşmasıdır.

5.2.3 Katman Sayısının Etkisi

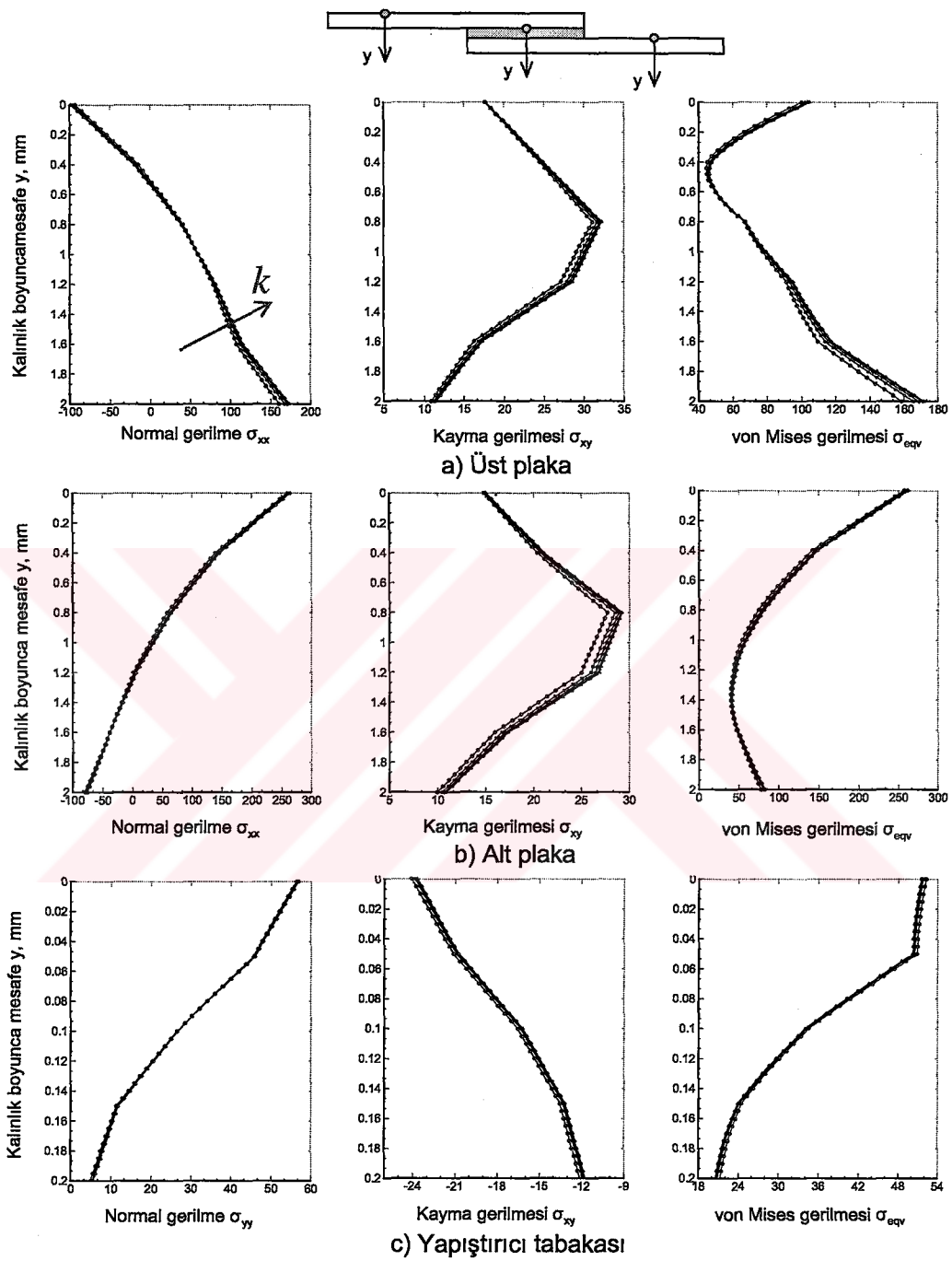
Bölüm 3 ve 4'de yapılan ısıl artık gerilme analizlerinde, çok katmanlı ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda katman sayısının artık gerilme profili ve büyüklüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmişti. Bu bölümde, fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısında, çekme yükü neticesinde oluşan gerilmeler üzerinde üst ve alt plaka katman sayılarının etkisi araştırıldı. Bu amaçla plaka katman sayıları k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250 yani, sırasıyla katman kalınlıkları 0.4, 0.2, 0.1, 0.04, 0.02 ve 0.008 mm için analizler tekrarlandı. Katman sayısı arttıkça her bir katman kalınlığı boyunca nümerik integrasyon için daha fazla hesaplama zamanı ve kaynağına ihtiyaç duyulmaktatır. Bu nedenle plakaların modellenmesinde en fazla 250 katman kullanılmıştır.

Şekil 5.12-14'de sırasıyla kompozisyonel gradyant n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için bağlantı bindirme bölgesindeki kritik noktalarda (Şekil 5.8'e bak) kalınlıklar boyunca normal gerilme (plakalar için σ_{xx}, yapıştırıcı tabakası için σ_{yy}), kayma gerilmesi (σ_{xy}) ve von Mises (σ_{eqv}) gerilmelerindeki değişimler üzerinde üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katman sayılarının etkisi görülmektedir. Katman sayısının etkisi incelenirken en yüksek gerilmelerin meydana geldiği kritik noktalar olan üst plaka için G, alt plaka için C ve yapıştırıcı tabakası için H noktalarında kalınlıklar boyunca gerilme değişimleri dikkate alınmıştır.

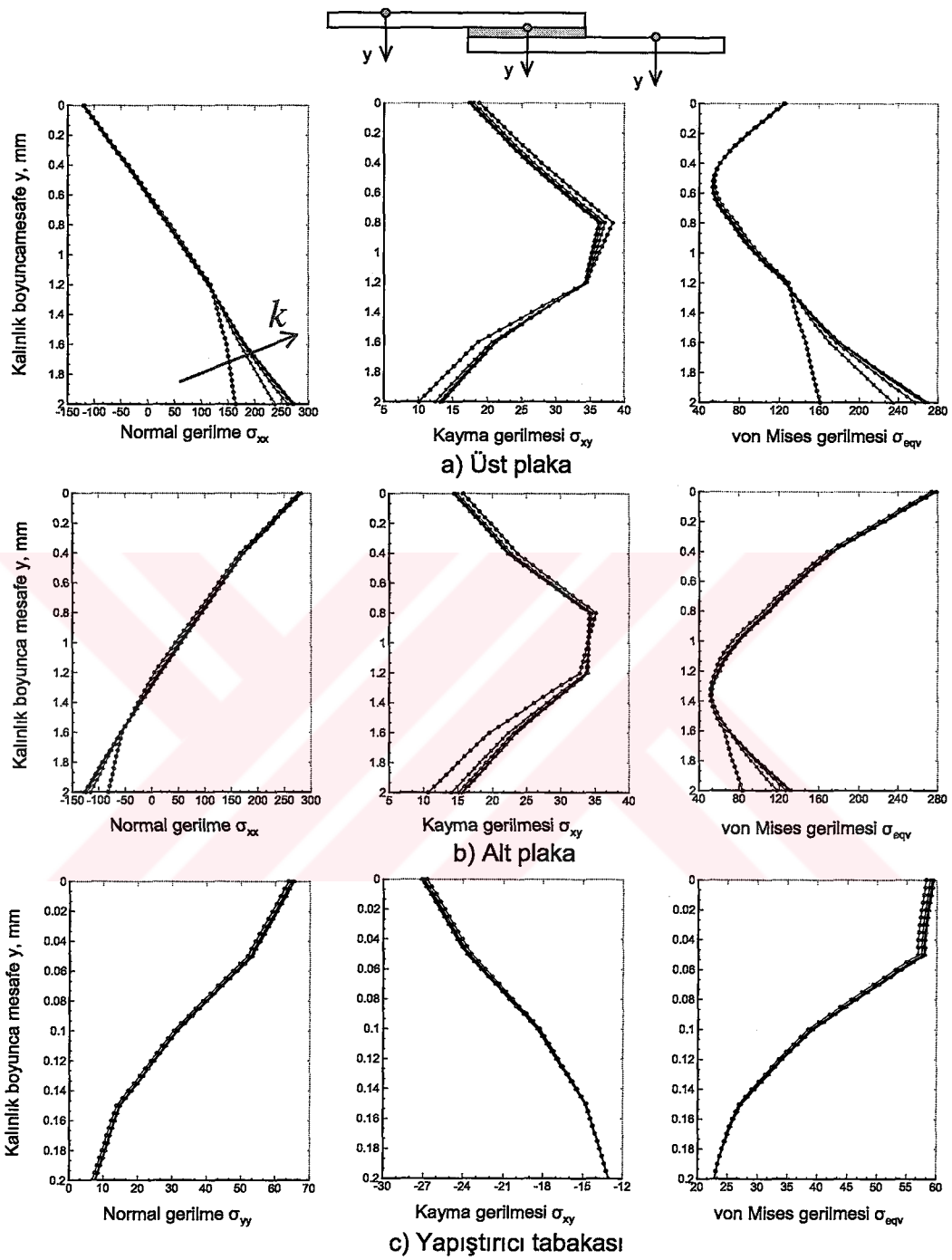
n= 0.1 iken, normal gerilme ve von Mises gerilmesi üst plaka için bindirme bölgesinin sol tarafında ve plaka-yapıştırıcı arayüzünde en yüksek değerde iken alt plaka için bindirme bölgesinin sağ tarafında ve plaka-yapıştırıcı arayüzünde en büyük değerdedir. Kayma gerilmesi plaka kalınlığı boyunca parabolik bir değişime sahiptir ve plaka kalınlığının orta bölgelerinde en büyüktür. Katman



Şekil 5.12: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının ($k=$ 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri ($n=0.1$) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.13: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.14: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının ($k=$ 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri ($n=10.0$) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

sayısı 5'den 250'ye yükseltilirken gerilme profilleri aynı kalırken, gerilme seviyeleri arasında küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. Özellikle katman sayısı 20 iken plaka kalınlığı boyunca üniform bir gerilme profili elde edilmiştir. Buna karşın, plakaların seramikçe zengin yüzeylerinde gerilme değerleri arasında küçük farklılıklar görülmektedir, özellikle bu fark kayma gerilmesi σ_{xy}'de daha belirgindir (Şekil 5.12a,b). Yapıştırıcı tabakasında da, katman sayısındaki artışın gerilme profilleri üzerinde önemli bir etkisi gözlenmemektedir. Gerilme değerlerinde 20 katman sayısına kadar azda olsa farklılıklar görülürken, 20 katmandan sonra gerilme değerleri aynı kalmaktadır (Şekil 5.12c). Lineer malzeme kompozisyonu $n=$ 1.0 için, üst plaka, alt plaka ve yapıştırıcı tabakasındaki gerilme bileşenlerinin kompozisyonel gradyanttaki değişimden etkilenmediği ve $n=$ 0.1 ile benzer olduğu görülmektedir. Bununla beraber, en yüksek normal, kayma ve von Mises gerilme değerlerinin azda olsa artmış olduğu, ayrıca yapıştırıcı tabakası ve plaka kalınlıkları boyunca gerilme profillerinin daha üniform oldukları ve de gerilme değerleri arasındaki farkların ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir (Şekil 5.13). Seramikçe zengin kompozisyon $n=$ 10.0 iken de bağlantının bindirme bölgesinde $n=$ 0.1 (Şekil 5.12) ve $n=$ 1.0 (Şekil 5.13) durumlarıyla benzer gerilme davranışları görülmektedir. Ancak, üst ve alt plakaların metalce zengin alt yüzeylerinde katman sayısına göre gerilme seviyeleri arasında farklar dikkate değerdir. Katman sayısı 20'den sonra gerilmeler hemen hemen aynı değerlerde kalmaktadır (Şekil 5.14a,b). Yapıştırıcı tabakasında artan katman sayısına karşın kalınlık boyunca meydana gelen gerilme profillerinin üniform oldukları görülmektedir (Şekil 5.14c). Kompozisyonel gradyant $n=$ 10.0, $n=$ 0.1 ve $n=$ 1.0 ile mukayese edildiğinde, yapıştırıcı tabakası ve plakalardaki gerilme değerleri daha yüksektir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların yapılan ısıl gerilme analizlerinde, plaka katman sayısının gerilmeler üzerinde önemli bir etkisinin olduğu bilinirken, yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının çekme yükü altındaki gerilme analizlerinde, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katman sayılarının bağlantı bindirme bölgesindeki baskın gerilme profilleri üzerinde pek fazla tesirinin olmadığı görülmüştür. 20 katmana kadar yüksek gerilme değerlerinde az da olsa bir artışın olduğu, 20 katmandan sonra gerilme değerlerinin

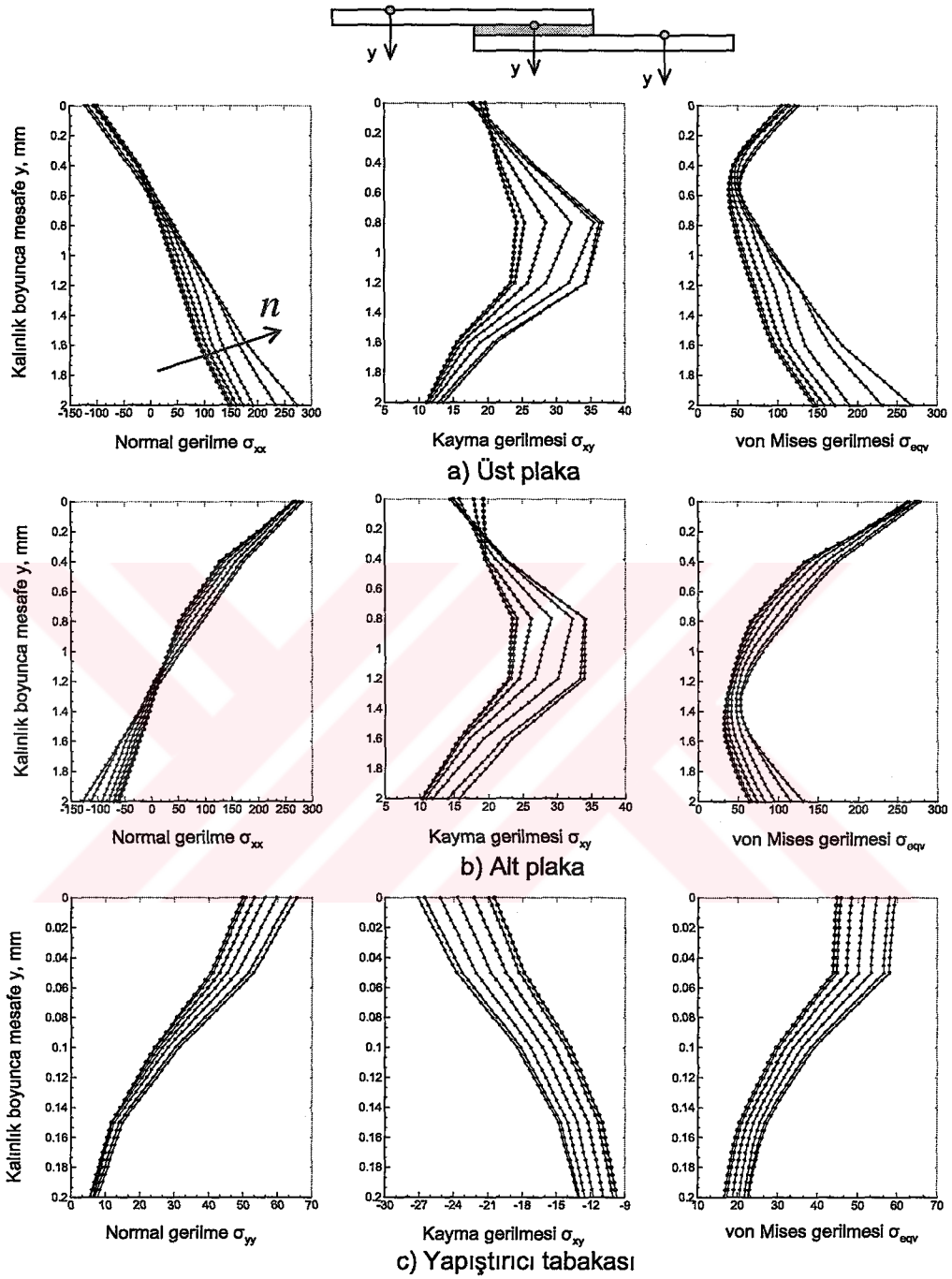
de aynı kaldığı belirlenmiştir.

5.2.4 Kompozisyonel Gradyantın Etkisi

Çekme yüküne maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısında, kompozisyonel gradyant n'deki değişimin bağlantıda meydana gelen gerilmeler üzerindeki etkisi de araştırıldı. Şekil 5.15'de katman sayısı k= 20 sabit tutularak farklı kompozisyonel gradyantlarda (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) bağlantı üst plaka, alt plaka ve yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerindeki değişimler görülmektedir.

Üst plakada, normal gerilme σ_{xx} profilleri plaka üst yüzeyinden (basma) alt yüzeyine (çekme) doğru lineer olarak artmaktadır. Özellikle gerilmenin sıfır olduğu düzlemden (0.6mm), plaka alt yüzeyine doğru normal gerilmedeki artış dikkate değerdir. Kompozisyonel gradyant n artırıldığında, plaka-yapıştırıcı arayüzünde ortaya çıkan en yüksek gerilme değerinde %86 oranında artış meydana gelmektedir (Şekil 5.15a). Kayma gerilmesi σ_{xy} plakanın üst ve alt yüzeylerinden orta bölgesine doğru artan bir profile sahiptir ve bu profil kompozisyonel gradyanttaki artıştan etkilenmemektedir. Ancak artan kompozisyonel gradyant ile kayma gerilmesinin değeri plaka orta bölgesinde yaklaşık %50 oranında artmıştır (Şekil 5.15a). Buna ilave olarak, tüm kompozisyonel gradyantlarda von Mises gerilmesi benzer profillere sahiptir. Gerilmenin değeri nötr düzlemin üst tarafında azalırken, nötr düzlemden plaka alt yüzeyine doğru sürekli olarak artmaktadır. Kompozisyonel gradyant n= 0.1'den 10.0'a artarken en yüksek von Mises gerilmesi %84 oranında artmıştır (Şekil 5.15a). Grafiklerden de anlaşılacağı üzere üst plakada, kompozisyonel gradyanttaki artış kritik gerilme profillerini etkilememektedir. Ancak yüksek gerilmelerin meydana geldiği metalce zengin plaka alt yüzeyinde, gerilmelerdeki artış dikkate değerdir (Şekil 5.15a).

Alt plakada normal gerilme σ_{xx} plaka alt yüzeyinden (basma) üst yüzeyine (çekme) doğru lineer olarak artmaktadır. Kompozisyonel gradyant arttıkça kalınlık boyunca normal gerilme profili hemen hemen aynı kalmaktadır. Plakanın basma gerilmesine maruz metalce zengin alt yüzeyinde normal gerilme değeri artan kompozisyonel



Şekil 5.15: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

gradyant ile %112 oranında artarken, normal gerilmenin en büyük olduğu seramikçe zengin üst yüzeyde tüm kompozisyonel gradyantlarda gerilme hemen hemen aynı değerlerdedir (Şekil 5.15b). Kayma gerilmesi, plakanın üst ve alt yüzeyinden plakanın orta düzlemine doğru artmaktadır. Tüm kompozisyonel gradyant değerlerinde kayma gerilmesinin profili aynı kalmaktadır. Ancak, plakanın üst ve alt yüzeylerinde kayma gerilmesi değerleri birbirlerine çok yakın iken plaka orta düzlemine doğru aradaki fark artmaktadır. Yani, artan kompozisyonel gradyant ile plaka orta düzlemindeki kayma gerilmesi %45 oranında artmıştır (Şekil 5.15b). von Mises gerilmesi de plaka kalınlığı boyunca benzer profillere sahiptir. Alt plaka-yapıştırıcı arayüzünde yüksek gerilmeler meydana gelmekte, ancak üst plakada olduğu gibi artan kompozisyonel gradyant ile plakanın metalce zengin alt yüzeyindeki von Mises gerilmesi değerleride yaklaşık olarak %106 oranında artmaktadır (Şekil 5.15b). Plakanın malzeme kompozisyonu içerisindeki seramik (Al_2O_3) oranının artması gerilme karakteristikleri üzerinde bir etkiye sahip olmazken gerilme değerlerinin artmasına sebep olmaktadır.

Yapıştırıcı tabakasında, kritik gerilmeler yapıştırıcı serbest uclarında (AHG ve CDE) yoğunlaşmıştır; yani, en yüksek gerilmeler yapıştırıcı tabakasının sol serbest ucu AHG'de üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde ve sağ serbest ucu CDE'de alt plaka-yapıştırıcı arayüzünde meydana gelmiştir. Yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uclarında kalınlık boyunca normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin değişimi benzer olduğu için sadece AHG hattındaki bu gerilme değişimleri gösterilmiştir (Şekil 5.15c). Normal (soyulma) gerilme σ_{yy} alt plaka-yapıştırıcı arayüzünden üst plaka-yapıştırıcı arayüzüne doğru üniform olarak artmaktadır. Kompozisyonel gradyant arttıkça kalınlık boyunca normal gerilme profilleri hemen hemen aynı kalmaktadır. Bununla beraber, gerilme değerleri arasındaki fark alt plaka-yapıştırıcı arayüzünde çok küçükken, üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde dikkate değerdir; yani, %31 oranında artmıştır. Benzer şekilde, kayma gerilmeside üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde en yüksek değere sahiptir ve yapıştırıcı kalınlığı boyunca üniform olarak azalmaktadır. Artan kompozisyonel gradyant ile kayma gerilmesi profilleri değişmezken, yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilmenin değeri artmaktadır. Bu artış üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde %32 olmaktadır (Şekil 5.15c). von Mises

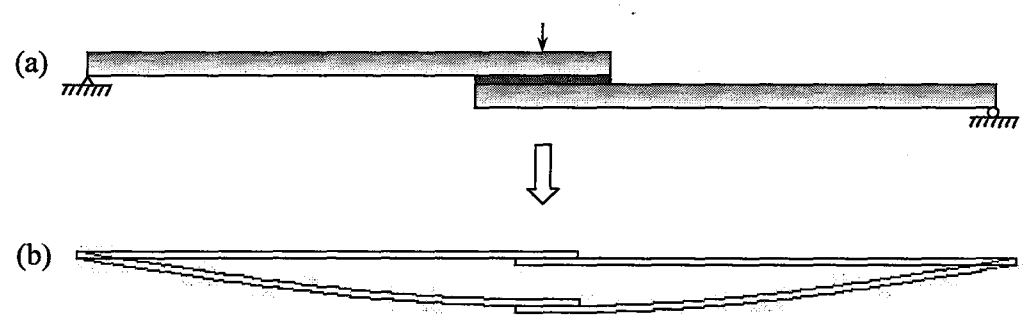
gerilmesi profilleride kompozisyonel gradyanttaki değişimden etkilenmemektedir. Ancak normal gerilmede olduğu gibi özellikle üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde %32 oranında bir artışa sahiptir (Şekil 5.15c).

Kompozisyonel gradyant (n) 100 kat artarken, yani; metal zengin kompozisyondan seramik zengin kompozisyona geçerken, tek bindirme bağlantısının kritik noktalarındaki en büyük gerilme artışı yaklaşık 2 kat olmaktadır.

5.3 Üç Nokta Eğmeye Maruz Fonksiyonel Kademelendirilmiş Tek Bindirme Bağlantısının Gerilme Analizi

5.3.1 Teorik Model

Bu bölümde, yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üç nokta eğme testi yapıldı. Eğme yükü için çekme analizinde kullanılan modelin aynısı kullanıldı (Şekil 5.1 ve 2). Eğme testi için, üst plakanın sol alt köşesi her yönde sabitlenirken alt plakanın sağ alt köşesinin sadece yatay doğrultuda hareketine müsaade edildi. Bindirme bölgesinin ortasına aşağı doğru 1.5 mm'lik yerdeğiştirme uygulanarak bağlantının eğilmesi sağlanmıştır (Şekil 5.16a). Tatbik edilen eğme yükünün üst ve alt plakalarda simetrik bir deformasyona neden olduğu ve özellikle yapıştırıcı tabakasında yüksek soyulma gerilmelerinin oluşmasını sağladığı görülmüştür. Deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri Şekil 5.16b'de görülmektedir.



Şekil 5.16: (a) Üç nokta eğilme hali, (b) deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri.

5.3.2 Gerilme Analizi

Çekme testindeki model kullanılarak yapılan eğme testi neticesinde gerilmelerin bindirme bölgesinde yığıldığı görülmüştür. Burada da bağlantının en kritik bölgesi bindirme bölgesidir. Özellikle üst ve alt plakaların üst yüzeyleri basmaya maruzken alt yüzeyleri çekmeye maruzdur.

Sonuçlar incelendiğinde, çekme analizinde baskın olan gerilme bileşenlerinin (plakalar için σ_{xx}, yapıştırıcı tabakası için σ_{yy} normal gerilme bileşenleri, σ_{xy} kayma gerilmesi bileşeni) eğme analizinde de baskın olduğu görülmüştür. Bu nedenle sonuçların değerlendirilmesinde yine aynı gerilme bileşenleri dikkate alınmıştır.

Şekil 5.17-19'da kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için sırasıyla üst plaka bindirme bölgesi, yapıştırıcı tabakası ve alt plaka bindirme bölgelerindeki normal gerilme (plakalar için σ_{xx}, yapıştırıcı tabakası için σ_{yy}), kayma gerilmesi (σ_{xy}) ve von Mises (σ_{eqv}) gerilmesi dağılımları görülmektedir.

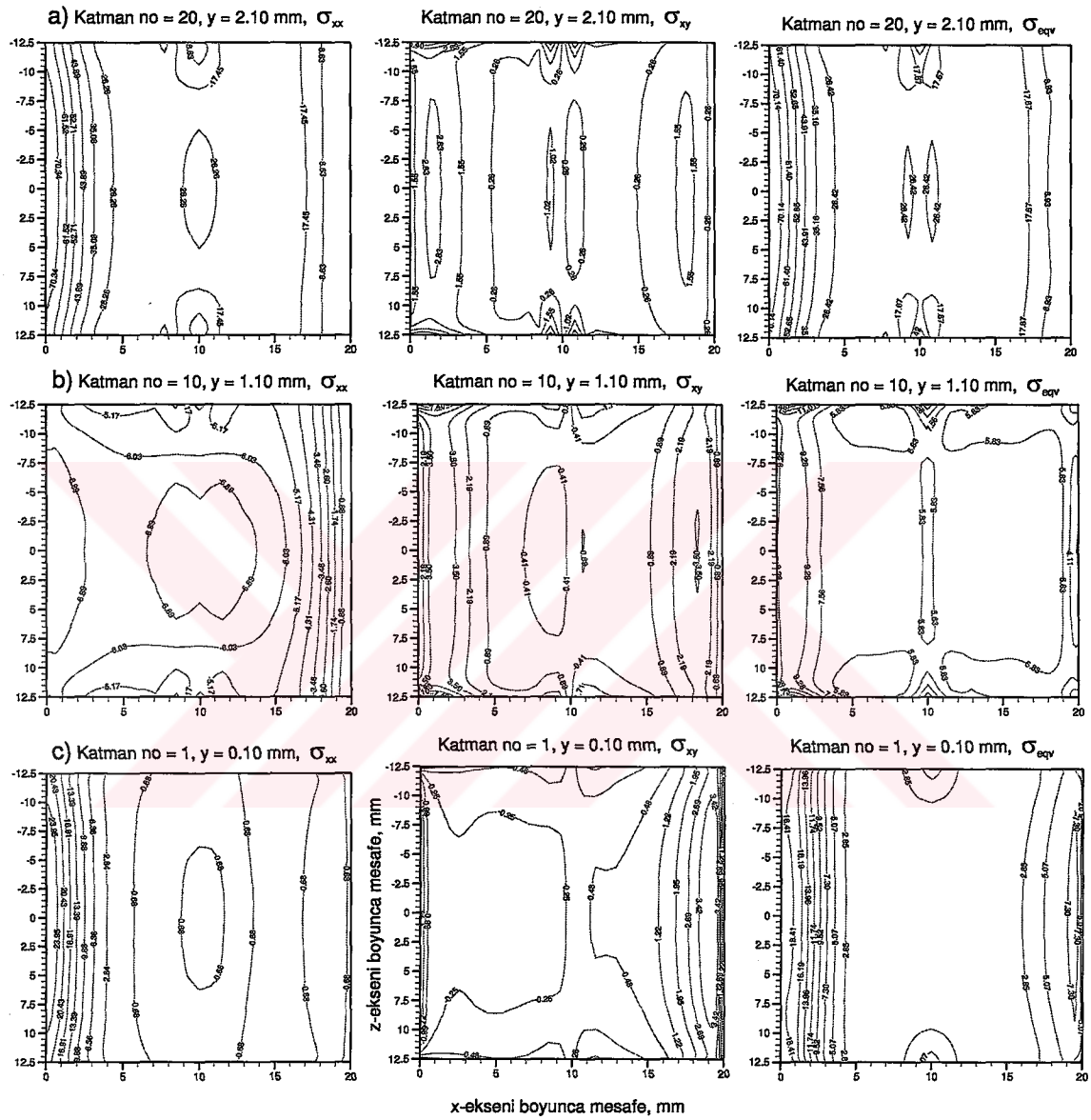
Şekil 5.17'de fonksiyonel kademelendirilmiş üst plaka bindirme bölgesinin üst, orta ve alt yüzeylerindeki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. Gerilme değerleri her bir elemanın üst düğüm noktasına extrapole edildiğinden üst plakanın alt yüzeyindeki ve alt plakanın üst yüzeyindeki en büyük gerilme değerleri Şekil 5.20'den görülebilir. Bağlantıya tatbik edilen eğme yükü neticesinde, normal gerilme σ_{xx}'in özellikle bindirme bölgesinin sol tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda yığıldığı görülmektedir. Üst plakanın metalce zengin alt yüzeyinde en büyük çekme gerilmesi oluşurken, seramikçe zengin üst yüzeyde en büyük basma gerilmesi oluşmaktadır (Şekil 5.17a,c). En büyük kayma gerilmesi σ_{xy} üst plakanın orta katmanında bindirme bölgesi sol tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda meydana gelmektedir (Şekil 5.17b). Kayma gerilmesi değer olarak normal gerilmeden 8-9 kat daha küçüktür. En büyük von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımı üst plakanın seramiçe zengin üst yüzeyinde bindirme bölgesinin sol tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda meydana gelmektedir (Şekil 5.17c). Metalce zengin alt yüzeyde von Mises gerilmesinin değeri nispeten daha küçüktür.

Şekil 5.18'de yapıştırıcı tabakasının üst, orta ve alt yüzeylerindeki normal gerilme

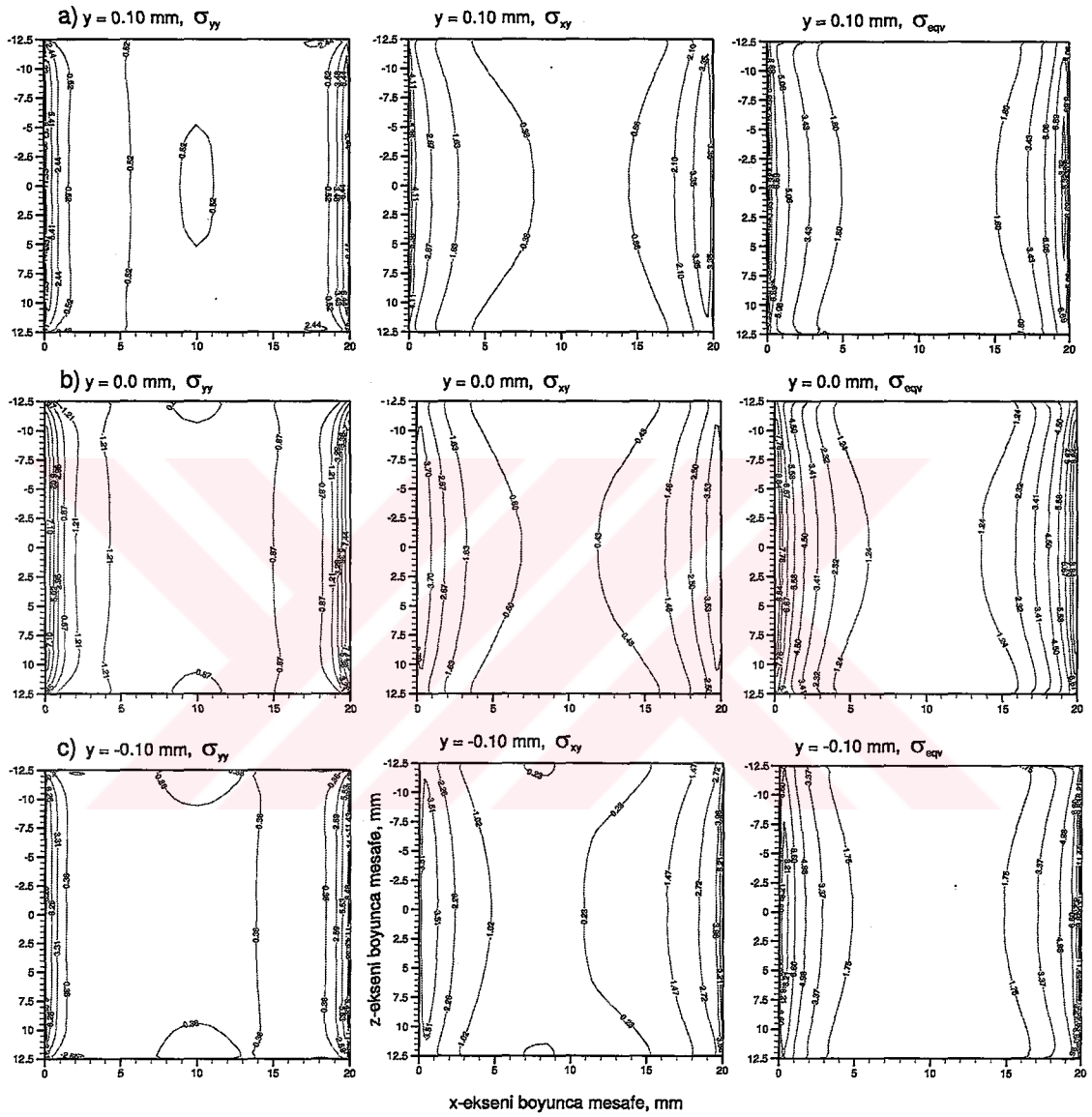
σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. En büyük normal gerilme σ_{yy}, yapıştırıcı tabakasının sol üst yüzeyinde en büyük çekme tarzında oluşurken sağ alt yüzeyinde en büyük basma tarzında oluşmaktadır. Yapıştırıcı tabakasının orta yüzeyindeki normal gerilme değerinin yaklaşık olarak alt ve üst yüzeylerdeki normal gerilme değerlerinin yarısına eşit olduğu görülmektedir. Normal gerilme σ_{yy} bileşeni yapıştırıcı tabakasının her doğrultusunda antisimetrik bir davranışa sahiptir (Şekil 5.18a,b,c). Kayma gerilmesi σ_{xy} bileşeninin benzer şekilde yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarının üst ve alt yüzeylerinde en büyük olduğu görülmektedir (Şekil 5.18a,c). Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca kayma gerilmesi değerinin hemen hemen aynı kaldığı ve normal gerilmeye göre yaklaşık olarak %160 daha küçük olduğu görülmektedir. Normal gerilme gibi kayma gerilmesi de antisimetrik bir davranış sergilemektedir (Şekil 5.18a,b,c). Benzer şekilde von Mises gerilmesi de yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarında yoğunlaşmakta ve simetrik bir davranış göstermektedir (Şekil 5.18a,b,c). Tüm gerilme bileşenlerine göre yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçlarının kritik bölgeler olduğu görülmektedir.

Şekil 5.19'da kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için fonksiyonel kademelendirilmiş alt plaka bindirme bölgesinin üst, orta ve alt yüzeylerindeki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. Normal gerilme σ_{xx}'in bindirme bölgesinin sağ tarafındaki yapıştırıcı serbest ucunda yığıldığı görülmektedir. Normal gerilme σ_{xx} alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde basma tarzında, metalce zengin alt yüzeyinde ise çekme tarzında oluşmuştur (Şekil 5.19a,c). En büyük kayma gerilmesi σ_{xy} alt plaka orta katmanın sağ tarafında yapıştırıcı serbest ucunda yoğunlaşmış ve yaklaşık olarak normal gerilmeden 9 kat daha küçüktür (Şekil 5.19b). von Mises gerilmesi plaka bindirme bölgesinin seramikçe zengin üst yüzeyinin sağ tarafında yoğunlaşmış ve üst plakada olduğu gibi seramikçe zengin üst yüzeyde en büyük, metalce zengin alt yüzeyde nispeten daha küçük değerdedir (Şekil 5.19a,b,c).

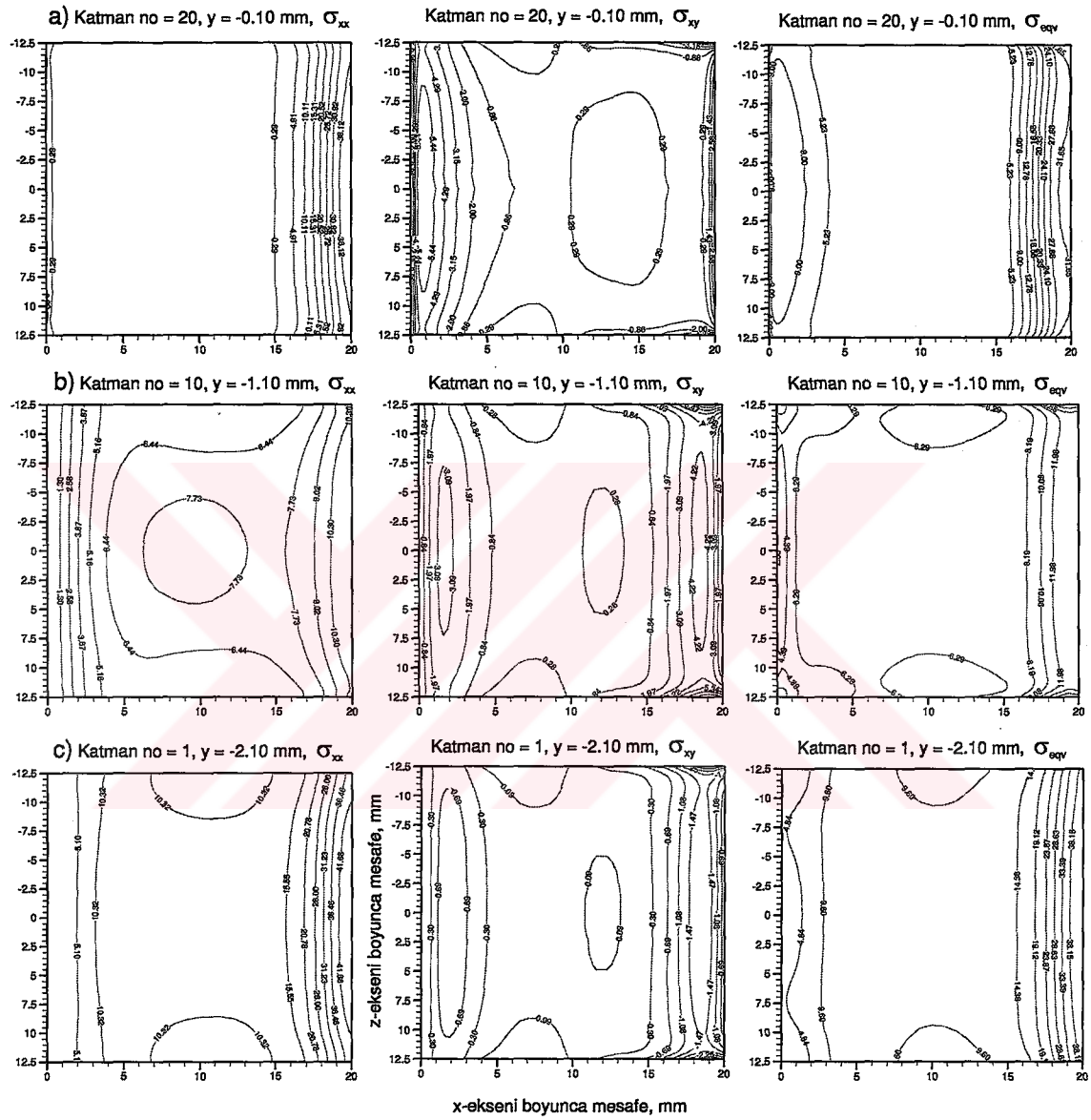
Sonuç olarak, eğme yükü neticesinde en yüksek gerilme değerleri yapıştırıcı serbest uçlarında oluşmuştur. Özellikle, üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların üst yüzeylerinde yüksek basma gerilmeleri oluşurken, alt yüzeylerinde yüksek çekme



Şekil 5.17: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.18: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.19: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).

gerilmeleri meydana gelmiştir. Bununla beraber, yapıştırıcı tabakasının sağ alt kenarlarında basma gerilmesi meydana gelirken sol üst kenarında çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Bu nedenle yapıştırıcı sol kenarının üst plakayla arayüz yaptığı bölge en kritik bölge olup bağlantı sistemindeki hasarın bu bölgeden başlaması beklenebilir.

Şekil 5.20'de yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üst plaka, yapıştırıcı tabakası ve alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda (Şekil 5.8'e bak) kalınlık boyunca normal gerilme, kayma gerilmesi ve von Mises gerilmesi değişimleri kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 iken görülmektedir.

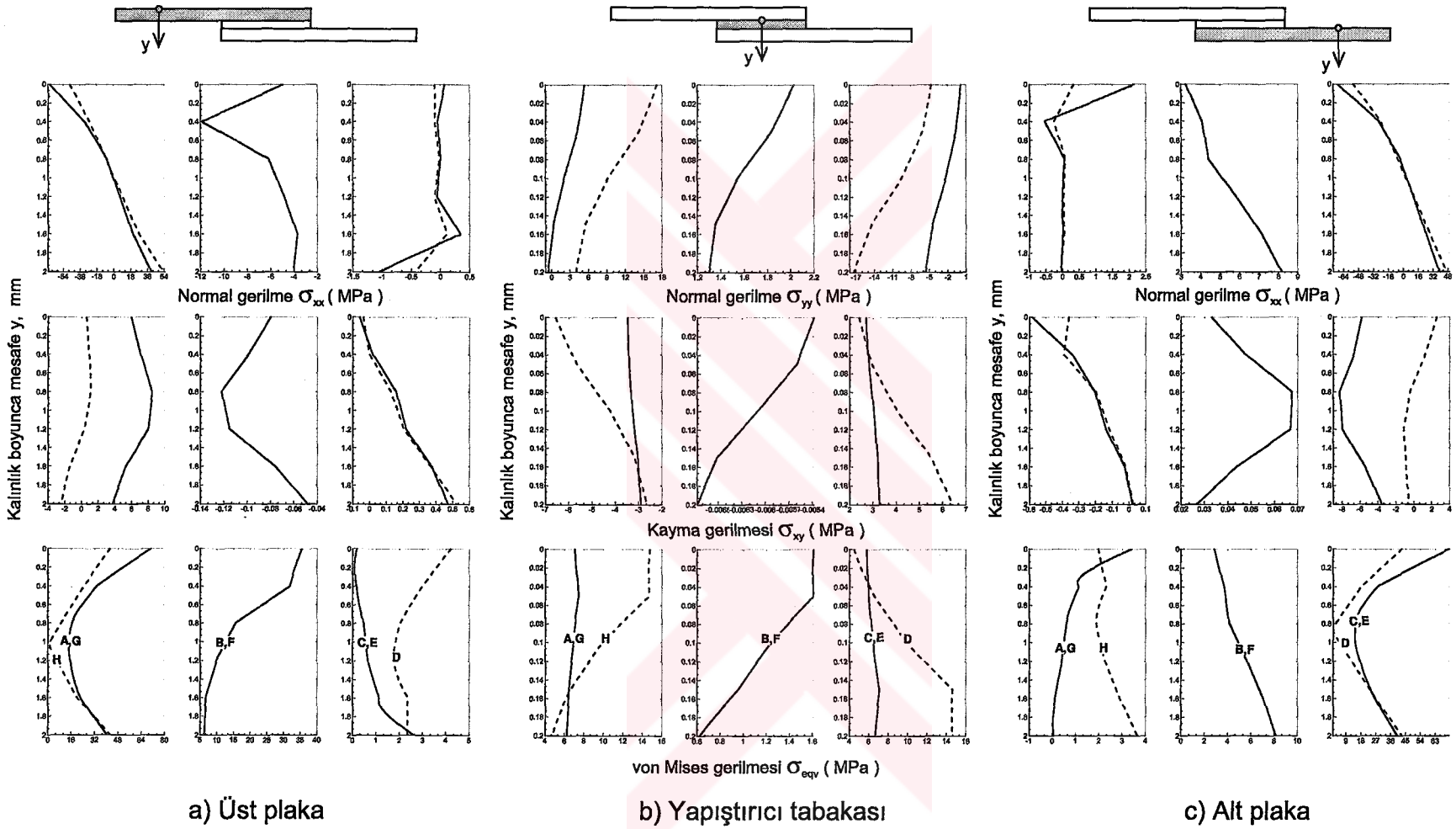
Analizlerde fonksiyonel kademelendirilmiş üst plaka için bindirme bölgesinin sol tarafının (AHG hattı) en kritik bölge olduğu görülmüştür. Bu bölgede σ_{xx} nomal gerilmesi seramikçe zengin üst yüzeyde basma tarzında meydana gelirken, metalce zengin alt yüzeyde çekme tarzında meydana gelmiştir. Böylece eğme analizinde de üst plaka kalınlığı boyunca normal gerilme σ_{xx}'in sıfır olduğu bir düzlem mevcuttur. Bu düzlem plaka kalınlığının tam ortasındadır. En büyük kayma gerilmesi σ_{xy} AHG hattında ve yaklaşık olarak plaka kalınlığının orta bölgesindedir. von Mises gerilmesi σ_{eqv} AHG hattında plakanın üst yüzeyinde en büyük değerde iken alt yüzeyinde nispeten daha küçük değerdedir. Yaklaşık olarak normal gerilmenin sıfır olduğu düzlemde en küçük değere ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.20a). Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının eğme analizinde de A ve G noktalarında yapıştırıcı tabakası ve plakaların kalınlıkları boyunca gerilmelerdeki değişimlerin aynı olduğu, H noktasında ise farklı değerlerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bağlantı sisteminde meydana gelen Poisson tesirleridir. Burada da yapıştırıcı ve plakaların kenarlarına doğru Poisson tesirlerinin arttığı görülmektedir.

Şekil 5.20b'de yapıştırıcı tabakasının bazı kritik noktalarında kalınlık boyunca normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri görülmektedir. σ_{yy} normal gerilmesi yapıştırıcı tabakasının H noktasında üst yüzeyde en büyük çekme tarzında oluşurken D noktasında alt yüzeyde en büyük basma tarzında oluşmuştur. Kayma gerilmesi σ_{xy}'de normal gerilme ile aynı yerlerde

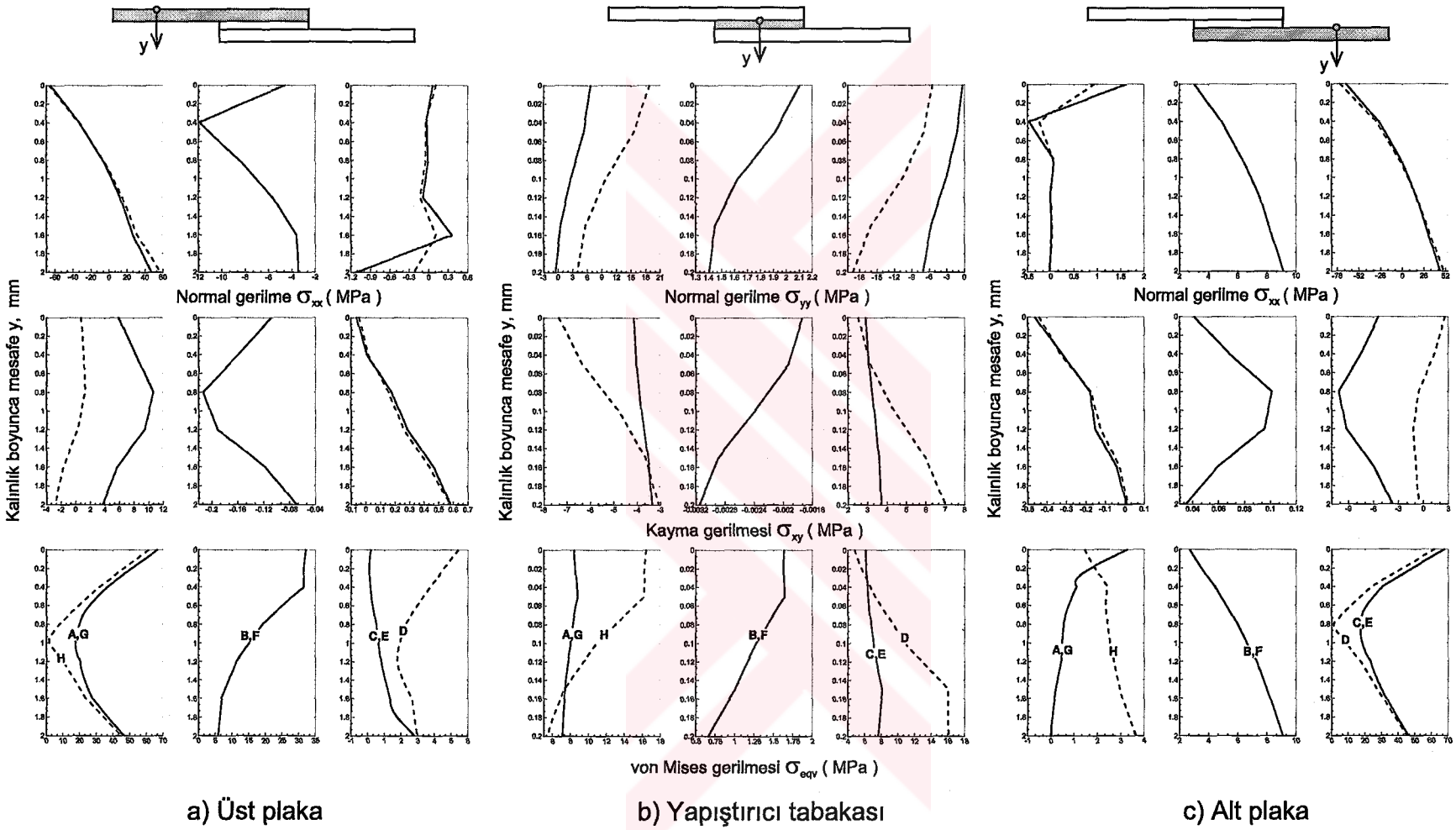
en büyüktür ve değer olarak normal gerilmeden yaklaşık % 160 daha küçüktür. Benzer davranış von Mises σ_{eqv} gerilmesi içinde geçerlidir. H ve D noktaları yapıştırıcı tabakası için kritik noktalardır ve bu noktalarda kalınlık boyunca gerilmelerin değişimi antisimetrik bir davranış sergilemektedir. Bunun nedeni, eğme deformasyonuna bağlı olarak yapıştırıcı tabakasının üst plaka tarafından soyulmaya zorlanırken alt plaka tarafından baskıya zorlanmasıdır.

Şekil 5.20c'de alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın bazı kritik noktalarında kalınlık boyunca normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri $n=$ 0.1 için görülmektedir. Üst plakanın tersine normal gerilme σ_{xx} bindirme bölgesinin sağ tarafında (CDE hattı) plaka alt yüzeyinde çekme, üst yüzeyinde ise basma tarzında oluşmuştur. Burada da normal gerilme σ_{xx}'in sıfır olduğu düzlem plaka kalınlığının ortasındadır. Kayma gerilmesi σ_{xy}'de CDE hattında yoğunlaşmakta ve plaka kalınlığının orta bölgesinde en büyük olmaktadır. Benzer şekilde von Mises gerilmesi de CDE hattında yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu değer seramikçe zengin plaka üst yüzeyinde metalce zengin alt yüzeyden yaklaşık olarak % 55 daha büyüktür. von Mises gerilmesi σ_{eqv}, normal gerilme bileşeni σ_{xx}'in sıfır olduğu düzlemde en küçük değeri almaktadır (Şekil 5.20c). Alt plakada da özellikle plaka kenarına doğru Poisson tesirlerinin önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

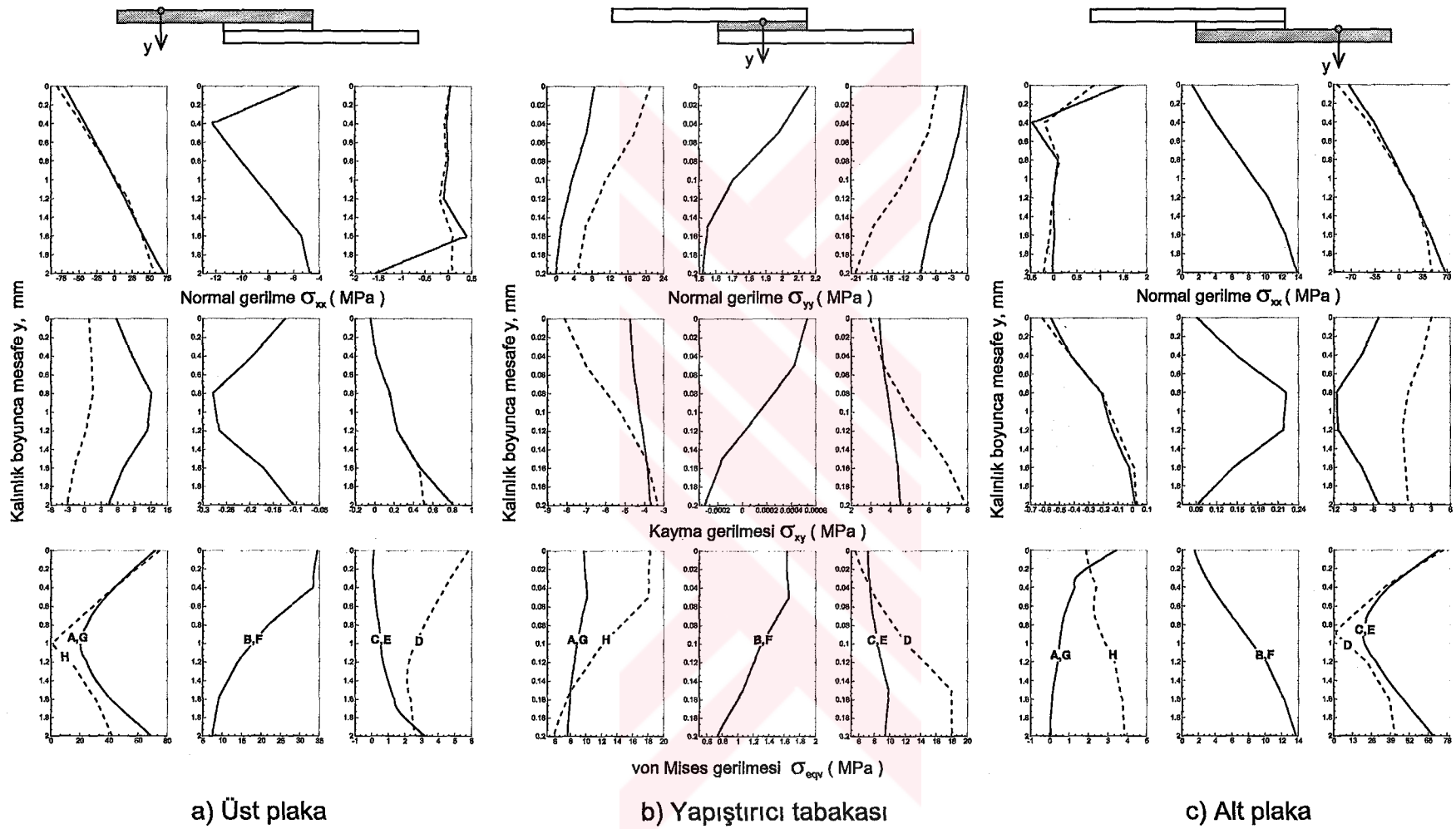
Şekil 5.21 ve 22'de sırasıyla kompozisyonel gradyant $n=$ 1.0 ve 10.0 için yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üst plaka, yapıştırıcı tabakası ve alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda (Şekil 5.8'e bak) kalınlık boyunca normal gerilme, kayma gerilmesi ve von Mises gerilmesi değişimleri görülmektedir. Şekil 5.20'de gösterilen ve $n=$ 0.1 iken oluşan gerilme profillerinin değişmediği görülürken, artan kompozisyonel gradyant n ile kritik noktalardaki gerilme değerlerinin artmış olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, çekme analizinde de ifade edildiği gibi artan kompozisyonel gradyant n ile alt ve üst plakalardaki seramik (Al_2O_3) malzemenin hacimsel oranının artması ve plakaların daha rijit bir yapıya kavuşmalarıdır.



Şekil 5.20: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri ($n = 0.1$) (Şekil 5.8'e bak).



Şekil 5.21: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak).



Şekil 5.22: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri ($n = 10.0$) (Şekil 5.8'e bak).

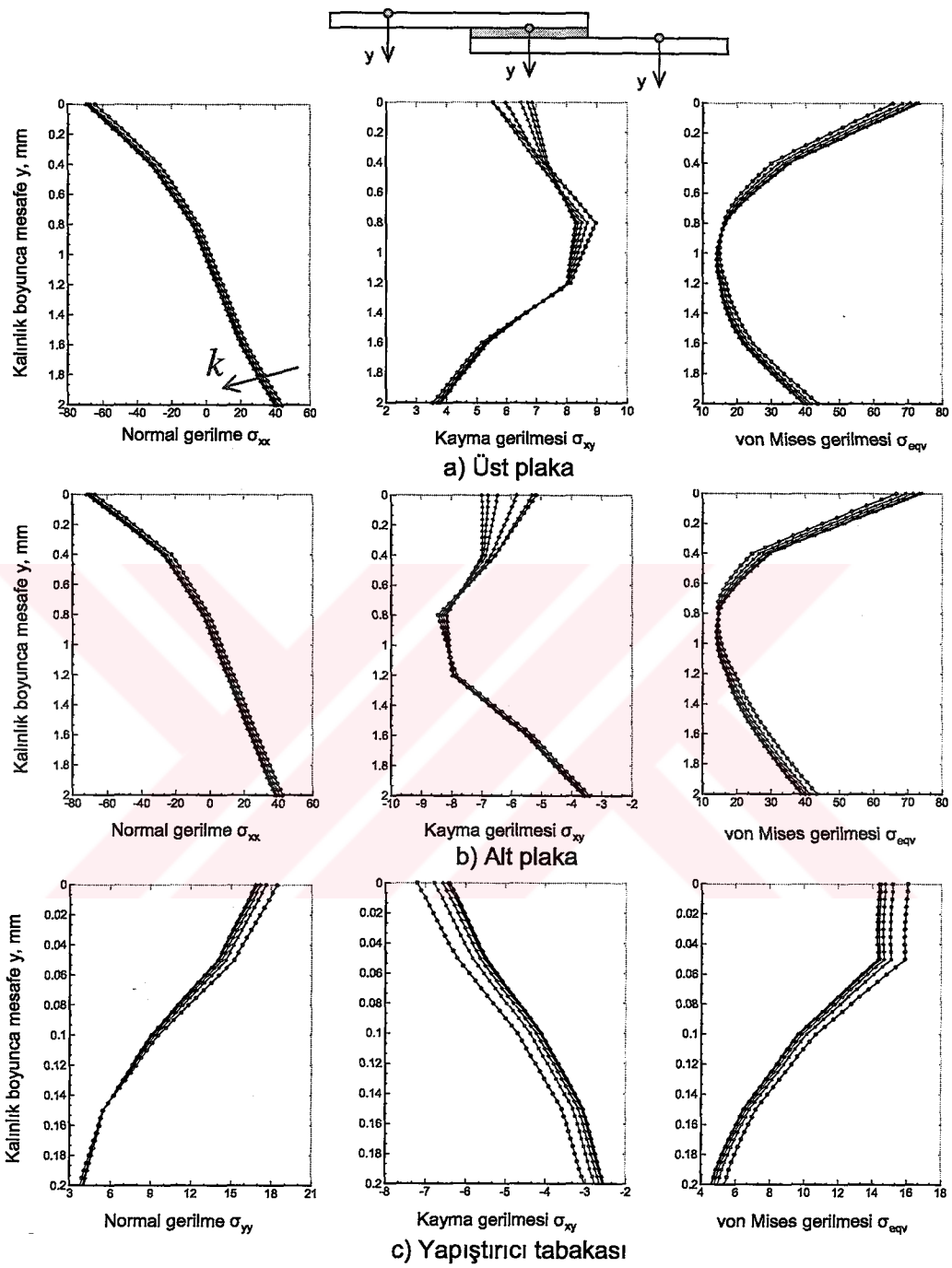
5.3.3 Katman Sayısının Etkisi

Eğme yüküne maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısında oluşan gerilmeler üzerinde üst ve alt plaka katman sayılarının etkisi araştırıldı. Bu amaçla plaka katman sayıları k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250 için analizler tekrarlandı.

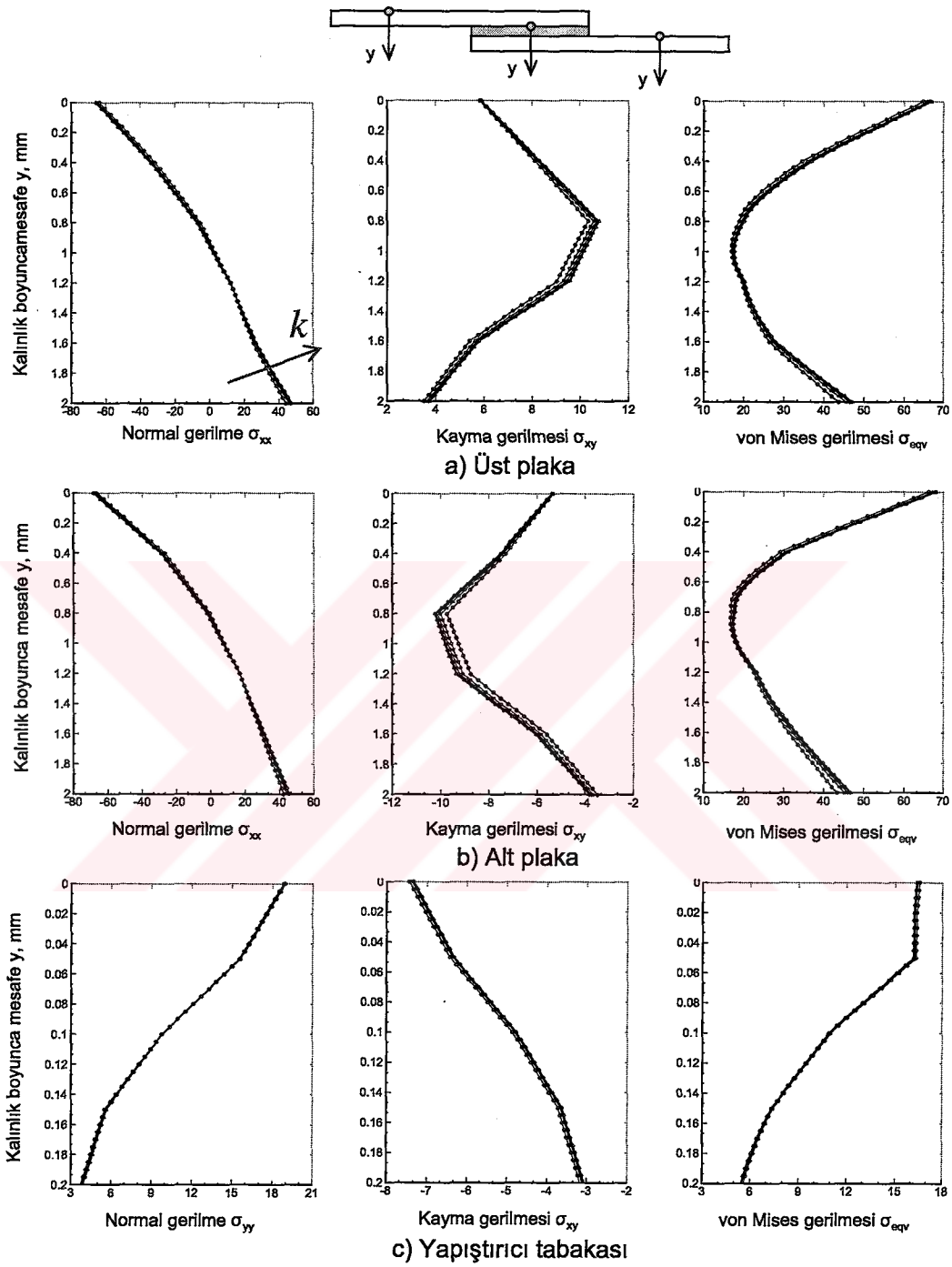
Şekil 5.23-25'de sırasıyla kompozisyonel gradyant n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için bağlantı bindirme bölgesindeki kritik noktalarda (Şekil 5.8'e bak) kalınlıklar boyunca normal gerilme (plakalar için σ_{xx}, yapıştırıcı tabakası için σ_{yy}), kayma gerilmesi (σ_{xy}) ve von Mises (σ_{eqv}) gerilmelerindeki değişimler üzerinde üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katman sayılarının etkisi görülmektedir. Çekme analizinde olduğu gibi eğme analizinde de kritik gerilme noktaları üst plaka için G, alt plaka için C ve yapıştırıcı tabakası için H noktalarıdır. Burada da katman sayısının etkisi incelenirken en yüksek gerilmelerin meydana geldiği bu kritik noktalarda kalınlıklar boyunca gerilme değişimleri dikkate alınmıştır.

n= 0.1 iken, en yüksek normal ve von Mises gerilmeleri üst ve alt plakalarda sırasıyla bindirme bölgesinin sol ve sağ taraflarında ve plakaların seramikçe zengin üst yüzeylerinde basma gerilmesi tarzındadır. Kayma gerilmeleri üst ve alt plakaların kalınlıkları boyunca zıt yönlü ve parabolik değişimlere sahip olup plaka kalınlıklarının orta bölgelerinde en büyüktür (Şekil 5.23a,b). Katman sayısı yükseldikçe gerilme profilleri aynı kalırken, gerilme seviyeleri arasında küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. Özellikle katman sayısı k= 20 iken plaka kalınlıkları boyunca üniform gerilme profilleri elde edilmiştir. Buna karşın, plakaların seramikçe zengin yüzeylerinde gerilme değerleri arasında küçük farklılıklar görülmektedir, özellikle bu fark kayma gerilmesi σ_{xy}'de daha belirgindir (Şekil 5.23a,b). Yapıştırıcı tabakasında da, katman sayısındaki artışın gerilme profilleri üzerinde önemli bir etkisi görülmemektedir. Şöyleki, gerilme değerlerinde k= 20 katman sayısına kadar azda olsa faklılıklar görülürken, 20 katmandan sonra gerilme değerleri aynı kalmaktadır (Şekil 5.23c).

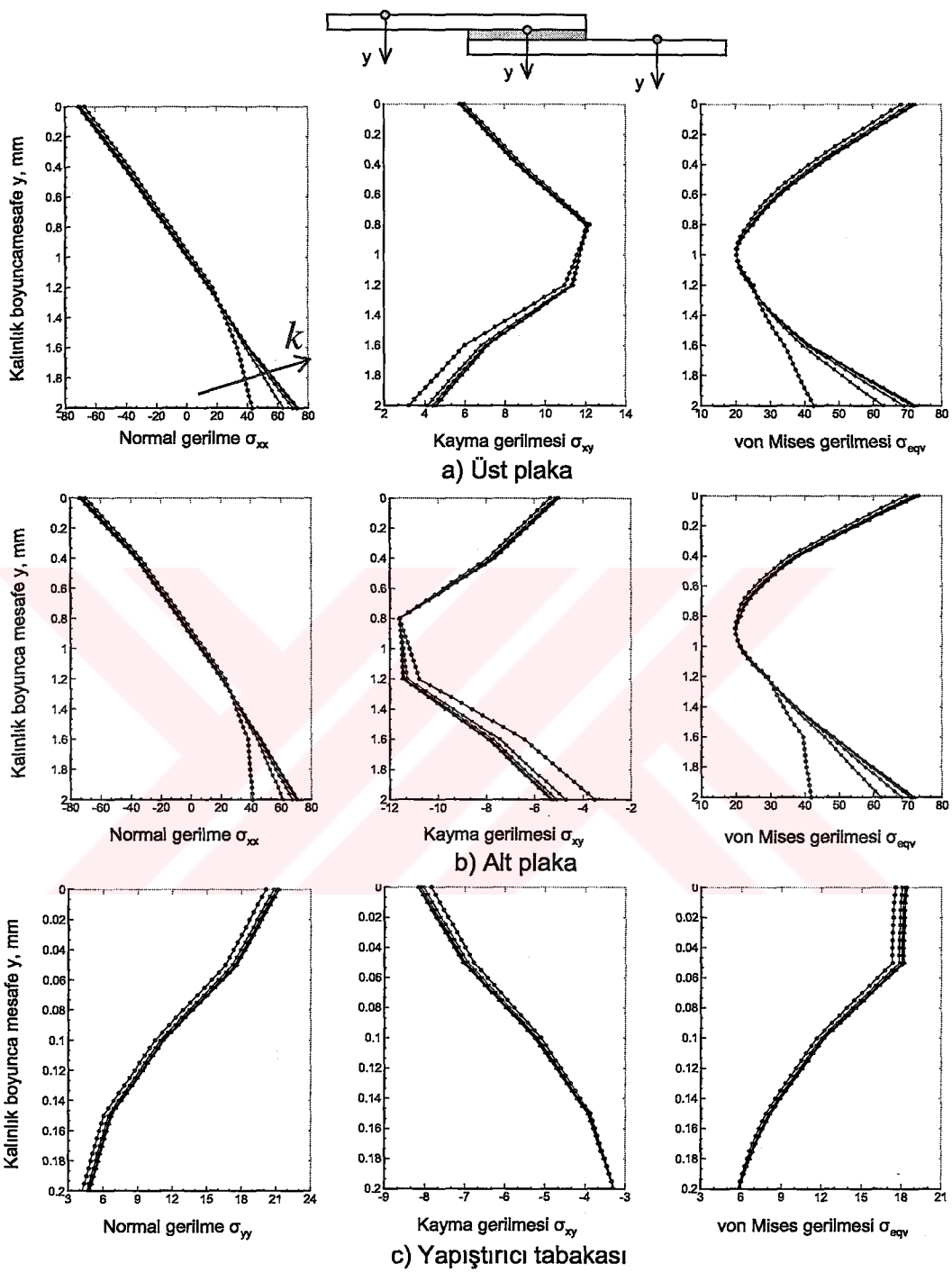
Lineer malzeme kompozisyonu n= 1.0 için, üst plaka, alt plaka ve yapıştırıcı tabakasındaki gerilme bileşenlerinin kompozisyonel gradyanttaki değişimden etkilenmediği ve n= 0.1 ile benzer olduğu görülmektedir. Bununla beraber, en



Şekil 5.23: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.24: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 5.25: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

yüksek normal, kayma ve von Mises gerilme değerlerinin pek fazla değişmediği, ayrıca yapıştırıcı tabakası ve plaka kalınlıkları boyunca gerilme profillerinin daha üniform oldukları ve de gerilme değerleri arasındaki farkların ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir (Şekil 5.24).

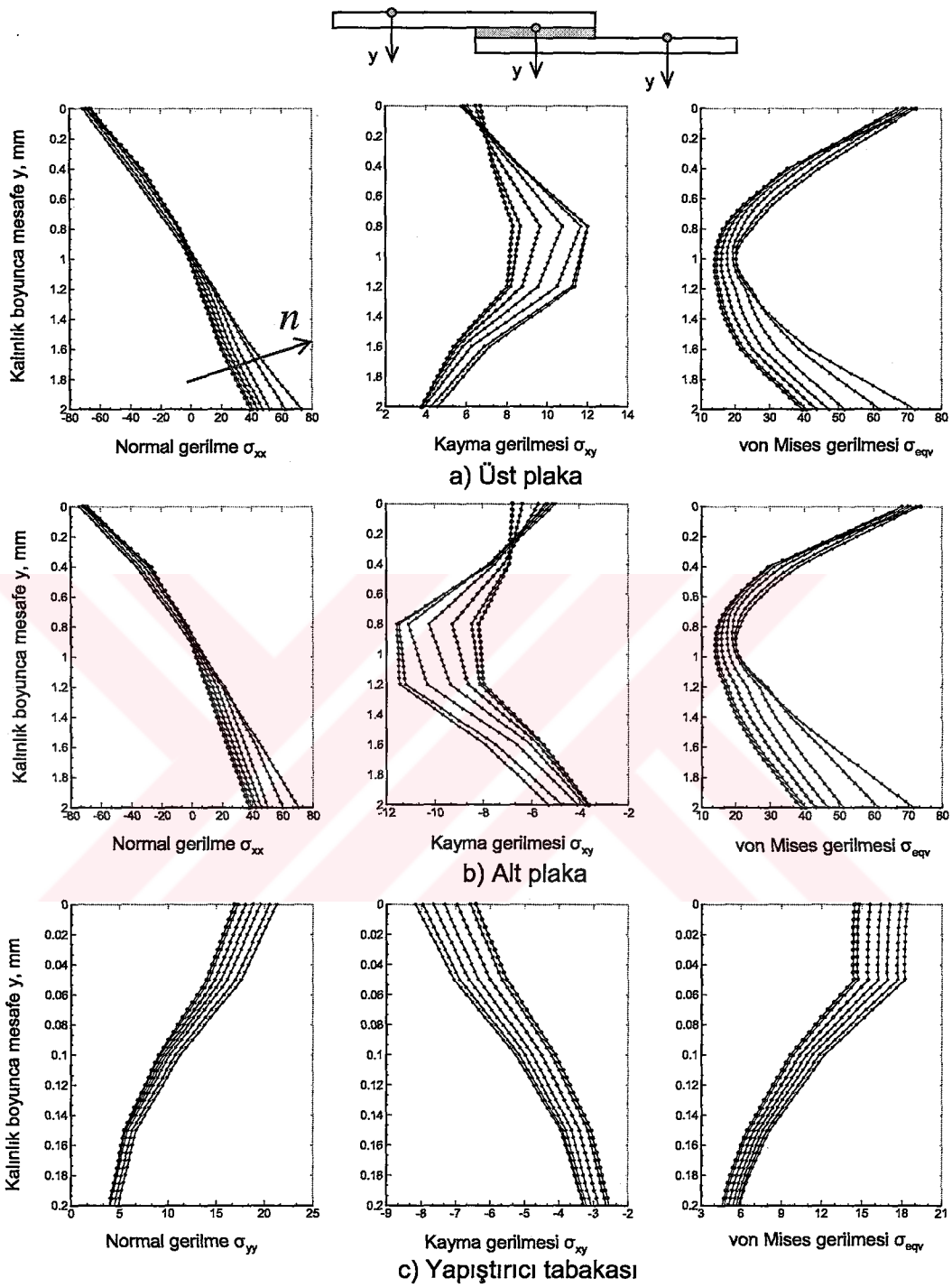
$n=$ 10.0 için, bağlantının bindirme bölgesinde $n=$ 0.1 (Şekil 5.23) ve $n=$ 1.0 (Şekil 5.24) durumlarıyla benzer gerilme davranışları görülmektedir. Ancak, üst ve alt plakaların metalce zengin alt yüzeylerinde katman sayısına göre gerilme seviyeleri arasında farklar dikkate değerdir. Katman sayısı 20'den sonra gerilmeler hemen hemen aynı değerlere ulaşmaktadır (Şekil 5.25a,b). Yapıştırıcı tabakasında artan katman sayısına karşın kalınlık boyunca meydana gelen gerilme profillerinin üniform oldukları görülmektedir (Şekil 5.25c). $n=$ 0.1 ve 1.0 ile mukayese edildiğinde, kompozisyonel gradyant $n=$ 10.0 iken yapıştırıcı tabakası ve plakalardaki gerilme değerleri daha yüksektir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının eğme yükü altındaki gerilme analizlerinde, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katman sayılarının bağlantı bindirme bölgesindeki baskın gerilme profilleri üzerinde pek fazla tesirinin olmadığı görülmüştür. Çekme analizinde olduğu gibi burada da 20 katmana kadar en yüksek gerilme değerlerinde az da olsa bir artışın olduğu, 20 katmandan sonra gerilme değerlerinin de aynı kaldığı belirlenmiştir.

5.3.4 Kompozisyonel Gradyantın Etkisi

Eğme yüküne maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısında, kompozisyonel gradyant n'deki değişimin bağlantıda meydana gelen gerilmeler üzerindeki etkisi de araştırıldı. Şekil 5.26'da katman sayısı $k=$ 20 sabit tutularak farklı kompozisyonel gradyantlarda ($n=$ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) bağlantı üst plaka, alt plaka ve yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal, kayma ve von Mises gerilmelerindeki değişimler görülmektedir.

Eğme yükü neticesinde bağlantı sisteminde meydana gelen simetrik deformasyon sonucunda üst ve alt plakalardaki normal ve von Mises gerilmelerinin aynı profillere



Şekil 5.26: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka (G noktası), b) alt plaka (C noktası) ve c) yapıştırıcı tabakası (H noktası) bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca normal gerilmeler σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

ve değerlere sahip olduğu, kayma gerilmelerinin ise yine aynı değerlerde fakat ters yönlü olduğu görülmektedir. Kompozisyonel gradyanttaki artışın gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı görülürken, gerilme değerlerinde dikkate değer artışlar görülmektedir. Artan komposizyonel gradyant n ile üst ve alt plakalardaki normal gerilme σ_{xx} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerindeki artışlar plakaların metalce zengin alt yüzeylerinde en büyüktür ve sırasıyla normal gerilme %85, von Mises gerilmesi ise %75 oranlarında artmıştır. Kayma gerilmelerindeki σ_{xy} artış üst ve alt plaka kalınlıklarının orta bölgelerinde en büyüktür ve artan kompozisyonel gradyant ile %50 oranında artmıştır (Şekil 5.26a,b).

Artan kompozisyonel gradyant n ile yapıştırıcı tabakasının normal σ_{yy}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerindeki artışların yapıştırıcı alt yüzeyine oranla üst yüzeyde daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yapıştırıcı üst yüzeyinin çekmeye maruz üst plaka alt yüzeyi ile arayüze sahip olmasıdır (Şekil 5.26c). Normal gerilme değerleri arasındaki fark alt plaka-yapıştırıcı arayüzünde çok küçükken, üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde dikkate değerdir; yani, %25 oranında artmıştır. Benzer şekilde, kayma gerilmeside üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde en yüksek değere sahiptir ve yapıştırıcı kalınlığı boyunca üniform olarak azalmaktadır. Artan kompozisyonel gradyant ile kayma gerilmesi profilleri değişmezken, yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilmenin değeri artmaktadır. Bu artış üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde %25 olmaktadır (Şekil 5.26c). von Mises gerilmesi profilleride kompozisyonel gradyanttaki değişimden etkilenmemektedir. Ancak normal gerilmede olduğu gibi özellikle üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde %28 oranında bir artışa sahiptir (Şekil 5.26c).

Neticede, eğme yüküne maruz bağlantı sisteminin üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarında kompozisyonel gradyant n 100 kat artarken, tek bindirme bağlantısının kritik noktalarındaki en büyük gerilme artışı 2 kata yakın olmaktadır.

5.3.5 Sonuçlar

Yapısal yükler altında yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş (Ni–Al_2O_3) tek bindirme bağlantıların gerilme ve deformasyon davranışlarını belirleyebilmek için bağlantı sisteminin çekme ve üç nokta eğme analizleri yapıldı.

Aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

i) Çekme testi ile bağlantı sisteminin boyuna çekme kuvvetlerine karşı mukavemeti incelenirken, üç nokta eğme testi ile de yapıştırıcının soyulmaya karşı mukavemeti incelendi.

ii) Her iki analiz sonucunda, fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının alt ve üst plakalarında normal gerilme σ_{xx} ve kayma gerilmesi σ_{xy} bileşenleri baskın iken yapıştırıcı tabakasında normal gerilme σ_{yy} ve kayma gerilmesi σ_{xy} bileşenlerinin baskın olduğu tespit edildi.

iii) Çekme ve eğme yüküne maruz fonksiyonel kademelendirilmiş (Ni–Al_2O_3) tek bindirme bağlantısında en yüksek gerilmelerin üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde meydana geldiği görüldü. Bu nedenle bu bölgeler bağlantının en kritik bölgeleridir.

iv) Bağlantı bindirme bölgesindeki kritik gerilme noktalarında üst plaka, alt plaka ve yapıştırıcı tabakasının kalınlıkları boyunca oluşan gerilme değişimleri üzerinde fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katman sayılarının etkisinin çok küçük olduğu tespit edildi.

v) Kompozisyonel gradyantın kritik noktalardaki gerilme profilleri üzerindeki etkisi önemsiz olsada gerilme büyüklükleri üzerindeki etkisinin dikkate değer olduğu görülmüştür.

vi) Plakaların ve yapıştırıcı tabakasının kenarlarına doğru poisson tesirlerinde dikkate değer oranda bir artışın olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 6

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ TEK BİNDİRME BAĞLANTILARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

6.1 Giriş

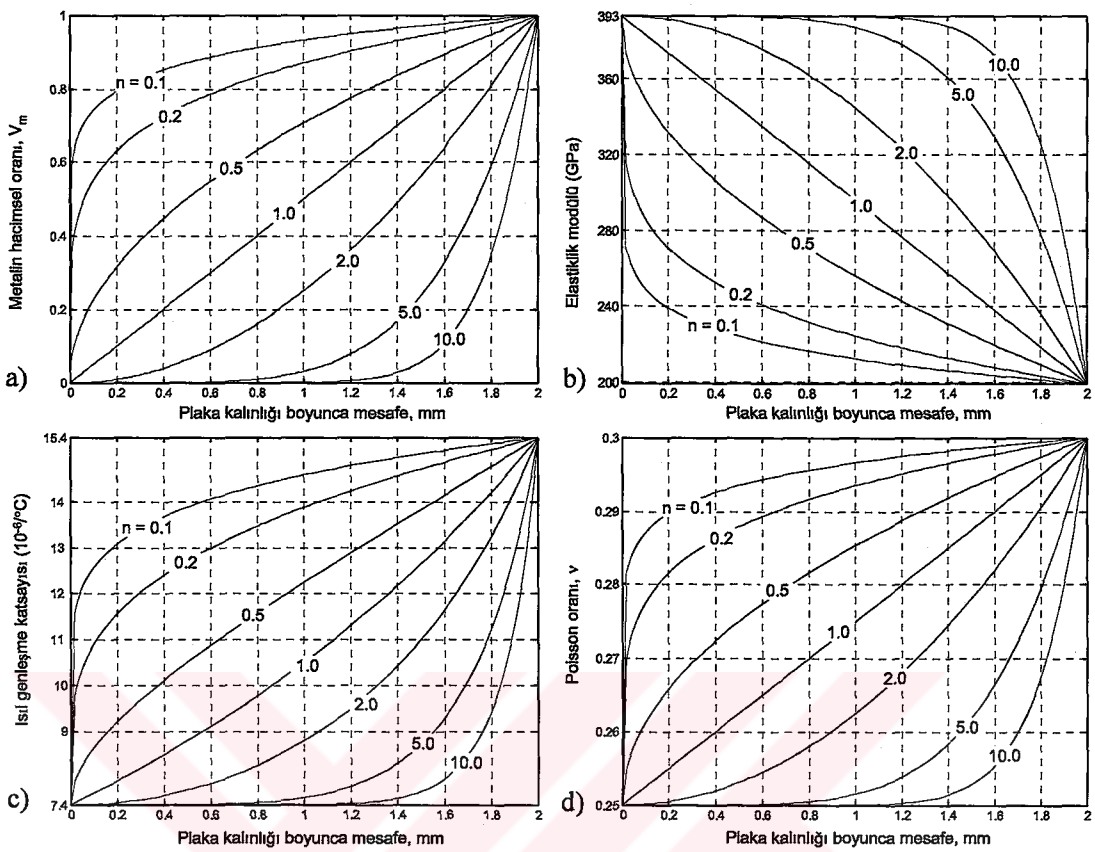
Bu bölümde, epoxy yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantıların üniform sıcaklık yükü altındaki üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri iki farklı uç şartı için yapıldı. Analizlerde termomekanik özellikleri Tablo 6.1'de verilmiş olan epoxy yapıştırıcıyla birleştirilmiş metal (Ni) ve seramikten (Al_2O_3) oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar kullanılmıştır. Kompozisyonel gradyant (n) ve katman sayısındaki (k) değişimlerin fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantılarda meydana gelen ısıl artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımları üzerindeki etkileri de araştırıldı.

6.2 Teorik Model

İki farklı bağlantı uç şartı için yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının üniform sıcaklık yükü altında üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri yapıldı. Analizler için Bölüm 5'de verilen model

Tablo 6.1: Fonksiyonel kademelendirilmiş yapıştırıcı bağlantısını oluşturan plakaların ve yapıştırıcının termo-mekanik özellikleri.

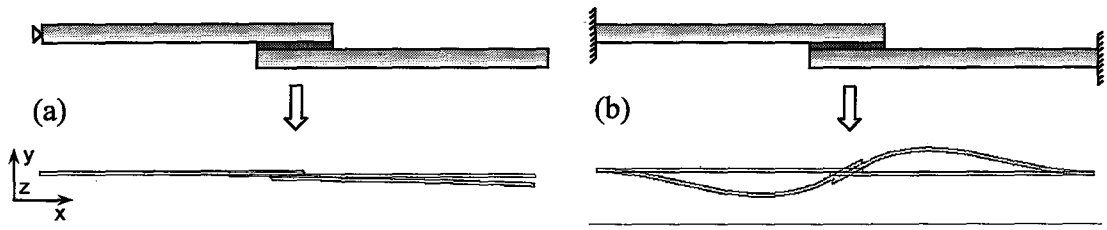
Özellikler	**Bileşenler**		**Epoxy yapıştırıcı**
	Ni	Al_2O_3	
E (GPa)	199.5	393	4.39
v	0.3	0.25	0.34
α (10^{-6}/°C)	15.4	7.4	40.47



Şekil 6.1: Farklı kompozisyonel gradyantlarda Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın kalınlığı boyunca (a) metal fazın hacimsel oranı V_m, (b) elastiklik modülü E, (c) Poisson oranı ν ve (d) ısıl genleşme katsayısı α değişimleri.

kullanılmıştır (Şekil 5.1). Plakaların üst ve alt yüzeyleri sırasıyla saf seramik (Al_2O_3) ve saf metal (Ni) olup ara bölge bir üstel fonksiyone göre fonksiyonel olarak kademelendirilmiştir. Üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların hacimsel oranları ve buna bağlı olarak elastisite modülü (E), Poisson oranı (ν) ve ısıl genleşme katsayılarının (α) hesaplanması Bölüm 4.2'de ayrıntılı verilmiştir. Farklı kompozisyonel gradyantlarda metalin hacimsel oranı, elastisite modülü, Poisson oranı ve ısıl genleşme katsayısındaki değişimler Şekil 6.1'de görülmektedir. Gerilme analizleri için kullanılan sonlu elemanlar modeli de Bölüm 5'de kullanılan modelin aynısıdır (Şekil 5.2). Bununla ilgili genel teori ise Bölüm 4.3'de anlatılmıştır.

Üniform sıcaklık değişimine maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının ısıl artık gerilme analizi için Şekil 6.2'de gösterilen iki farklı uç şartı kullanılmıştır. Birinci sınır şartında (SŞ-I), yapıştırıcı bağlantısının tamamen



Şekil 6.2: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının (a) serbest (SŞ-I) ve (b) sabitlenmiş (SŞ-II) sınır şartları için deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri.

serbest ve 120°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu kabul edilirken, ikinci sınır şartında (SŞ-II), bağlantının her iki ucunun tamamen sabitlendiği ve 40°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu kabul edilmiştir. Yapıştırıcı bağlantısının her iki sınır şartı neticesinde deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri Şekil 6.2'de görülmektedir. Buna göre, bağlantı bindirme bölgesinin ikinci sınır şartında önemli deformasyonlara maruz kaldığı görülürken, birinci sınır şartında yapıştırıcı tabakasında önemsiz deformasyonların meydana geldiği görülmektedir.

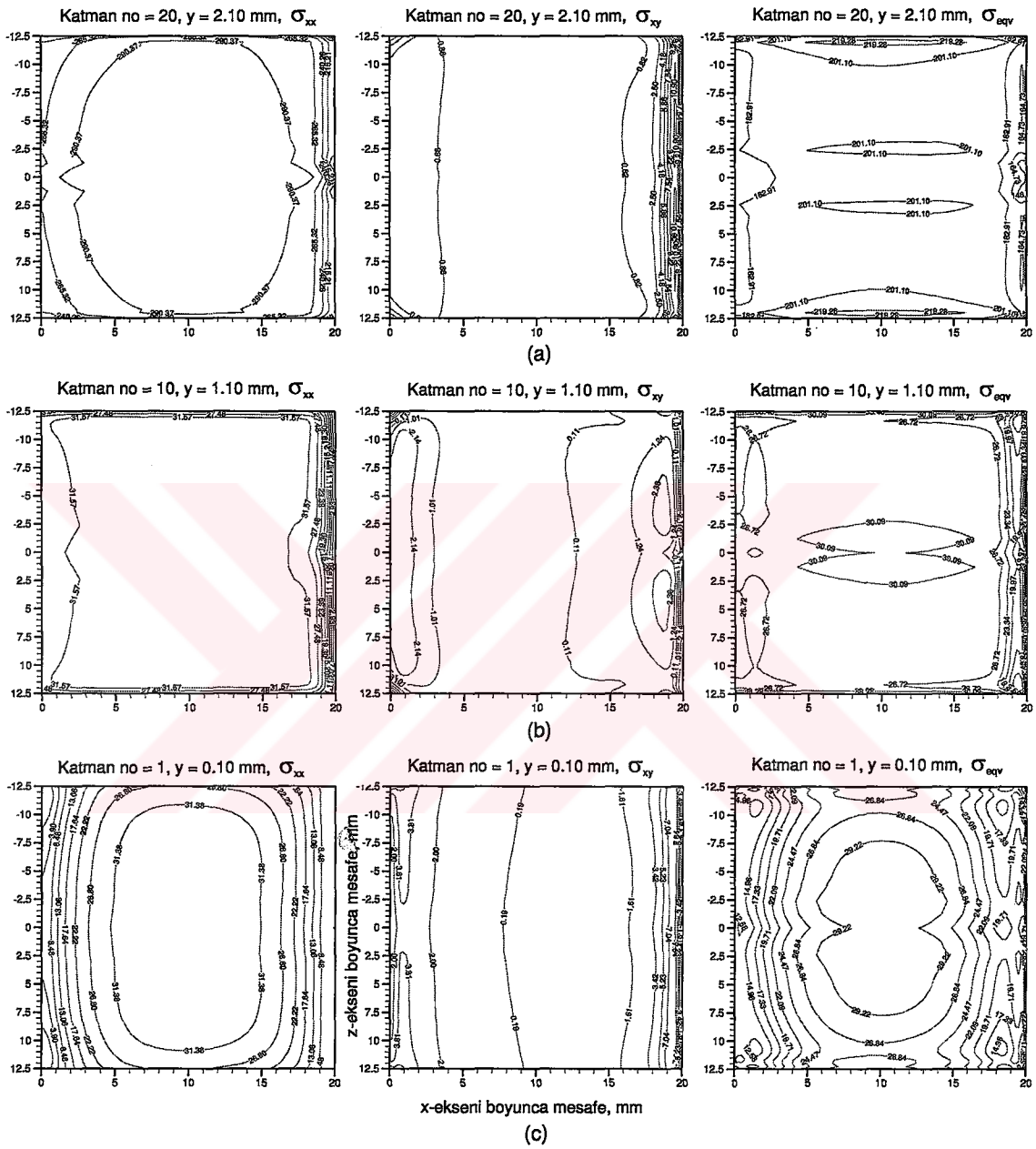
6.3 Serbest Model (SŞ-I)

Burada, serbest haldeki tek bindirme bağlantısının 120°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu kabul edildi (Şekil 6.2a). İlk olarak, yapıştırıcı bağlantısının ısıl gerilme analizleri için plaka kalınlığı boyunca fonksiyonel kademelendirilmiş bölgede; i) metalce zengin kompozisyon (n= 0.1), ii) lineer kompozisyon (n= 1.0) ve iii) seramikçe zengin kompozisyon (n= 10.0) olmak üzere üç farklı malzeme kompozisyonu dikkate alındı. Analizler neticesinde gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarının bağlantının bindirme bölgesinde ortaya çıktığı görülmüştür. Bu nedenle, bağlantının bindirme bölgesinde üst ve alt plakaların tüm katmanları ile yapıştırıcı tabakasının normal ve kayma gerilmesi dağılımları ayrıntılı değerlendirilmiştir.

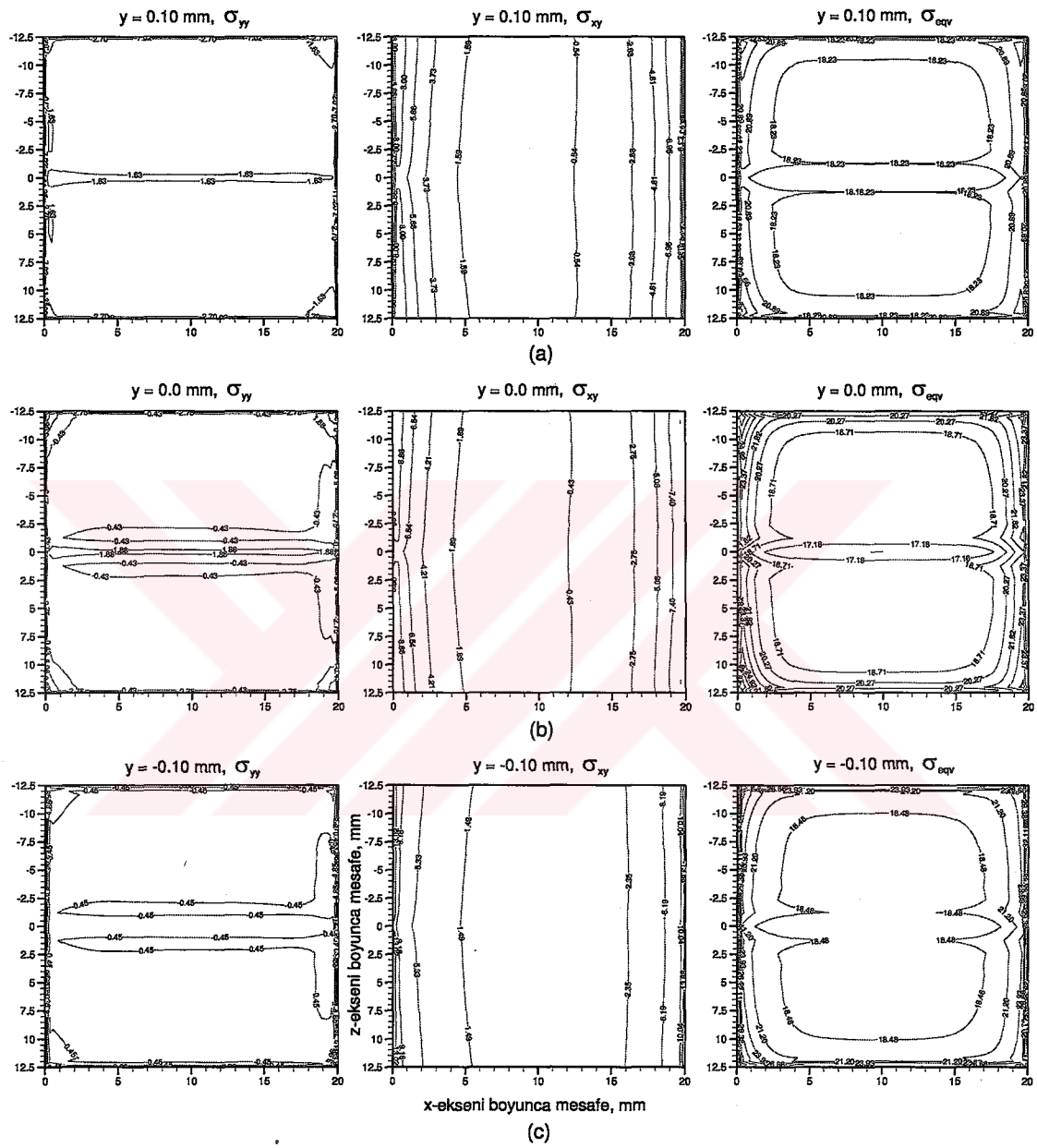
Normal gerilmelerin üst plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde yoğunlaştığı ve burada normal gerilme bileşenlerinden σ_{xx} normal gerilmesinin en büyük olduğu görülmüştür. Normal gerilmelerle mukayese edildiğinde kayma gerilmeleri ihmal edilebilecek kadar küçüktür; yinede, kayma gerilmesi bileşenleri arasında σ_{xy} kayma

gerilmesi en büyüktür. Gerilme yığılmalarının yapıştırıcı serbest uclarında ve buralara tekabül eden üst ve alt plaka bölgelerinde meydana gelmesi nedeniyle Şekil 5.8'de gösterilen bazı kritik bölgelerde oluşan gerilmeler değerlendirilmiştir. Buna göre, Şekil 6.3'de kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için üst plaka bindirme bölgesinde plakanın en üst, orta ve en alt katmanlarında oluşan normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. Üst plaka bindirme bölgesinde, en üst katmanın ortasında geniş bir bölgede basma tarzında σ_{xx} normal gerilmesinin yığıldığı ve katmanın kenarlarına doğru üniform olarak azaldığı görülmüştür. En üst tabakanın yapıştırıcı serbest uçlarına tekabül eden bölgelerinde gerilme yığılmaları meydana gelmiştir. Kayma gerilmesi σ_{xy}, normal gerilme σ_{xx} ile mukayese edildiğinde ihmal edilebilir değerlerdedir, fakat kayma gerilmesi bileşenleri arasında baskın olandır ve üst plaka bindirme bölgesinin sağ serbest ucu boyunca yığılmıştır (CDE hattı, Şekil 5.8). von Mises gerilmesi σ_{eqv} bindirme bölgesinin geniş bir bölümünde yüksek seviyelere sahiptir. Özellikle von Mises gerilmesi en üst katmanın yan serbest kenarlarında (GFE, ABC) en büyük değere ulaşırken AHG serbest kenarı boyunca daha düşük seviyelerde oluşmaktadır. Üst plaka bindirme bölgesinin en üst katmanında xz–plaka düzleminin yanal kenarları ve bindirme bölgesinin ortasında geniş bir alan yüksek gerilme dağılımlarına maruzdur. Bununla beraber, normal gerilme σ_{xx} üst plakanın seramikçe zengin üst yüzeyde basma gerilmesinden metalce zengin alt yüzeyine çekme gerilmesine değişmektedir. Üst plakanın kalınlığı boyunca farklı katmanlarda gerilme yığılma bölgeleri aynı kalmıştır; yani, plaka düzleminde her bir katmanın yan kenarları ve bindirme bölgesinin ortası en kritik yerlerdir. Normal gerilme σ_{xx} yaklaşık olarak üst yüzeyde -290 MPa'dan alt yüzeyde 32 MPa'a düşmüştür. Mevcut kompozisyonda ($n=$ 0.1) üst plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun metalce (Ni) zengin olması nedeniyle en üst seramik yüzey ve buraya yakın bölgeler haricinde plaka genel olarak düşük gerilme dağılımlarına sahiptir. Yani, üst plakanın seramikçe zengin üst yüzeyindeki en büyük normal ve von Mises gerilmeleri metalce zengin alt yüzeydeki gerilmelerden sırasıyla 7.5 ve 5.5 kat daha büyüktür.

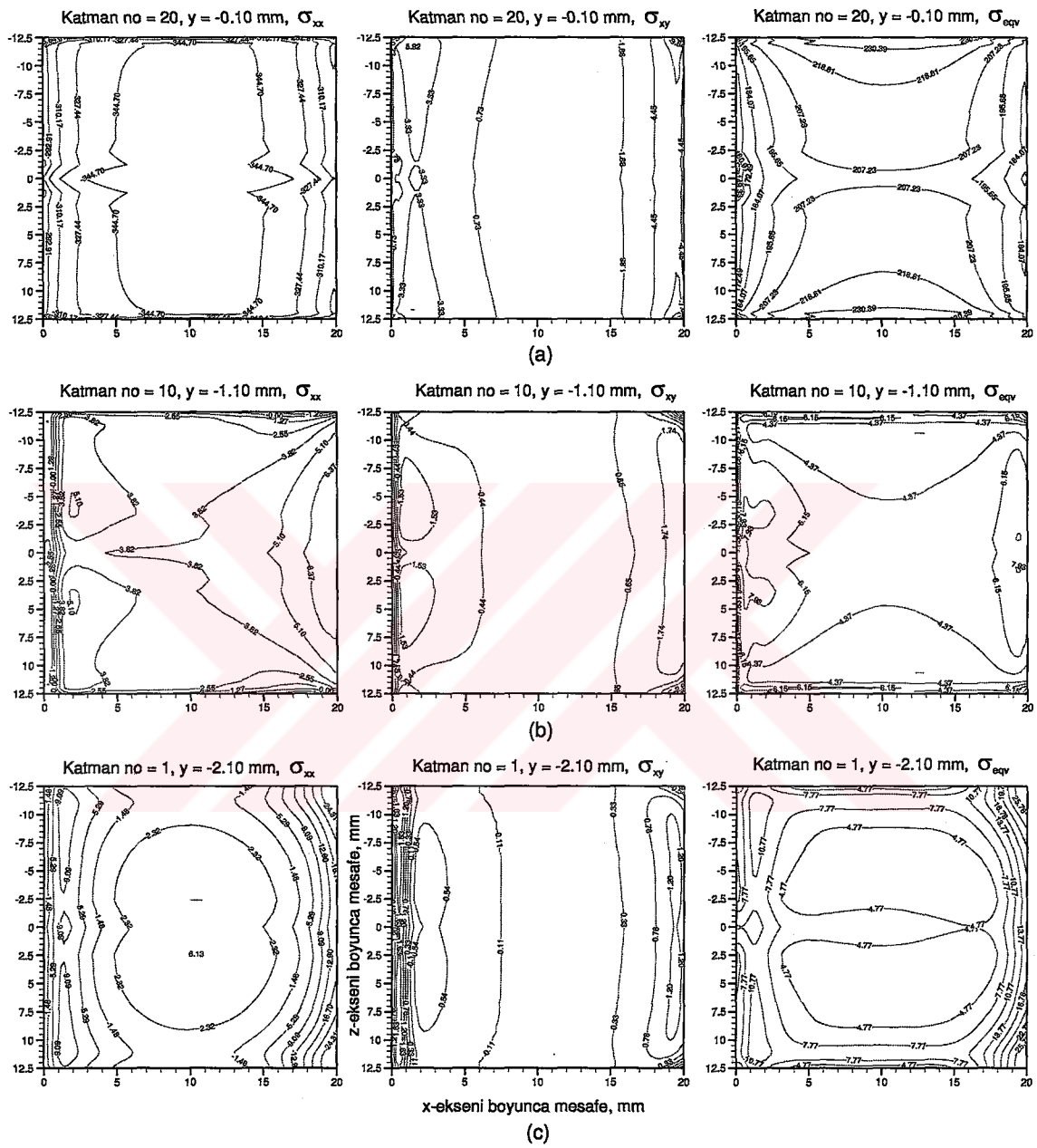
Yapıştırıcı tabakasında, gerilme yığılmalarının yapıştırıcı serbest uçları civarında dar bir bölgede meydana geldiği görülmüştür. Normal gerilme bileşenleri arasında σ_{yy}



Şekil 6.3: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 6.4: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde artık ısıl normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 6.5: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).

normal (soyulma) gerilmesi baskındır ve üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarı boyunca en büyük değerlere ulaşır. Bindirme bölgesinin ortasında geniş bir bölgede gerilme dağılımlarının ihmal edilebilir seviyelerde olduğu Şekil 6.4'den görülmektedir. Buna ilaveten, AHG serbest kenarı boyunca normal gerilmenin değeri yapıştırıcı kalınlığı boyunca alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyine doğru azalırken CDE serbest kenarının alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde normal gerilmenin tekrar en büyük değerlere ulaştığı görülür. Yapıştırıcı tabakası boyunca von Mises gerilmesi de benzer davranışlara sahiptir. Kayma gerilmesi σ_{xy}, kayma gerilmesi bileşenleri arasında en yüksek değerlere sahiptir ve yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest uçları boyunca yığıldığı görülmektedir. Normal gerilme σ_{yy} yapıştırıcı kenarları boyunca soyulmaya neden olurken kayma gerilmesi σ_{xy} yapıştırıcı tabakasının düzlemsel deformasyonlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen von Mises gerilme dağılımı hem soyulma hemde düzlemsel kayma gerilmelerinden etkilenir. Yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarları dikkate değer von Mises gerilme yığılmalarına (Şekil 6.4) maruzdur; bu nedenle, muhtemel bir çatlak oluşumu üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarında ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarında beklenebilir.

Alt plaka bindirme bölgesinin orta kısımları yüksek seviyelerde basma normal σ_{xx} gerilmesine maruzdur. Yani, σ_{xx} normal gerilmesi σ_{yy} normal gerilmesinden 1.6 kat, σ_{zz} normal gerilmesinden ise 2.8 kat daha büyüktür. Bununla beraber, σ_{xy} kayma gerilmesi baskın olan kayma gerilmesi bileşenidir ve normal gerilme σ_{xx}'den 20.7 kat daha küçüktür. Bundan dolayı, Şekil 6.5'da görüldüğü gibi alt plakanın en alt, orta ve en üst katmanlarında normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları değerlendirilmiştir. Alt plakanın bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları üst plakanınkine (Şekil 6.3) benzerdir. En büyük normal gerilme σ_{xx} en üst katmanın bindirme bölgesi orta kısmında basma tarzında oluşmuş ve katmanın sağ (CDE) ve sol (AHG) kenarlarına doğru üniform olarak azalmaktadır. Alt plaka kalınlığı boyunca normal gerilme σ_{xx} üst yüzeyde basmadan alt yüzeyde çekmeye dönüşür; yani, alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyi yüksek mertebede basma tarzında artık normal gerilmelerine maruz iken alt yüzeyi bindirme bölgesi ortalarında düşük çekme gerilmesine, serbest kenarlarında ise düşük basma

gerilmelerine maruzdur. Alt plakanın en üst katmanındaki normal gerilmelerin değeri en alt katmandakinden yaklaşık 12.8 kat daha büyüktür. Kayma gerilmesi σ_{xy} ise en üst katmanın bindirme bölgesinin sağ köşelerine (C ve E) doğru yoğunlaşmış ve alt katmanlara doğru ihmal edilebilir seviyelerdedir. Alt plakanın bindirme bölgesindeki von Mises gerilmesi dağılımı üst plakanınki ile benzerdir. En büyük von Mises gerilmeleri ABC ve EFG kenarları boyunca oluşur ve en üst katmanın orta bölgelerine doğru azalır, ayrıca en alt katmanda yaklaşık olarak 8.4 kat daha küçük değerlerdedir.

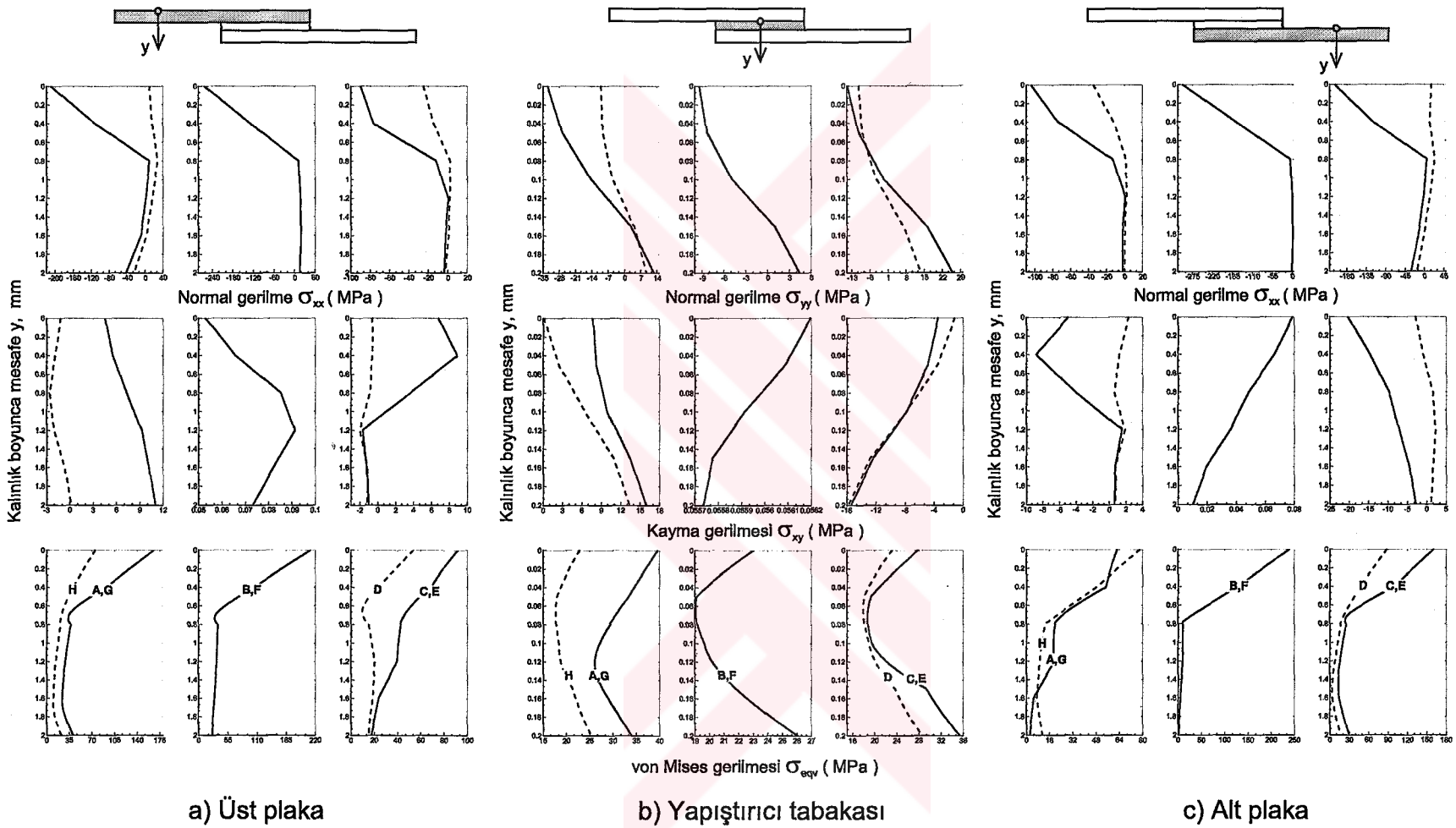
Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için ısıl artık gerilme analizlerinden normal gerilmelerin üst ve alt plakalar kadar yapıştırıcı tabakasının gerilme durumu üzerinde de oldukça etkili olduğu açıktır. Bağlantı bindirme bölgesinde plakaların seramikçe zengin üst yüzeylerinin diğer bölgelere göre daha kritik olduğu ve yapıştırıcı tabakasında ise σ_{yy} normal (soyulma) gerilmesinin üst plaka-yapıştırıcı arayüzünün sol serbest kenarı boyunca ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarı boyunca yoğunlaştığı görülmüştür. Kompozisyonel gradyantlar $n=$ 1.0 ve 10.0 için de plakalar ve yapıştırıcı tabakasında benzer gerilme dağılımları elde edilmiştir. Ancak, gereksiz tekrarlamalardan kaçınmak için gerilme dağılımları gösterilmemiştir. Genel olarak, kompozisyonel gradyant n artırıldıkça alt ve üst plakaların seramikçe zengin üst yüzeylerindeki en büyük artık gerilmeler azalırken plakaların metalce zengin alt yüzeylerindeki en büyük gerilmelerin seviyesinin arttığı görülmüştür. Yapıştırıcı tabakasında ise en yüksek artık gerilmelerin sadece $n=$ 1.0 iken meydana geldiği görülmüştür.

Kritik normal ve kayma gerilmesi bileşenleri ile von Mises gerilmeleri yapıştırıcı tabakası boyunca ve fonksiyonel kademelendirilmiş üst ve alt plakaların farklı katmanları boyunca benzer şekilde fakat farklı seviyelerde dağılımlara sahiptirler (Şekil 6.3-5). Bu sebeple, kritik normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin bağlantı bindirme bölgesinde bulunan kritik noktalarda (Şekil 5.8) plaka ve yapıştırıcı kalınlıkları boyunca değişimleri değerlendirilmiş ve Şekil 6.6-8'de gerilmelerdeki değişimler sırasıyla kompozisyonel gradyantlar $n=$ 0.1, 1.0 ve 10.0 için gösterilmiştir. Katmanlı eleman kalınlığı boyunca tüm gerilmeler integrasyon noktalarında

değerlendirilmiştir. $n=$ 0.1 için üst plakanın bindirme bölgesinde σ_{xx} normal gerilmesi baskındır ve Şekil 6.1a'da gösterildiği gibi üst plakanın seramikçe zengin yüzeyinde yüksek basma gerilmesi değerlerine sahiptir. Normal gerilmenin değeri seramikçe zengin yüzeyde BF hattı boyunca en büyüktür, seramik yüzeyden plaka yarı kalınlığına kadar üniform olarak azalır ve geri kalan kalınlık boyunca düşük çekme değerlerine sahiptir. AHG kenarı boyunca normal gerilmenin değeri CDE kenarı boyunca ortaya çıkan gerilme değerinden daha yüksektir. Kayma gerilmesi üst plaka kalınlığı boyunca ihmal edilebilir değerlerdedir. Bununla beraber, tüm katmanlarda AHG kenarı boyunda en büyük değerlere sahiptir ve burada en üst katmandan en alt katmana doğru kayma gerilmesinin değeri artar. von Mises gerilmesi, normal gerilme σ_{xx}'den etkilenir ve normal ve kayma gerilmeleriyle aynı kritik bölgelerde en büyük olur. Bundan dolayı, von Mises gerilmesi seramik üst yüzeyde BF hattı boyunca en büyük değerlerdedir ve AHG ve CDE kenarlarına doğru azalır. Sonuç olarak, normal gerilme σ_{xx} üst plakanın gerilme durumu üzerinde oldukça etkilidir, özellikle seramikçe zengin üst katmanın bindirme bölgesinin ortası en kritik yerdir.

Yapıştırıcı tabakasının serbest ucları dikkate değer σ_{yy} normal gerilmesine maruzdur (Şekil 6.6b). Yapıştırıcı tabakasının sol serbest kenarı AHG'de normal gerilme σ_{yy} üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyi boyunca basma tarzındadır ve yapıştırıcı kalınlığı boyunca üniform olarak artarak alt plaka-yapıştırıcı arayüzü boyunca çekme gerilmesine dönüşür. Yapıştırıcı tabakasının sağ serbest kenarı CDE boyunca da benzer tarzda bir değişim gözlenmiştir. Kayma gerilmesi σ_{xy} yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarları boyunca yüksek değerlere sahiptir ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzünün sağ ve sol serbest uclarında en büyük değerlere ulaşır. von Mises gerilmesi AHG kenarı boyunca üst plaka-yapıştırıcı arayüzünde ve CDE kenarı boyunca da alt plaka-yapıştırıcı arayüzünde en büyük seviyelere ulaşır. Sonuç olarak, yapıştırıcı tabakasında ilk çatlak başlangıcı üst plaka-yapıştırıcı arayüzünün sol kenarında ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzünün sağ kenarında beklenebilir.

Alt plakanın kalınlığı boyunca artık gerilmelerdeki değişimler üst plakadakiler ile benzerdir (Şekil 6.6c). Ancak, alt plaka bindirme bölgesinde BF ve CDE kenarları boyunca normal artık gerilme σ_{xx}'in değeri üst plakaya oranla daha yüksektir. Alt

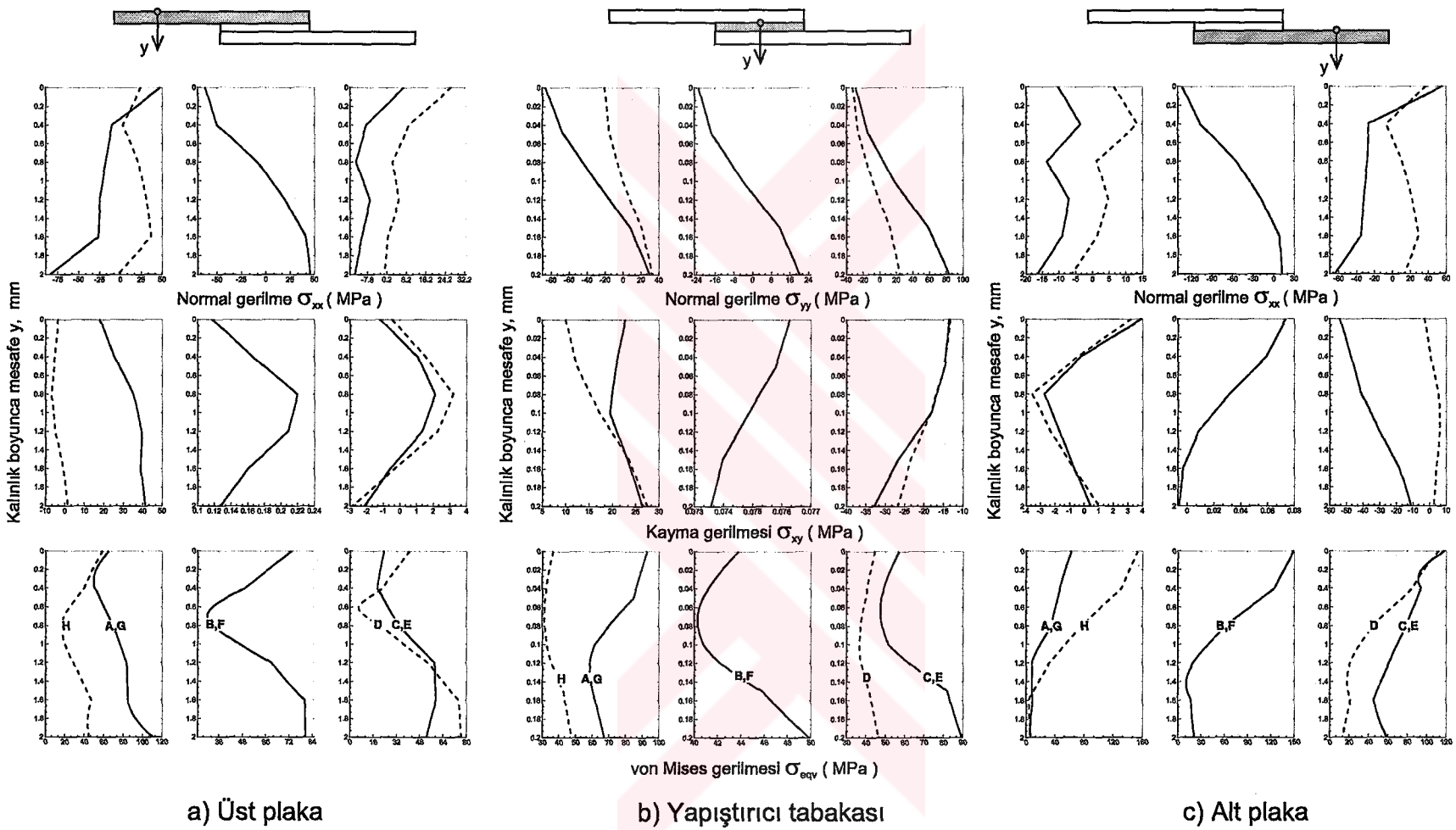


Şekil 6.6: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak).

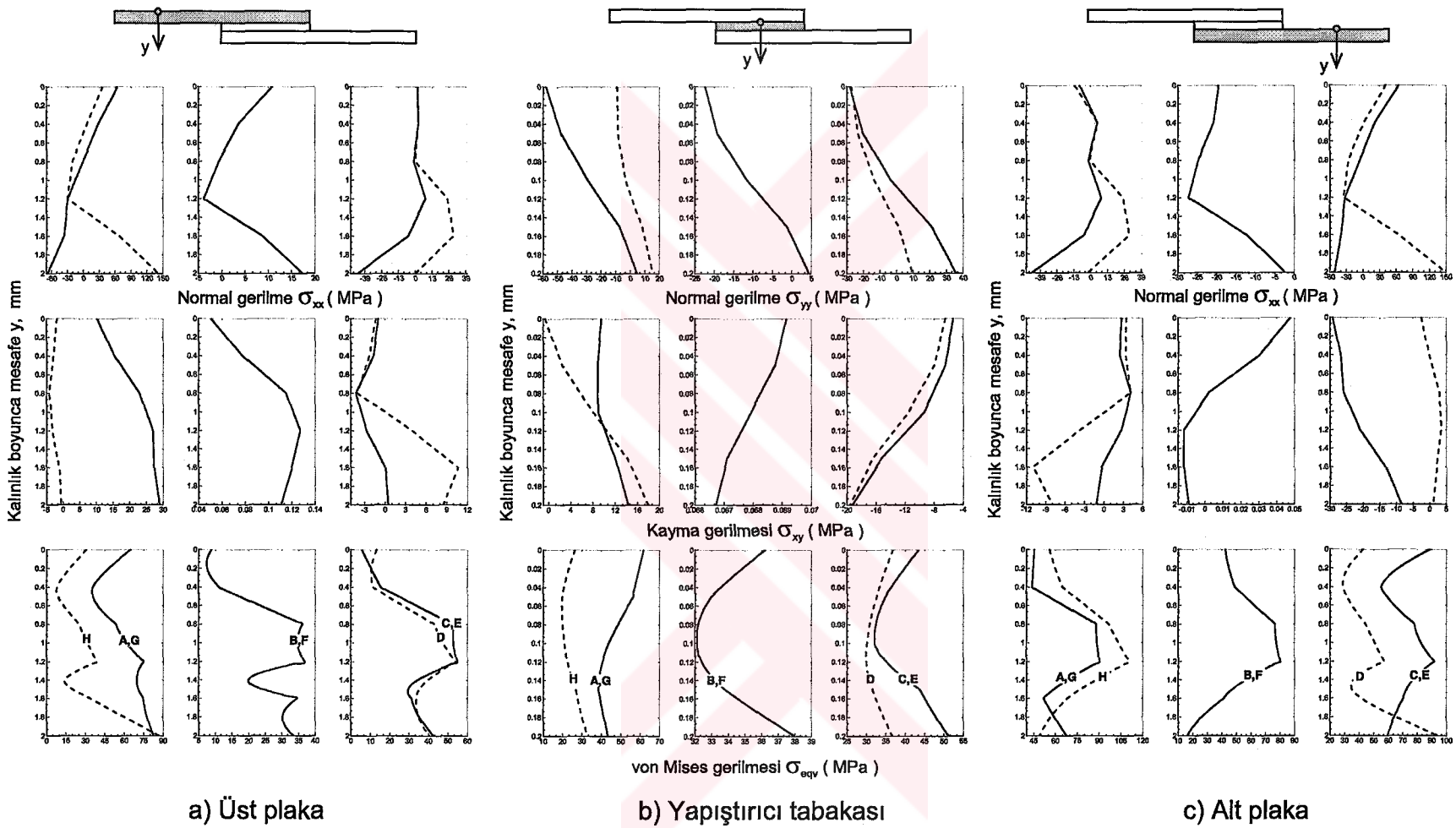
plakada σ_{xx} normal gerilmesi seramikçe zengin üst yüzeyin BF kenarı boyunca en büyük değerlere ulaşır ve daha sonra seramik yüzey yakınlarında hızla azalarak metalce zengin katmanlarda ihmal edilebilir bir seviyeye ulaşır (Şekil 6.6c). Kayma gerilmesi σ_{xy} alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde CDE kenarı boyunca en büyüktür. von Mises gerilmesinin kalınlık boyunca değişimi üst plakanınkiyle benzer olmasına rağmen nispeten daha yüksek değerlere sahiptir. Sonuç olarak, alt plakanın en kritik bölgesi bindirme bölgesine tekabül eden seramikçe zengin en üst katmandır. Kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 iken, ısıl artık gerilmeler üst ve alt plakaların seramikçe zengin üst yüzeylerinde yoğunlaşırken, yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarları boyunca yoğunlaştığı görülmüştür. En büyük normal ve kayma gerilmelerinin fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar boyunca benzer yerlerde oluştuğu gözlenmiştir. En zayıf bağlantı bölgesinin yapıştırıcı tabakası olması nedeniyle ilk bölgesel hasarın plaka-yapıştırıcı arayüzeylerinden başlaması beklenebilir.

Metal-seramik sistemin lineer kompozisyonel ($n=$ 1.0) değişiminde normal gerilme σ_{xx} ve kayma gerilmesi σ_{xy} üst plakanın bindirme bölgesinde baskın gerilme bileşenleridir. Normal, kayma ve von Mises gerilmeleri üst plakanın metalce zengin yüzeyinin bindirme bölgesi sol serbest AHG kenarı boyunca en büyüktür (Şekil 6.7a). Normal gerilme σ_{xx} üst plaka kalınlığı boyunca iki bölgeli gerilme durumuna sahiptir. Üst plakanın metalce zengin alt yüzeyindeki en büyük normal gerilmenin değeri seramikçe zengin üst yüzeydeki gerilme değerinden 1.75 kat daha büyüktür ve BF kenarı boyunca etkili olurken CDE kenarı boyunca ihmal edilebilir seviyelerdedir. Kayma gerilmesi σ_{xy} plakanın alt katmanında AHG kenarı boyunca yoğunlaşır ve seramikçe zengin üst yüzeye doğru üniform olarak azalır. von Mises gerilmesi de normal gerilme gibi plaka alt katmanının AHG kenarı boyunca yığılır ve CDE kenarına doğru hafifce azalır. Üst plakanın alt yüzeyindeki en büyük von Mises gerilmeleri üst yüzeydeki gerilmelerden 1.7 kat daha büyüktür.

Yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarları (AHG, CDE) boyunca gerilme yığılmalarının oluştuğu görülmüştür. Yapıştırıcı kalınlığı boyunca oluşan gerilme profilleri $n=$ 0.1 iken oluşan gerilme profillerinin benzeridir. En büyük normal σ_{yy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest AHG



Şekil 6.7: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e).



Şekil 6.8: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak).

kenarı boyunca, alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest CDE kenarı boyunca oluşmaktadır (Şekil 6.7b). Halbuki, en büyük kayma gerilmesi alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ ve sol kenarları boyunca oluştuğu görülmüştür. Bununla beraber, en büyük normal gerilme σ_{yy} %163, masimum kayma gerilmesi σ_{xy} %112 ve en büyük von Mises gerilmesi σ_{eqv} %135 oranlarında artmıştır.

Alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakada, normal gerilme σ_{xx} plaka bindirme bölgesinin ortasında BF hattı boyunca baskındır ve seramikçe zengin plaka üst yüzeyinde yüksek basma gerilmesinden metalce zengin alt yüzeyinde düşük çekme gerilmesine üniform olarak azalır. Ayrıca, normal gerilme σ_{xx} alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin CDE kenarı boyunca da kritik değerlerdedir (Şekil 6.7c). Kayma gerilmesi σ_{xy} CDE kenarı boyunca yığılır ve alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde en büyük değerlere sahip olur. Alt plakanın gerilme durumu üzerinde kayma gerilmesi σ_{xy}'de normal gerilme σ_{xx} kadar etkilidir. von Mises gerilmesi alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde BF hattı boyunca en büyük seviyelere ulaşır ve alt yüzeydeki gerilme değerinden 7.5 kat daha büyüktür. von Mises gerilmesinin plaka bindirme bölgesinin sağ CDE ve sol AHG serbest kenarlar boyunca da yüksek değerlere sahip olduğu gözlenmiştir. Lineer kompozisyonal gradyant $n=$ 0.1 için, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların kalınlıkları boyunca oluşan gerilme profillerinin $n=$ 0.1 (Şekil 6.6) de oluşan gerilme profillerinden daha üniform oldukları, buna karşın yapıştırıcı kalınlığı boyunca oluşan gerilme profillerinin aynı kaldığı görülmüştür. Ancak en büyük gerilme seviyelerinde dikkate değer artışların olduğu gözlenmiştir.

Son olarak, seramikçe zengin malzeme kompozisyonunun ($n=$ 10.0) plakalar ve yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca gerilme değişimleri üzerine etkisi araştırıldı. Benzer şekilde, plakalardaki kritik gerilmeler normal gerilme σ_{xx} ve kayma gerilmesi σ_{xy} iken (Şekil 6.8a,c) yapıştırıcı tabakasında ise normal gerilme σ_{yy} kritiktir (Şekil 6.8b). Üst plakada, en büyük normal gerilme σ_{xx} metalce zengin alt yüzeyin AHG kenarı boyunca çekme tarzında yığılırken üst plaka kalınlığının orta bölgelerinde basma gerilmesi tarzındadır. Kayma gerilmesi σ_{xy} üst plaka kalınlığı boyunca etkilidir; yani, AHG kenarının en alt katmanında en büyüktür ve üst katmanlara doğru azalır. En büyük von Mises gerilmesi üst plakanın metalce zengin alt

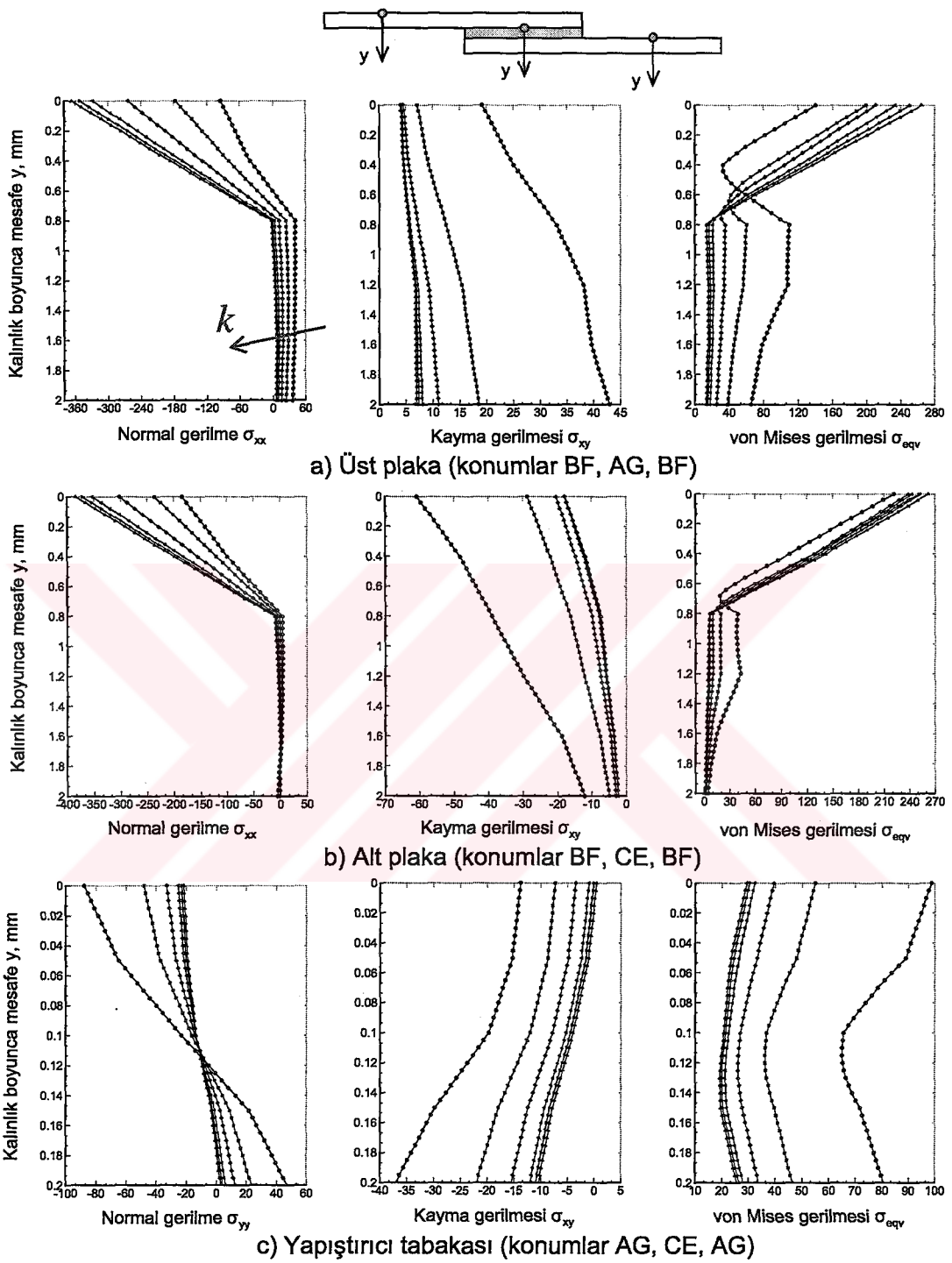
katmanının AHG kenarı boyunca ortaya çıkar ve üst plaka bindirme bölgesi üzerinde dikkate değer seviyelere ulaşır (Şekil 6.8a). Yapıştırıcı tabakası sağ ve sol serbest kenarları boyunca yüksek σ_{yy} normal (soyulma) ve σ_{eqv} von Mises gerilmelerine maruzdur. Her iki gerilme bileşeni de AHG serbest kenarı boyunca alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyine ve CDE serbest kenarı boyunca üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyine üniform olarak artar (Şekil 6.8b). Yapıştırıcı tabakasının $n=10.0$ için olan bu gerilme durumu $n=0.1$ ve 1.0 için olan gerilme durumlarıyla benzerdir. Yani, kompozisyonel gradyantın yapıştırıcı tabakası boyunca oluşan gerilme profilleri üzerindeki oldukça azdır. Buna rağmen, en büyük normal, kayma ve von Mises gerilme değerleri metalce zengin kompozisyon $n=0.1$ için oluşan gerilmeler ile karşılaştırıldığında sırasıyla %75, %24 ve %56 oranlarında artış gözlenirken, lineer malzeme kompozisyonu $n=1.0$ için oluşan gerilmeler ile karşılaştırıldığında sırasıyla %33, %41 ve %33 oranlarında azaldıkları gözlenmiştir. Alt plakada oluşan gerilme durumu üst plakanınki ile benzerdir. En büyük normal gerilme σ_{xx} bindirme bölgesinin CDE serbest kenarı boyunca hem üst seramik hem de alt metal katmanlarda yoğunlaşır. Özellikle, metal katman yüksek çekme gerilmelerine maruzken alt plaka kalınlığının orta bölgeleri düşük basma gerilmelerine maruzdur (Şekil 6.8c). Kayma gerilmesi σ_{xy} alt plaka üst katmanını CDE serbest kenarı boyunca yığılır ve plaka kalınlığı boyunca üniform olarak azalır. von Mises gerilmesi alt plaka bindirme bölgesinde metalce zengin alt katmanın CDE kenarı boyunca yığılır. Bu nedenle, yapıştırıcı yada plakalardaki hasar başlangıcı bindirme bölgesinin CDE ve AHG serbest kenarlarında yapıştırıcı-plaka arayüzeyleri boyunca beklenebilir.

Metalce zengin, lineer ve seramikçe zengin malzeme kompozisyonlarından oluşan plakalar ile tek bindirme bağlantısının ısıl gerilme analizlerinden kritik gerilmelerin kalınlıkları boyunca değişimi üzerinde kompozisyonel gradyantın "n" etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Yani, kompozisyonel gradyantın değeri arttıkça üst ve alt plakaların seramikçe zengin üst yüzeyindeki en büyük normal gerilme değerleri basmadan çekmeye dönüşürken, metalce zengin alt yüzeydeki basma normal gerilmeleri yüksek çekme gerilmelerine dönüşür. Yapıştırıcı tabakasındaki en yüksek gerilme değerlerinin kompozisyonel gradyantın lineer değerinde ($n=1.0$) oluştuğu

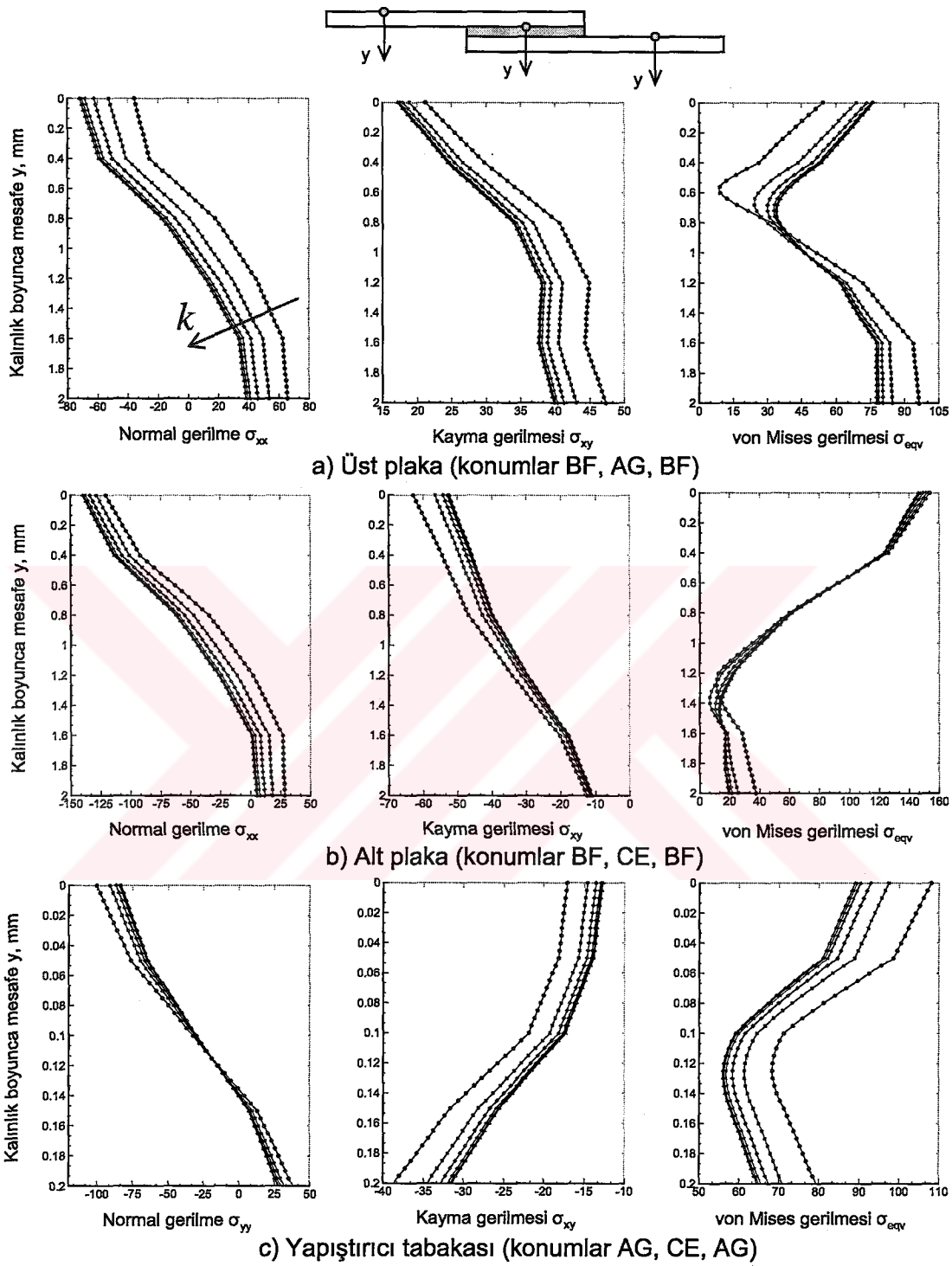
görülmüştür. Mevcut çalışmalardan fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların lineer kompozisyonel gradyantta (n= 1.0) en büyük eğriliğe sahip olduğu ve bu eğriliğin kompozisyonel gradyantın 1.0'den büyük yada küçük değerlerinde azaldığı bilinmektedir [4]. Bundan dolayı, n= 1.0 iken bağlantı sisteminde oluşan bu en büyük eğrilik yapıştırıcı tabakasında da en yüksek gerilmelerin oluşmasına neden olur.

6.3.1 Katman Sayısının Etkisi

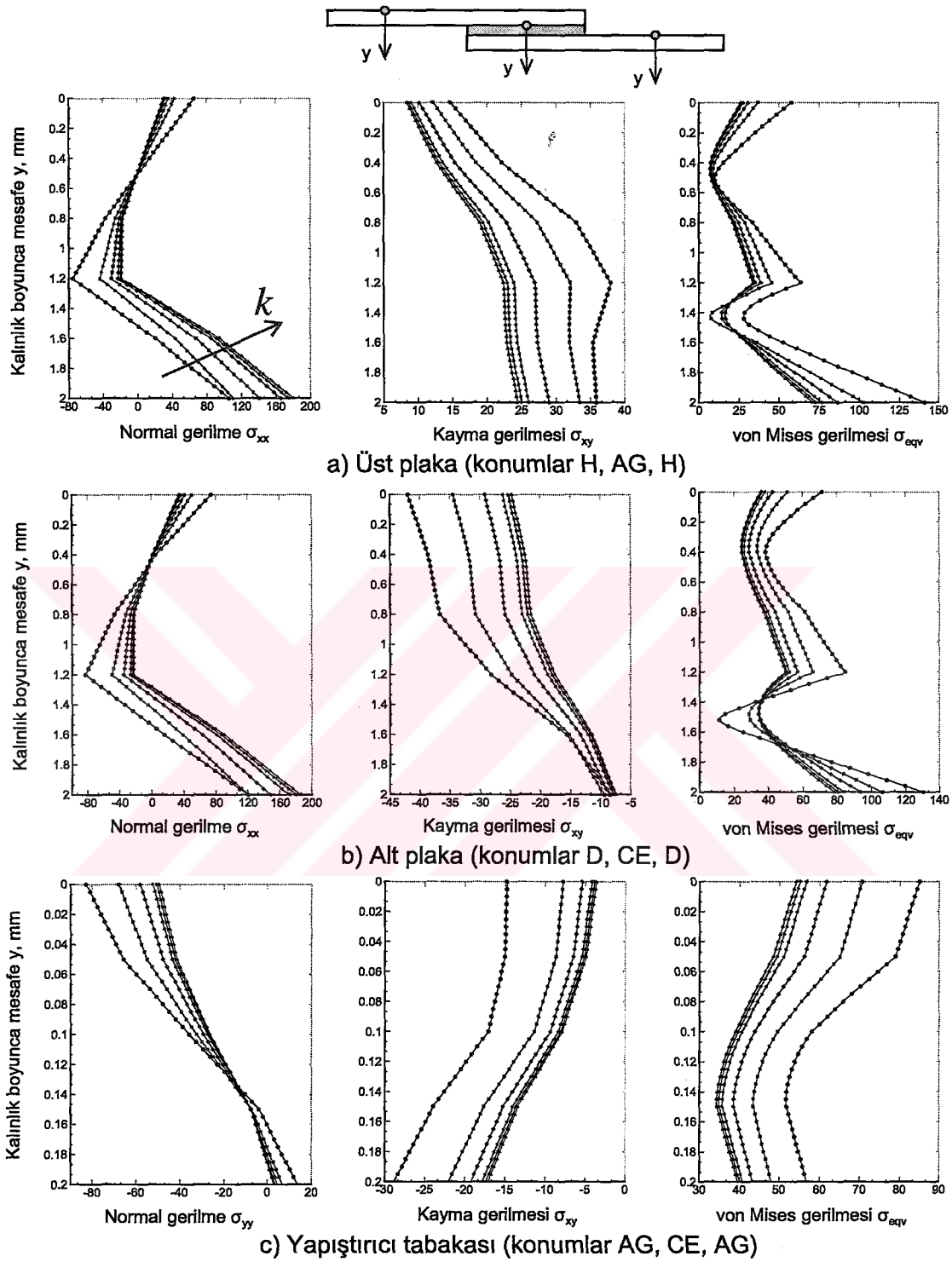
Önceki bölümde yapıştırıcı bağlantısının kompozisyonel gradyantlar n= 0.1, 1.0 ve 10.0'da imal edilmiş plakaları ve yapıştırıcı tabakası için gerilme durumu incelenmişti. Üst ve alt plakalar kalınlıkları boyunca 20 katman (her bir elemanda 4 katman) kullanılarak modellenmişti. Malzeme kompozisyonunun elastiklik modülü, Poisson oranı ve ısıl genleşme katsayısı gibi ısıl ve mekanik özellikleri her bir katmanın merkezine göre hesaplanmış ve katmanlar boyunca üniform oldukları kabul edilmiştir. Bu bölümde, üniform sıcaklık yükü için üst ve alt plakalardaki katman sayılarının kalınlıklar boyunca oluşan artık gerilme profilleri ve değerleri üzerine etkileri analiz edildi. Bu amaçla, analizlerde plaka kalınlığı boyunca katman sayısı olarak sırasıyla k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250 ve bunlara karşılık katman kalınlığı 0.4, 0.2, 0.1, 0.04, 0.02 ve 0.008 mm dikkate alınmıştır. Ancak, artan katman sayısıyla her bir katmanın kalınlığı boyunca nümerik integrasyon daha fazla hesaplama kaynağı ve zamanı gerektirmektedir. Bu nedenle, 250 katmandan fazlası için yapıştırıcı bağlantısı çözümleri yapılamamıştır. Kompozisyonel gradyant n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için yapılan ısıl artık gerilme analizlerinden plaka kalınlığı boyunca artan katman sayısının kalınlıklar boyunca oluşan kritik gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkili olmadığı, fakat gerilme seviyelerinde büyük değişikliklere neden olduğu görülmüştür. Şekil 6.9-11'de sırasıyla kompozisyonel gradyant n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için plakalardaki katman sayılarının bağlantı bindirme bölgesindeki kritik noktalarda (Şekil 5.8) normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin kalınlıklar boyunca değişimleri üzerine etkisi görülmektedir. n= 0.1 iken, normal ve von Mises gerilmeleri alt ve üst plakaların seramikçe zengin üst yüzeylerinde (BF) boyunca en büyük değerlere ulaşırken burada gerilme seviyeleri arasında büyük ayrılıklar görülmüştür (Şekil 6.9a,b). Bu gerilmeler plaka yarı kalınlıklarına kadar



Şekil 6.9: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 0.1) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 6.10: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 1.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 6.11: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde katman sayısının (k= 5, 10, 20, 50, 100 ve 250) tesiri (n= 10.0) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

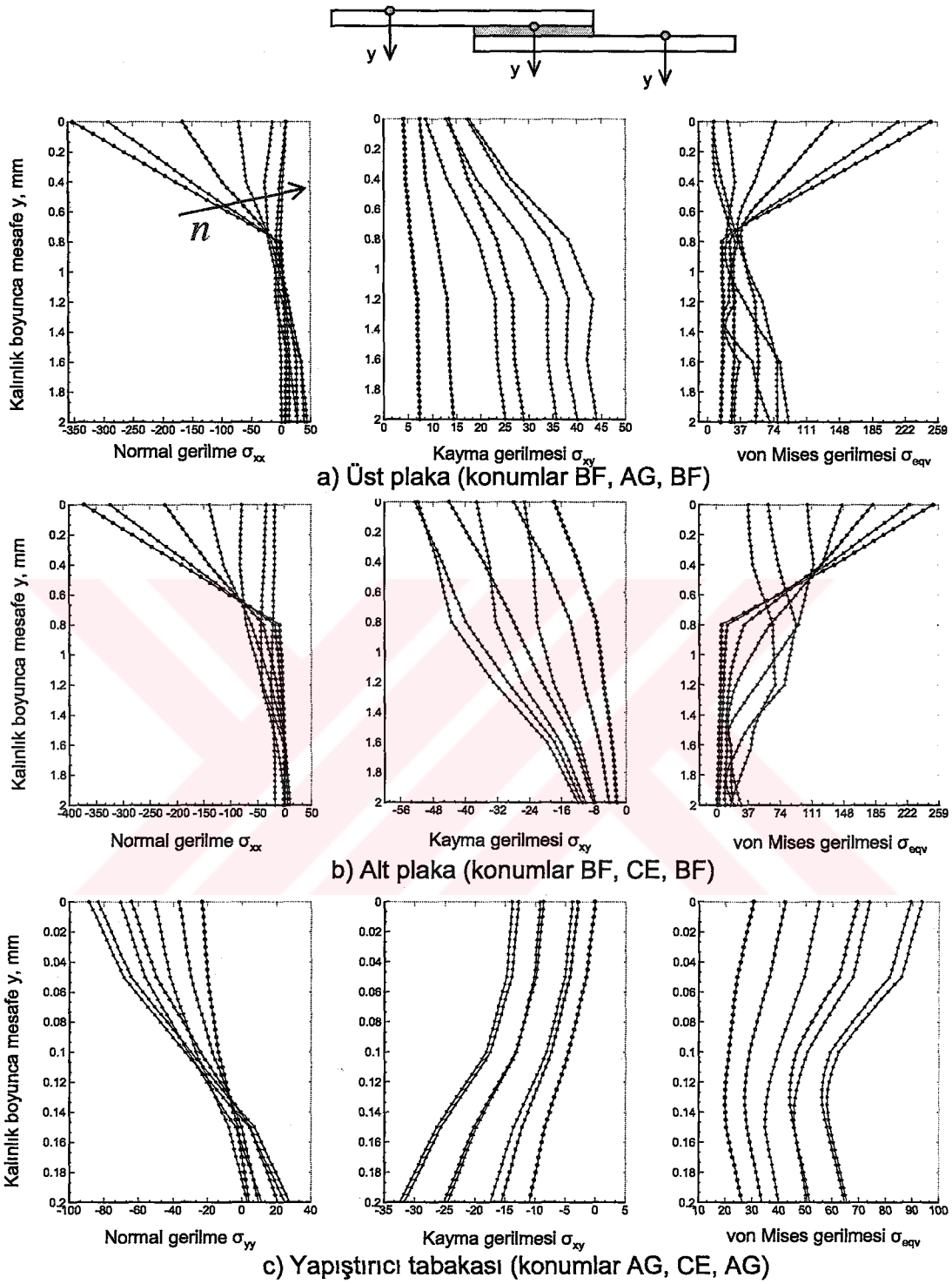
dikkate değer oranlarda azalır ve geriye kalan bölgelerde hemen hemen sabit kalırlar. Kayma gerilmesi σ_{xy} plaka bindirme bölgesini köşelerinde (AG, CE) kalınlıkları boyunca küçük artışlar gösterir, ve üst plakanın alt yüzeyinde ve alt plakanın üst yüzeyinde en büyük değerlere ulaşır. Katman sayısı k arttıkça kalınlık boyunca gerilme profillerinin $k=$ 50'den sonra değişmediği görülmüştür. Fakat, katman sayısı $k=$ 50'ye kadar üst ve alt plakaların seramik yüzeylerindeki en büyük normal ve von Mises gerilmelerinin dikkate değer oranlarda arttığı ve plakaların kritik köşelerindeki (AG, CE) kayma gerilmesi değerlerinin ise büyük oranlarda azaldığı görülmüştür. Yapıştırıcı tabakasında, normal gerilme σ_{yy} üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde (AG) basma gerilmesi tarzındadır ve yapıştırıcı kalınlığı boyunca üniform olarak azalarak alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde çekme gerilmesine dönüşür (Şekil 6.9c). Benzer şekilde, kayma gerilmesi σ_{xy} alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin CE köşesinde en büyük değerlere ulaşır. En büyük von Mises gerilmesi ise üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde oluşur. Artan katman sayısının gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı aşikardır. Fakat, seramik taraftaki en büyük gerilme değerleri katman sayısından etkilenmiştir. Lineer malzeme kompozisyonu $n=$ 1.0'da katman sayısındaki değişim üst ve alt plakalar ile yapıştırıcı tabakasındaki gerilme profillerini pek fazla etkilemediği görülmüştür. Fakat, plaka kalınlığı boyunca oluşan en büyük gerilme profilleri $n=$ 0.1'de oluşan gerilme profillerinden farklı iken en büyük yapıştırıcı gerilmeleri benzer değişimlere sahiptir (Şekil 6.10). Bununla beraber, $n=$ 1.0 iken artan katman sayısı ile kalınlıklar boyunca oluşan en büyük gerilme profillerinin daha üniform oldukları görülmüştür. Plakalar ve yapıştırıcı kalınlıkları boyunca en büyük gerilmelerdeki ayrılıkların üniform olduğu ve 50 katman sayısından sonra ise bu ayrılıkların belirsiz hale geldiği görülmektedir. Seramikçe zengin malzeme kompozisyonu ($n=$ 10.0) alt ve üst plakaların bindirme bölgelerinde $n=$ 0.1 ve 1.0'den farklı gerilme durumlarına neden olurken yapıştırıcı tabasındaki gerilme profillerinin aynı kaldığı görülmüştür (Şekil 6.11). En büyük normal ve von Mises gerilmeleri plakaların metalce zengin alt yüzeyinde yoğunlaşırken seramikçe zengin üst yüzeyleri nispeten daha düşük gerilmelere maruzdur. Plakalar ve yapıştırıcı tabakasındaki en büyük kayma gerilmeleri $n=$ 0.1 ve 1.0 iken oluşan kayma gerilmeleri ile benzerdir. Ayrıca, $n=$ 10.0 için plaka kalınlıkları boyunca artan katman sayısı yapıştırıcı ve plakaların gerilme durumları üzerinde benzer etkiye

sahiptir.

Fonksiyonel kademelendirilmiş plakalardan oluşan tek bindirme bağlantısının ısıl artık gerilme analizlerinden üst ve alt plakaların artan katman sayılarının kalınlıklar boyunca oluşan gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkilerinin olmadığı görülmüştür. Plakalarda 50 katman sayısına kadar her iki plakanın ve yapıştırıcı tabakasının en büyük gerilme seviyeleri arasında büyük farklılıklar vardır. Bununla beraber, en büyük gerilmeler arasındaki ayrılıklar artan kompozisyonel gradyant ile azalmaktadır. Ayrıca, katman sayısındaki artış ile metalce zengin ($n=$ 0.1) ve seramikçe zengin ($n=$ 10.0) malzeme kompozisyonlarında en büyük gerilmelere doğru gerilmeler arasındaki ayrılıkların arttığı, lineer kompozisyonel gradyantta ($n=$ 1.0) ise plakalar ve yapıştırıcı kalınlıkları boyunca gerilmeler arasındaki ayrılıkların üniform olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, ısıl yükler altında fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların gerilme durumlarının katman sayısından dikkate değer bir şekilde etkilendikleri görülmüştür. Şöyle ki, artan katman sayısı ile herhangi bir kompozisyonel gradyant değerinde yapıştırıcı ve plakaların kalınlık boyunca oluşan gerilme profilleri değişmezken en büyük gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür.

6.3.2 Kompozisyonel Gradyantın Etkisi

Tek bindirme bağlantısının metalce zengin, seramikçe zengin ve lineer malzeme kompozisyonları için yapılan analizlerde plaka kalınlıkları boyunca katman sayısındaki artışın belli bir katman sayısından sonra kalınlıklar boyunca gerilme seviyeleri üzerinde pek fazla etkiye sahip olmadığı fakat mevcut kompozisyonel gradyantların gerilme profilleri ve büyüklükleri üzerinde oldukça etkili oldukları görülmüştür. Üst ve alt plakalar ile yapıştırıcı tabakasının kalınlıkları boyunca gerilme değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisini belirlemek amacıyla üniform sıcaklık yüküne maruz yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının plaka katman sayıları ($k=$ 20) sabit tutularak kompozisyonel gradyantlar $n=$ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için ısıl gerilme analizleri yapılmıştır. Bu kompozisyonel gradyantlar için plakaları oluşturan malzemelerin (Ni–Al_2O_3) ısıl ve mekanik özelliklerinin kalınlıklar boyunca değişimleri Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 6.12: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

Şekil 6.12'de bağlantı bindirme bölgesinde seçilen kritik noktalarda (Şekil 5.8) kalınlıklar boyunca normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisi görülmektedir. Kompozisyonel gradyant $n = 0.1$'den 10.0'a artırıldığında üst plaka kalınlığı boyunca normal gerilme profili dikkate değer biçimde değişir. Yani, en büyük normal gerilme σ_{xx} seramikçe zengin üst yüzeyde yüksek basma gerilmesinden metalce zengin alt yüzeyde düşük çekme gerilmesine dönüşür ve metalce zengin yüzeyde gerilme değerleri birbirlerine yakındır. Kompozisyonel gradyant arttıkça seramikçe zengin yüzeydeki büyük basma gerilmeleri küçük çekme gerilmelerine dönüşür (Şekil 6.12a). Kayma gerilmesi σ_{xy} seramik üst yüzeyden metal alt yüzeye kalınlık boyunca artan bir profile sahiptir ve metal alt yüzeyde en büyük olur. Seramik üst yüzeyde gerilme seviyeleri arasındaki fark metal alt yüzeydekinden daha azdır. Bununla beraber, artan kompozisyonel gradyant ile en büyük kayma gerilmesi seviyeleri üniform artış gösterirler. von Mises gerilmeleri plaka kalınlığı boyunca farklı profillere sahiptir. Yani, en büyük von Mises gerilmeleri artan kompozisyonel gradyant ile önemli oranlarda azalır. Görüldüğü gibi metalce zengin malzeme kompozisyonundan seramikçe zengin malzeme kompozisyonuna geçiş kritik gerilmelerin hem profillerinde hem de değerlerinde önemli değişimlere sebep olmaktadır.

Alt plakanın kritik gerilme bileşenleri üst plakanınkiler ile benzer değişimlere sahiptirler. Yani, kompozisyonel gradyant artırıldığında normal gerilmelerin hem profilleri hem de en büyük değerleri değişir (Şekil 6.12b). Benzer şekilde, normal gerilmelerdeki ayrılıklar seramikçe zengin yüzeye doğru artar. Kayma gerilmeleri alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde en büyük değerlere ulaşır ve gerilme seviyeleri kompozisyonel gradyant $n = 0.1$'den 1.0'e artırıldığında artar ve daha sonra azalır. Benzer şekilde, kayma gerilmelerindeki sapmalar seramikçe zengin yüzeyde daha büyük iken metalce zengin yüzeyde gerilme değerleri oldukça yakındır. von Mises gerilmeleri alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde en büyük değerlere ulaşır ve burada gerilme seviyeleri arasında büyük sapmalar olduğu görülür. En büyük von Mises gerilmeleri artan kompozisyonel gradyant ile önemli oranda azalır. Sonuç olarak, malzeme kompozisyonundaki seramik fazın miktarı alt plakanın gerilme karakteristiklerini büyük oranda etkiler ve en büyük gerilmelerde önemli

değişikliklere neden olur.

Yapıştırıcı tabakasında, normal (soyulma) σ_{yy} gerilmeleri üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde en büyük basma gerilmesi tarzındadır ve yapıştırıcı tabakası kalınlığı boyunca üniform olarak değişerek alt yüzeyde çekme gerilmesine dönüşür (Şekil 6.12c). Kayma gerilmesi σ_{xy} alt plaka yapıştırıcı arayüzeyinde en büyük değere ulaşır ve tüm kompozisyonel gradyantlarda kayma gerilmesi profilleri benzerdir. En büyük von Mises gerilme değerleri üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde oluşur. Yapıştırıcı kalınlığı boyunca kritik gerilme bileşenlerinin profillerindeki değişimler kompozisyonel gradyanttan etkilenmezken gerilme büyüklüklerinin önemli oranlarda değiştiği görülmüştür. Bunun sebebi kademelendirilmiş malzeme özelliklerinin fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl yüklere olan tepkilerini önemli ölçüde etkilemesidir.

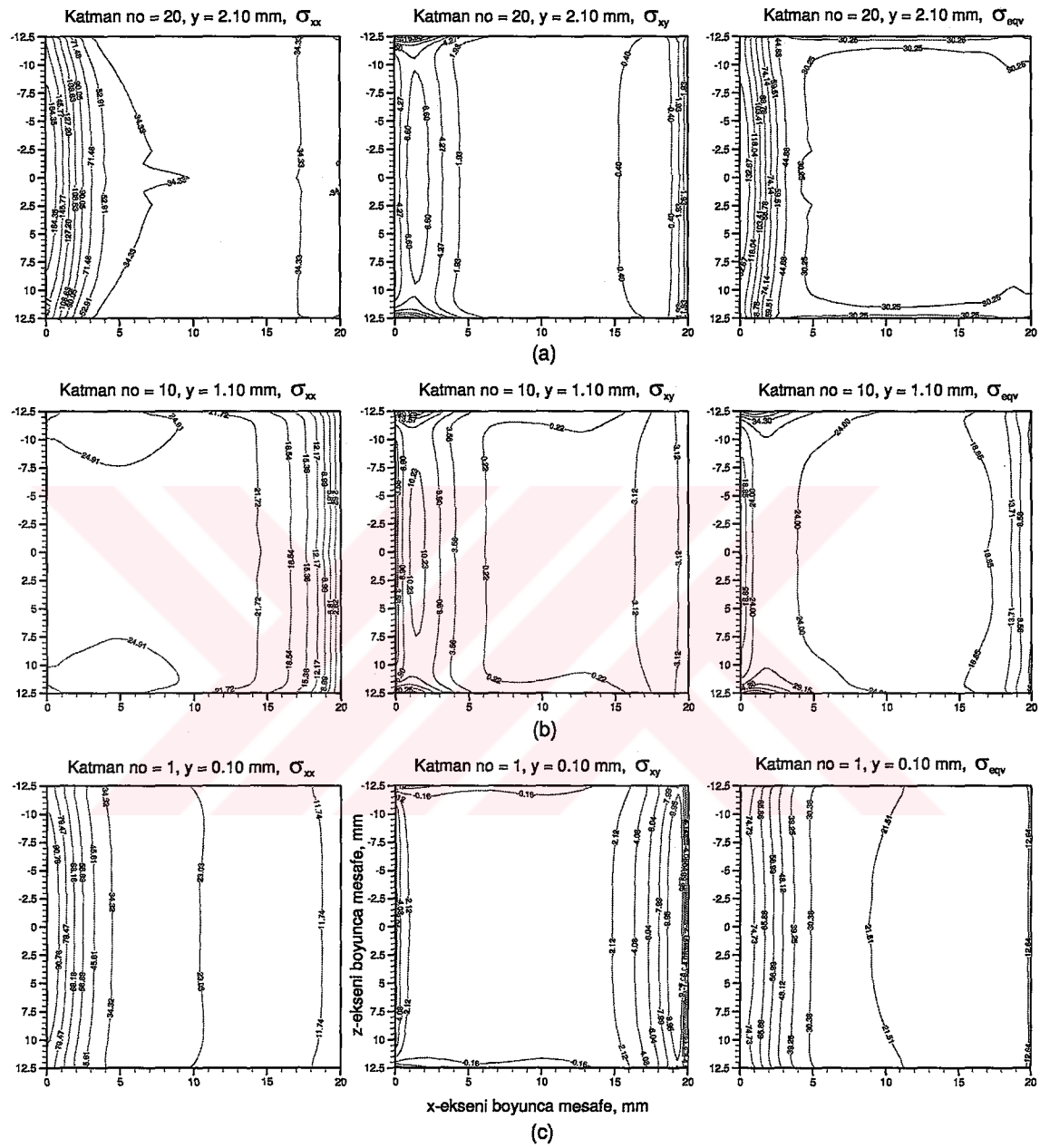
6.4 Sabitlenmiş Model (SŞ-II)

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının serbest uçlarının her yönde sabitlendiği ve tek bindirme bağlantısının 40°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu ikinci sınır şartı (SŞ-II) için gerilme durumu incelendi (Şekil 6.2b). Bu sınır şartında, bağlantı bindirme bölgesinde büyük dönmelerin olduğu gözlenmiş ve bunun neticesinde yapıştırıcı serbest uçlarında yüksek eğilme momentleri ve yüksek soyulma gerilmeleri oluşmuştur. Bundan dolayı, yapıştırıcı serbest uçlarında gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarının oluşacağı aşikardır. Bununla beraber, üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların yapıştırıcı serbest uçlarına tekabül eden bölgeleri de ciddi gerilme yığılmalarına maruzdur. Böylece, üst ve alt fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların bindirme bölgesi ile yapıştırıcı tabakasının yukarıda bahsedilen bölgeleri en kritik bölgelerdir. İlk olarak, n= 0.1, 1.0 ve 10.0 malzeme kompozisyonları için yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının ısıl gerilme analizleri yapıldı. Bu esnada üst ve alt plakalar kalınlıkları boyunca 20 katman (her bir elemanda 4 katman) kullanılarak modellendiler. Analizlerden görülmüştür ki alt ve üst plakalarda gerilme bileşenleri arasında normal gerilme σ_{xx} ve kayma gerilmesi σ_{xy} baskın iken yapıştırıcı tabakasında normal gerilme σ_{yy} ve kayma gerilmesi σ_{xy}

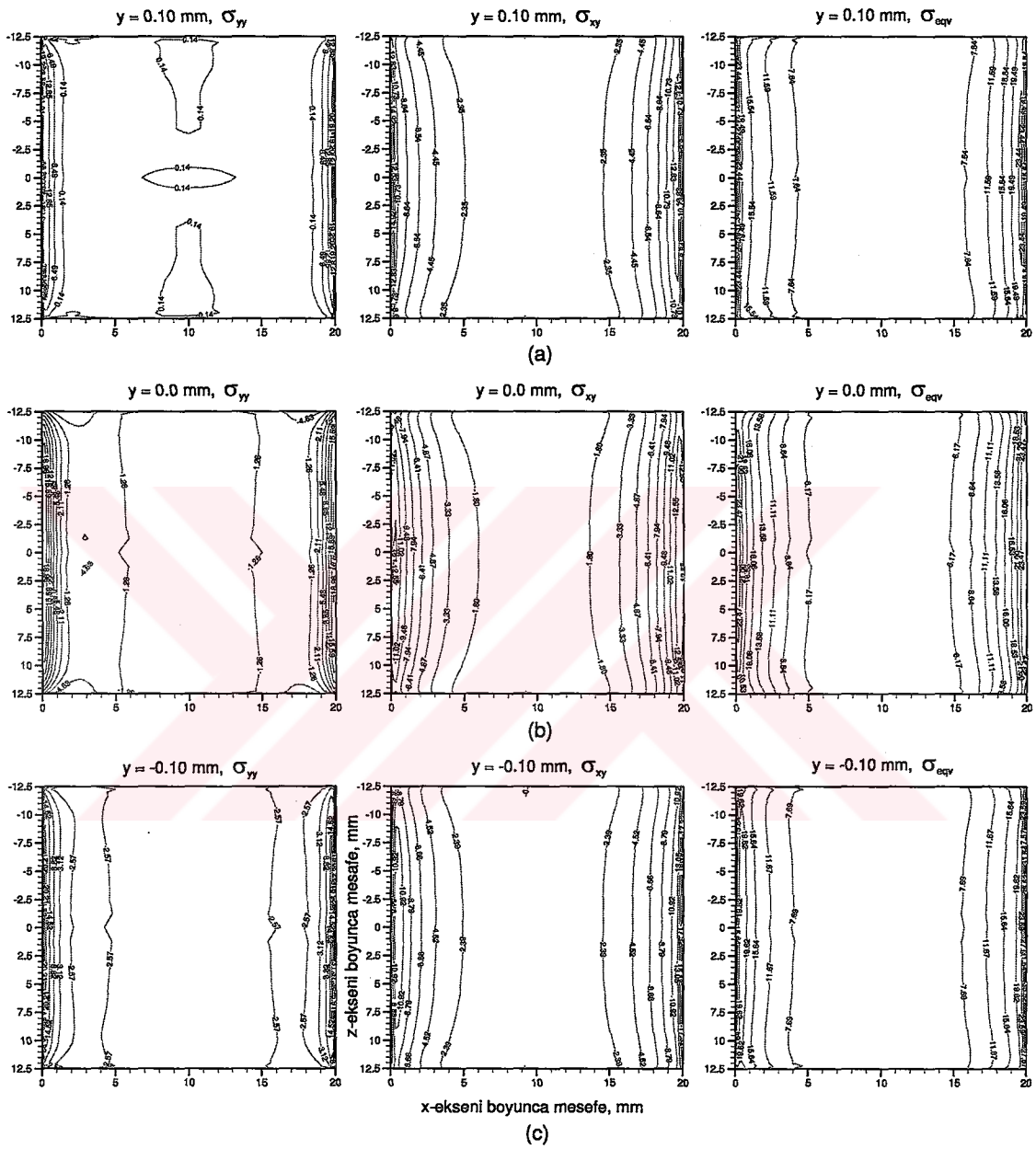
baskındır.

Şekil 6.13'de kompozisyonel gradyant $n = 0.1$ için üst plaka bindirme bölgesinin en üst, orta ve en alt katmanlarında normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları görülmektedir. Normal gerilme σ_{xx} basma gerilmesi tarzında üst plaka bindirme bölgesinin en üst katmanının sol AHG kenarı (Şekil 5.8) boyunca yığılır ve sağ CDE kenarına (Şekil 5.8) doğru üniform olarak azalır. Basma normal gerilmeleri bindirme bölgesi sol kenarından sağ tarafa doğru 4 mm'lik mesafede yaklaşık dört kat azalır ve buradan CDE kenarına kadar olan bölgede ise hemen hemen sabit olarak kalır (Şekil 6.13a). Kayma gerilmesi σ_{xy} normal gerilme σ_{xx} ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir seviyelerdedir ve AHG kenarı boyunca özellikle A ve G noktaları etrafında yoğunlaşır. von Mises gerilme σ_{eqv} dağılımları normal gerilme dağılımları ile benzerdir; yani, gerilme yığılmaları AHG kenarı boyunca görülmektedir. Üst plakanın tüm katmanlarının gerilme durumları üzerinde σ_{xx} normal gerilmesinin önemli bir etkiye sahip olduğu aşikardır. Üst plakanın seramikçe zengin üst yüzeyi yüksek basma normal gerilmesi ve von Mises gerilmesi dağılımlarına maruzdur ve normal gerilme metalce zengin alt yüzeye doğru basmadan çekmeye dönüşür (Şekil 6.13). Seramikçe zengin yüzeydeki en büyük normal ve von Mises gerilme değerleri metalce zengin alt yüzeydeki gerilme değerlerinden sırasıyla 1.11 ve 1.09 kat daha büyüktür. Sonuç olarak, üst plakanın tüm katmanlarının AHG kenarı boyunca önemli gerilme yığılmaları ortaya çıktığı görülmüştür.

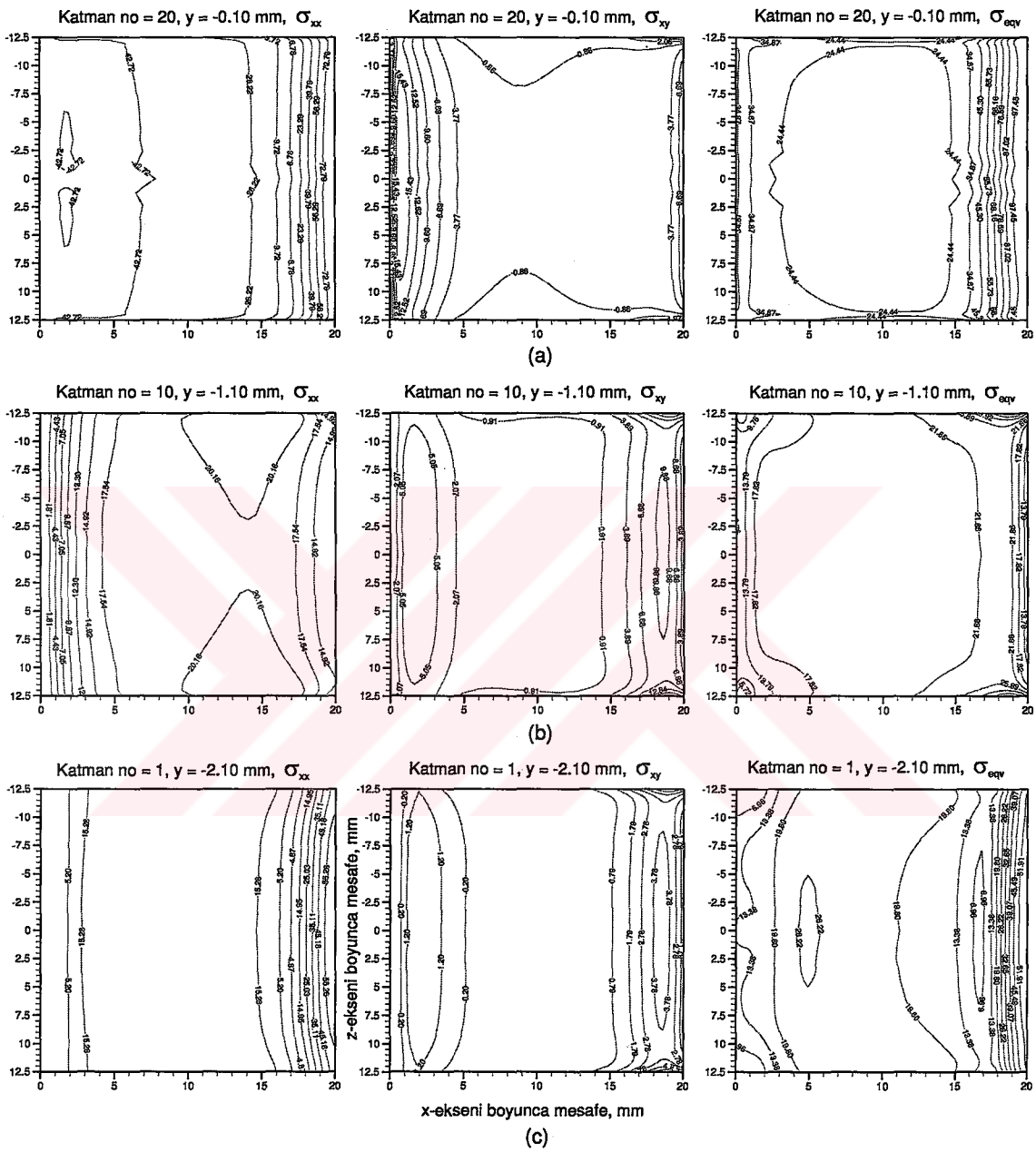
Yapıştırıcı tabakasında, normal gerilme σ_{yy} ve kayma gerilmesi σ_{xy} yapıştırıcı sağ ve sol serbest kenarları (AHG ve CDE) boyunca yığılmıştır. Normal gerilme σ_{yy} Şekil 6.14'de gösterildiği gibi yapıştırıcı tabakasının sol serbest kenarı (AHG) boyunca üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde yüksek seviyelere ulaşır ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyine doğru azalır. Buna karşın, en büyük normal gerilme değerleri CDE serbest kenarı boyunca alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ortaya çıkar (Şekil 6.14). Kayma gerilmesi σ_{xy} yapıştırıcı tabakasının sol ve sağ serbest kenarları (AHG ve CDE) boyunca yığılır. Bununla beraber, metalce zengin alt yüzeye doğru AHG kenarı boyunca azalırken CDE kenarı boyunca artar. Yapıştırıcı serbest kenarları normal gerilme σ_{yy} nedeniyle soyulmaya ve kayma gerilmesi σ_{xy} nedeniyle de



Şekil 6.13: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca üst plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 2.10 mm, b) y= 1.10 mm ve c) y= 0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 6.14: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca yapıştırıcı yüzeylerinde artık ısıl normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= 0.10 mm, b) y= 0.00 mm ve c) y= -0.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 6.15: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının y-ekseni boyunca alt plaka katmanlarındaki artık ısıl normal gerilme σ_{xx}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları a) y= -0.10 mm, b) y= -1.10 mm ve c) y= -2.10 mm (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).

düzlemsel deformasyonlara maruzdur. von Mises gerilmeleri hem soyulma hem de düzlemsel kayma gerilmelerinden etkilenmektedir. Yapıştırıcı tabakasının AHG ve CDE kenarları boyunca en büyük von Mises gerilmeleri meydana geldiği için muhtemel bir çatlak başlangıcı üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarında ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarında özelliklede AG ve CE köşeleri etrafında beklenebilir.

Şekil 6.15'de alt plaka bindirme bölgesinin en üst, orta ve en alt katmanlarında normal σ_{xx}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları görülmektedir. Normal gerilme σ_{xx} alt plaka bindirme bölgesinin sağ CDE kenarı boyunca çekme tarzında yığılır ve AHG serbest kenarına doğru üniform olarak azalır. Bunun sebebi alt plakanın bu bölgesinde ortaya çıkan yüksek eğilme etkileridir (Şekil 5.8). Normal gerilmeler alt plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde çekme gerilmesi tarzında olup kalınlık boyunca üniform olarak azalarak metalce zengin alt yüzeyde basma gerilmesine dönüşür. Üst yüzeydeki en büyük normal gerilmenin değeri alt yüzeydeki gerilme değerlerinden 3.03 kat daha büyüktür. Kayma gerilmesi σ_{xy} seramikçe zengin üst yüzeyde AHG kenarı boyunca yığılırken metalce zengin alt yüzeyde CDE kenarı boyunca yığılır (Şekil 6.15). Bununla beraber, seramikçe zengin üst yüzeydeki en büyük kayma gerilmesinin değeri metalce zengin alt yüzeydeki gerilme değerinden 2.71 kat daha büyüktür. von Mises gerilme dağılımları normal gerilme ile benzerdir; yani, seramikçe zengin üst yüzeyin CDE kenarı boyunca yığılır ve plaka kalınlığı boyunca üniform olarak azalır. Benzer şekilde, seramikçe zengin üst yüzeydeki en büyük von Mises gerilmesinin değeri metalce zengin alt yüzeydekinden 3.7 kat daha büyüktür.

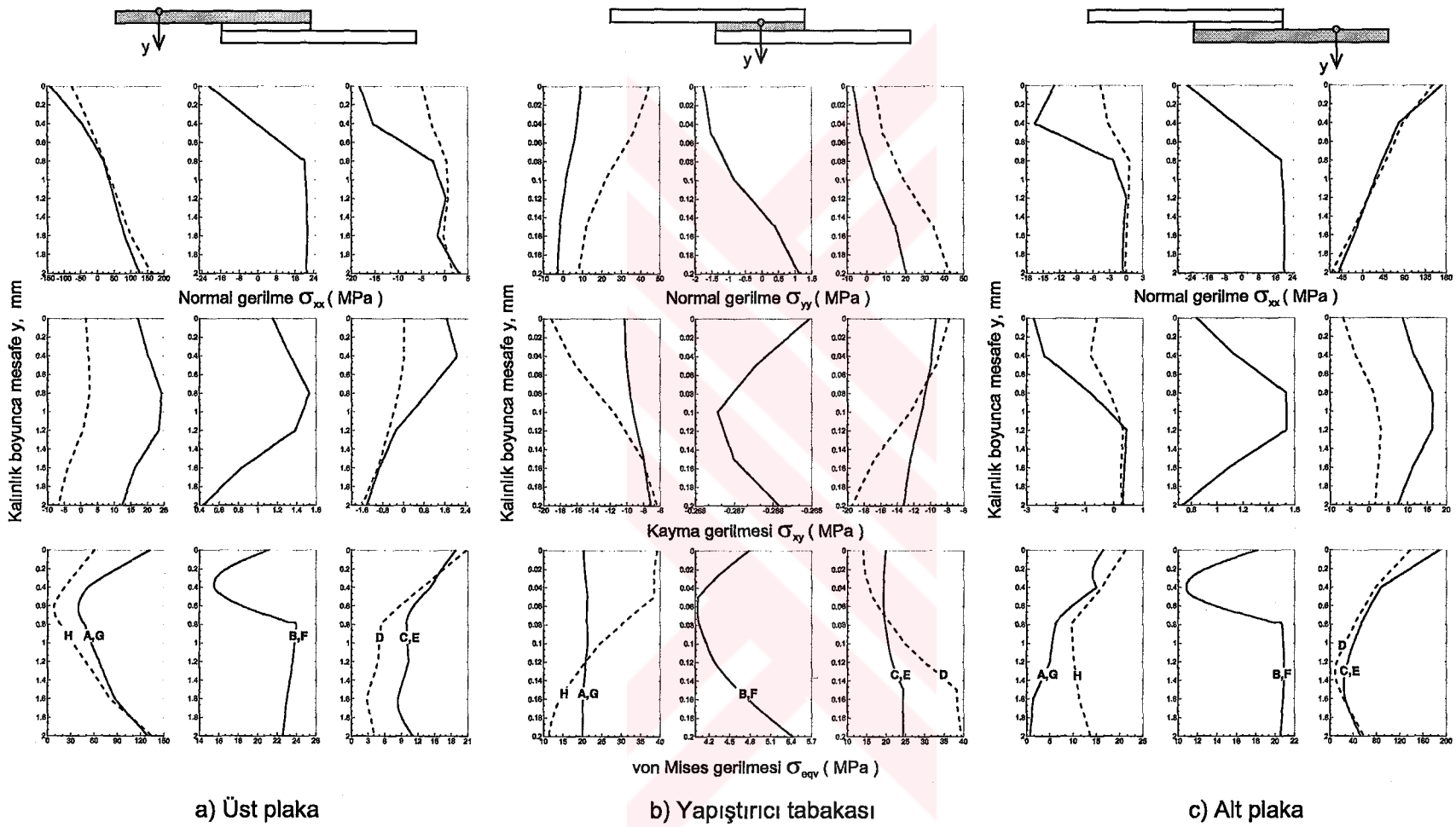
İkinci sınır şartı (SŞ-II) yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların gerilme durumları üzerinde önemli bir etkiye sahip olan σ_{xx} boyuna gerilmelerinin oluşmasını sağlar ve bu gerimeler plakaların seramikçe zengin üst yüzeylerinde en büyük değerlere ulaşır. Bununla beraber, yapıştırıcı tabakasının serbest kenarları büyük normal (soyulma) gerilmelere σ_{yy} maruzdur ve bu gerilmenin değeri alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarı boyunca ve üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarı boyunca en büyüktür. Düzlem dışı kayma gerilmesi σ_{xy}'de plakalar ve yapıştırıcı tabakasında oluşan deformasyonlar

üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Kompozisyonel gradyant $n=$ 1.0 ve 10.0'da yapıştırıcı tabakasında ve plakalarda benzer gerilme durumlarının oluşmasına neden olurlar.

Fonksiyonel kademelendirilmiş üst ve alt plakaların kalınlıkları boyunca farklı katmanlarında ve farklı yapıştırıcı düzlemlerinde kritik gerilme bileşenlerinin değişken gerilme seviyelerine sahip olması nedeniyle, kritik normal σ_{xx}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin plaka bindirme bölgesinde seçilen kritik noktalarda (Şekil 5.8) plaka ve yapıştırıcı kalınlıkları boyunca değişimleri Şekil 6.16-18'de sırasıyla kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1, 1.0 ve 10.0 için gösterilmiştir. Bu gerilme değerleri her bir katmanlı eleman kalınlığı boyunca integrasyon noktalarında değerlendirilmiştir. $n=$ 0.1 iken, normal gerilme σ_{xx} AHG kenarı boyunca seramikçe zengin üst yüzeyde basma gerilmesi tarzındadır ve plaka kalınlığı boyunca üniform olarak artarak metalce zengin alt yüzeyde çekme gerilmesine dönüşür ayrıca CDE kenarına doğru da üniform olarak azalarak burada küçük değerler alır (Şekil 6.16a). Kayma gerilmesi σ_{xy} AHG kenarı boyunca yığılır ve üst plakanın alt ve üst yüzeylerinden artarak plaka kalınlığının orta kısmında en büyük olur. von Mises gerilmesi AHG kenarı boyunca hem metalce zengin alt yüzeyde hem de seramikçe zengin üst yüzeyde en büyük olur ve CDE kenarına doğru üniform olarak azalır. Böylece, üst plakanın en kritik bölgesinin üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarı (AHG) olduğu aşikardır.

Serbest modelde, üst plakada normal gerilme σ_{xx} plakanın seramik bölgesinde daha etkiliyken plakanın geri kalan bölgelerinde ihmal edilebilir seviyelerdeydi (Şekil 6.6). Ancak sabitlenmiş modelde hem seramik hem de metal bölgeler dikkate değer gerilme seviyelerine maruz kalmıştır (Şekil 6.16). Sabitlenmiş modelde σ_{xy} kayma gerilmesinin serbest modeldekine göre daha kritik olduğu görülür. Yapıştırıcı tabakası ve alt plakanın gerilme durumlarında da benzer davranışlar gözlenmiştir. Yapıştırıcı ve plakaların ısıl ve mekanik özellikleri arasındaki farklardan dolayı ısıl yükler altında yapıştırıcı bağlantısında gerilme seviyelerinin daha kritik olduğu görülebilir.

Yapıştırıcı tabakasında, normal (soyulma) gerilme σ_{yy} sağ ve sol yapıştırıcı serbest

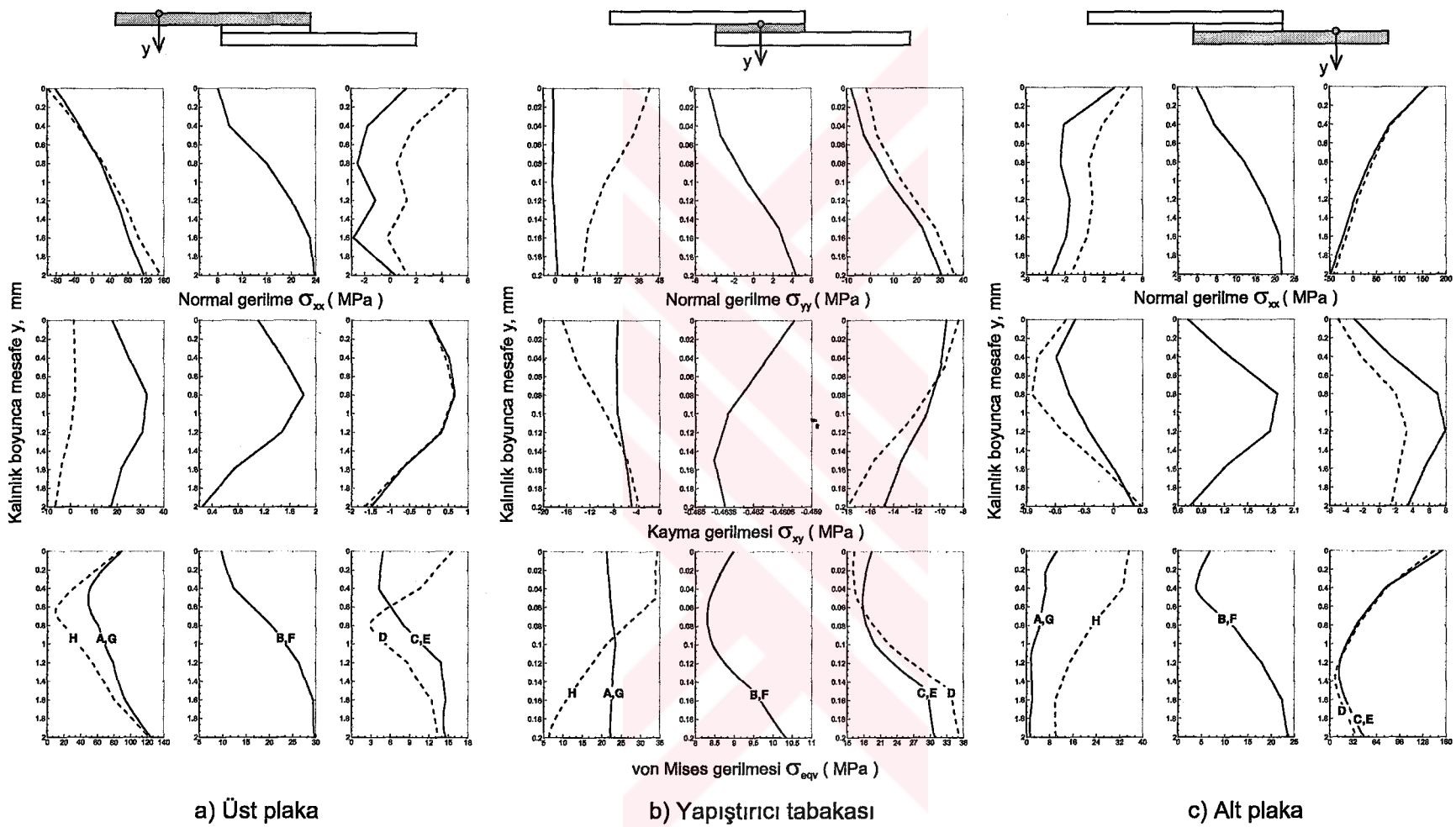


Şekil 6.16: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri ($n = 0.1$) (Şekil 5.8'e bak).

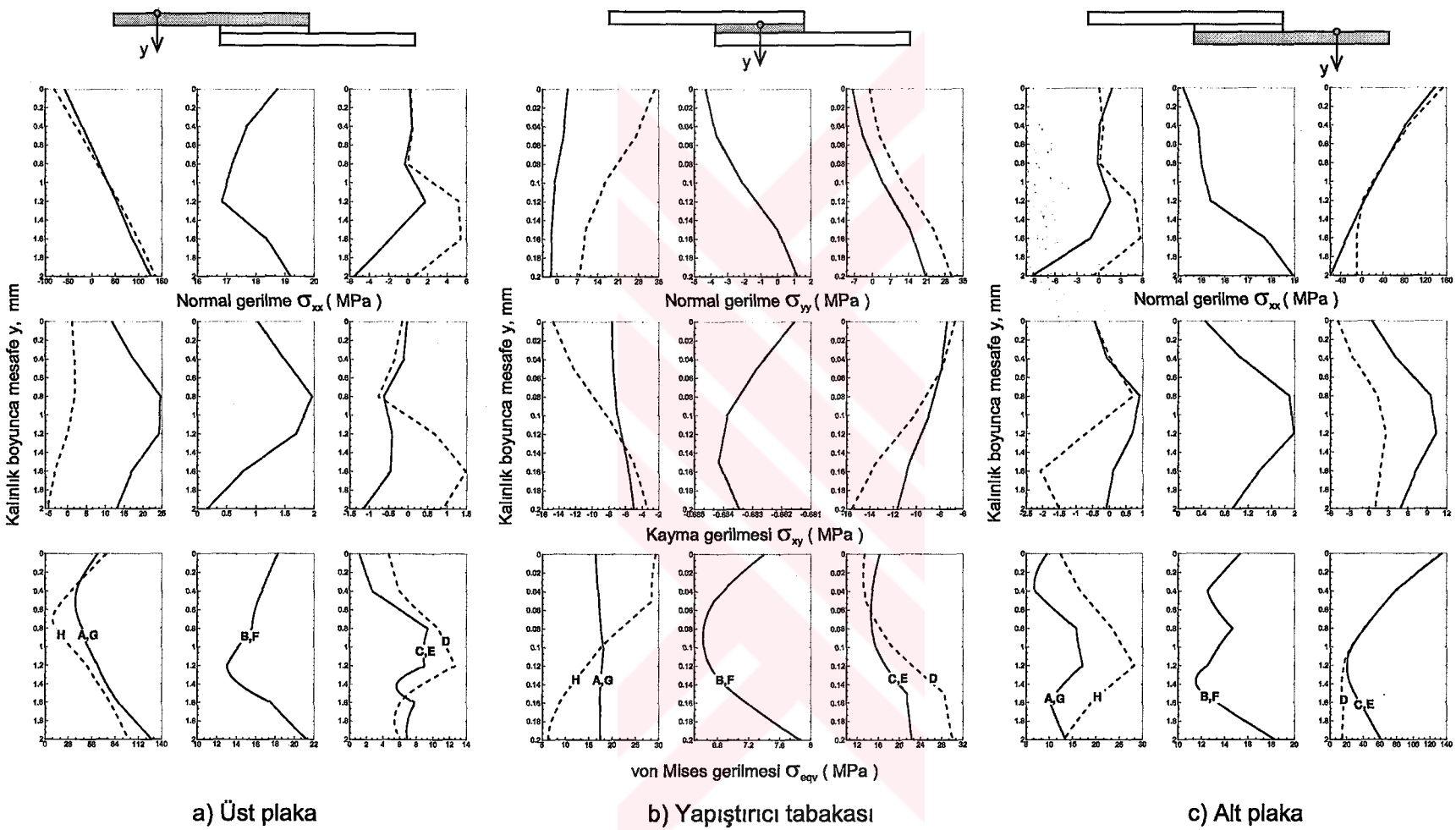
kenarlarının gerilme durumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Şekil 6.16b). normal gerilme AHG serbest kenarı boyunca üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyine yapıştırıcı kalınlığı boyunca üniform olarak azalırken CDE serbest kenarı boyunca üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyine doğru artar. Kayma gerilmesi σ_{xy} yapıştırıcı tabakasının gerilme durumu üzerinde normal gerilme kadar etkilidir. Yani, kayma gerilmesi normal gerilme ile aynı bölgelerde en büyük değerlere ulaşır (AHG ve CDE). von Mises gerilmesi σ_{eqv} yapıştırıcı kalınlığı boyunca normal ve kayma gerilmeleriyle benzer dağılımlar gösterir. Sonuç olarak, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarı ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarı en kritik yapıştırıcı bölgeleridir. Bundan dolayı, ilk çatlak başlangıcı bu kritik arayüzeylerde veya bu arayüzeylere yakın yapıştırıcı bölgelerinde beklenebilir.

Alt plakada, normal gerilme σ_{xx} seramikçe zengin alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarı CDE boyunca en büyük çekme gerilmesi tarzında olup metalce zengin alt yüzeye doğru üniform olarak azalır (Şekil 6.16c). Benzer şekilde, kayma gerilmesi σ_{xy} CDE kenarı boyunca belirgindir, fakat alt ve üst yüzeylerden artarak plaka kalınlığının orta bölgesinde en büyük olur. von Mises gerilmeleri alt plaka bindirme bölgesinin CDE serbest kenarı boyunca yığılır ve burada seramikçe zengin üst yüzeyde en büyük değerlere ulaşır. Böylece, alt plakanın en kritik bölgesi alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin CDE serbest kenarıdır. Kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 iken en büyük gerilmelerin meydana geldiği kritik bölgeler yapıştırıcı serbest uçlarıdır; özellikle de, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarı ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarıdır. Yapıştırıcı tabakası bağlantının en zayıf bölgesi olduğu için ilk muhtemel bölgesel hasar yapıştırıcı-plaka arayüzeylerinin serbest kenarlarına yakın yapıştırıcı bölgelerinde beklenebilir.

$n=$ 1.0 iken, baskın gerilme bileşenleri ve üst plaka kalınlığı boyunca değişimleri (Şekil 6.17) kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 (Şekil 6.16) iken oluşan gerilme bileşenleri ve bunların değişimleri ile benzerdir. Normal ve von Mises gerilmeleri metalce zengin üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin AHG kenarı boyunca kritik en büyük seviyelerde iken kayma gerilmesi σ_{xy} aynı bölgede plaka yarı-kalınlığında en büyük olur (Şekil 6.17a). Kompozisyonel gradyant n'in normal, kayma ve



Şekil 6.17: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri ($n = 1.0$) (Şekil 5.8'e bak).

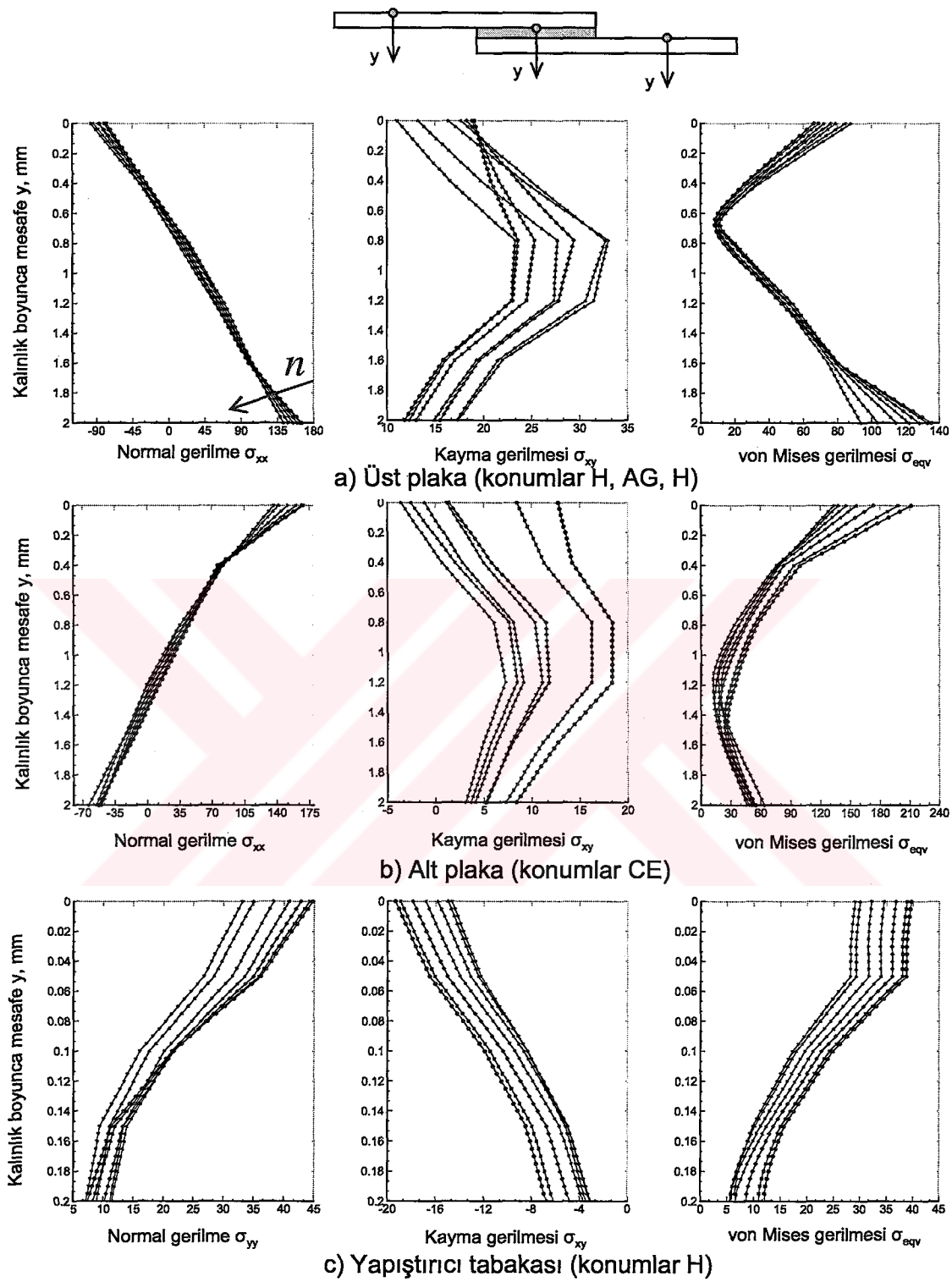


Şekil 6.18: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) yapıştırıcı tabakası ve c) alt plaka bindirme bölgelerindeki bazı kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri ($n=$ 10.0) (Şekil 5.8'e bak).

von Mises gerilmelerinin profilleri üzerindeki etkisi önemsizdir. Bununla beraber, en büyük gerilme değerlerinde küçük değişimlere sebep olur. Yani, $n=$ 0.1'deki en büyük gerilmeler ile karşılaştırıldığında, en büyük normal ve von Mises gerilmelerinin sırasıyla %6.1 ve %7.3 oranlarında azaldığı görülürken en büyük kayma gerilmesinin %34.8 oranında artığı görülmüştür. Şekil 6.17b'de yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca normal σ_{yy}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları görülmektedir. En büyük gerilmelerin alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin CDE serbest kenarı ve üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin AHG serbest kenarında oluştuğu görülmüştür. Bununla beraber, bu en büyük gerilmelerin kalınlık boyunca profillerinin kompozisyonel gradyanttan etkilenmediği görülür. $n=$ 0.1'deki en büyük gerilme değerleri ile karşılaştırıldığında en büyük normal σ_{yy}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin sırasıyla %8.3, %12.3 ve %12.3 oranlarında azalmış oldukları görülür. Alt plakadaki gerilme yığılmaları yapıştırıcı serbest kenarlarına yakın bölgelerde oluştuğu için, en büyük normal ve von Mises gerilmeleri alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest kenarına (CDE) yakın bölgelerde görülürken, en büyük kayma gerilmesi ise alt plaka kalınlığının orta bölgesinde meydana gelir (Şekil 6.17c). Metalce zengin kompozisyon $n=$ 0.1'in gerilme durumu (Şekil 6.16c) ile karşılaştırıldığında en büyük gerilmelerin profilleri aynı kalırken en büyük normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin sırasıyla %6.5, %52 ve %17.9 oranlarında azalırlar. Sonuç olarak, alt ve üst plakaların kompozisyonlarındaki seramik oranının artması bindirme bölgesinde kritik noktalardaki kalınlıklar boyunca değişen gerilme profillerini etkilemezken, yapıştırıcı tabakası ve plakalardaki en büyük artık gerilme değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Bunun sebebi seramik bileşenin ısıl genleşme katsayısı metal bileşenin ısıl genleşme katsayısından yaklaşık olarak iki kat küçüktür. Dolayısıyla, artan kompozisyonel gradyant fonksiyonel kademelendirilmiş üst ve alt plakaların seramikçe zengin kompozisyonda olmasını sağlar ve buna bağlı olarak plakalardaki ısıl şekil değiştirme miktarları da azalır.

Seramikçe zengin kompozisyon $n=$ 10.0 için yapılan ısıl gerilme analizlerinden görülmüştür ki kompozisyonel gradyantın gerilme bileşenleri üzerinde etkisi olmazken plakalar ve yapıştırıcı tabakasının gerilme durumları üzerinde daha etkilidir. Üst plakada, gerilme yığılmalarının meydana geldiği kritik bölgeler

yine aynıdır; yani, gerilme yığılmaları üst plaka bindirme bölgesinin AHG sol serbest kenarı boyunca oluşur (Şekil 6.18a). Normal gerilme σ_{xx} üst plakanın seramikçe zengin üst yüzeyinde basma gerilmesinden metalce zengin alt yüzeyinde çekme gerilmesine lineer olarak değişir ve üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde en büyük olur. Kayma gerilmesi σ_{xy} üst plakanın kalınlığı boyunca küçük değişimler gösterir, ve plaka kalınlığının orta kısımlarında en büyük olur. Bununla beraber, seramikçe zengin kompozisyonun gerilme durumu metalce zengin kompozisyonunki ile karşılaştırıldığında üst plakanın kalınlığı boyunca en büyük normal σ_{xx} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin sırasıyla %16.6 ve %4.5 azaldıkları görülürken en büyük kayma gerilmesi σ_{xy} hemen hemen aynı kalmıştır. Yapıştırıcı tabakasında, $n=$ 10.0 için yapıştırıcı tabakasının gerilme durumu $n=$ 0.1 ve 1.0'deki gerilme durumlarıyla benzerdir. Yani, yapıştırıcı tabakası boyunca en büyük gerilme profilleri ve yerlerinin değişmediği görülmüştür. Normal gerilme σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} yapıştırıcı tabakasının serbest kenarları boyunca yığılır. Gerilmeler AHG serbest kenarı boyunca alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyine ve CDE serbest kenarı boyunca üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden alt plaka yapıştırıcı arayüzeyine doğru artarlar (Şekil 6.18b). Bununla beraber, $n=$ 0.1'deki en büyük yapıştırıcı gerilmeleri ile karşılaştırıldığında en büyük normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin sırasıyla %24.6, %23 ve %25.3 oranlarında azalmış oldukları görülür. Alt plakada, normal ve von Mises gerilmeleri yapıştırıcı sağ CDE serbest kenarına tekabül eden alt plaka bölgesi boyunca en büyük olurlar ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinden plaka alt yüzeyine doğru azalırlar. Ayrıca, CDE serbest kenarı boyunca dikkate değer kayma gerilmeleri oluşur ve alt plaka kalınlığının orta kısımlarında en büyük olur (Şekil 6.18c). Ayrıca, malzeme kompozisyonunda seramik fazın artması, metalce zengin kompozisyona ($n=$ 0.1) göre normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin sırasıyla %10.7, %36.8 ve %28.7 oranlarında azalmasına sebep olmaktadır. Bu sınır şartında, plakaların kalınlıkları boyunca metalce zengin, lineer ve seramikçe zengin malzeme kompozisyonları için yapılan ısıl gerilme analizlerinden kompozisyonel gradyantın kritik gerilme profilleri üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu görülürken en büyük gerilme seviyelerinde önemli oranlarda azalmaya neden olduğu görülmüştür.



Şekil 6.19: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş Ni–Al_2O_3 fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının a) üst plaka, b) alt plaka ve c) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerindeki kritik noktalarda kalınlık boyunca artık ısıl normal gerilmer σ_{xx} ve σ_{yy}, kayma gerilmesi σ_{xy} ve von Mises gerilmesi σ_{eqv} değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın (n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0) tesiri (k= 20) (Şekil 5.8'e bak) (Tüm gerilmeler MPa).

SŞ-II için, yapıştırıcı ve plakaların kalınlıkları boyunca gerilme büyüklüğü ve profillerdeki değişimlere plaka katman sayılarının etkileri araştırıldı. Katman sayısının kompozisyonel gradyantlar $n=$ 0.1, 1.0 ve 10.0 için üst ve alt plakalar ile yapıştırıcı tabakasındaki kritik bölgelerde (Şekil 5.8) kalınlıklar boyunca normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğu görüldü. Gerilme dağılımları burada gösterilmemiştir. Artan katman sayısı gerilme profillerinde çok küçük değişimlere neden olurken gerilme seviyelerinde de küçük farklara sebep olmuştur. Özellikle, 50 katmandan sonra plakaların ve yapıştırıcı tabakasının kalınlıkları boyunca gerilme profilleri ve büyüklüklerinde pek fazla değişim olmadığı görülmüştür. Birinci sınır şartında (SŞ-I) $n=$ 0.1, 1.0 ve 10.0 için plaka ve yapıştırıcı tabakası boyunca σ_{xy} kayma gerilmesinde küçük farklılıklar görülürken normal σ_{xx} ve von Mises σ_{eqv} gerilmerinde alt ve üst plakaların seramikçe ve metalce zengin yüzeylerine yakın bölgelerde büyük farklılıklar görülmüştür. Buna karşın sabitlenmiş modelin gerilme durumu plakaların katman sayısından ziyade plakalar ve yapıştırıcı tabakasının serbest ısıl genleşmesi ve daralması nedeniyle oluşan ısıl deformasyonlardan önemli ölçüde etkilenir. Bundan dolayı, her iki sınır şartı içinde plakalar ve yapıştırıcı tabakasının gerilme ve deformasyon durumları üzerinde katman sayısının etkisi önemsizdir.

Alt ve üst plakalar ile yapıştırıcı tabakasının gerilme durumları üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisini belirleyebilmek için katman sayısı ($k=$ 20) sabit tutularak sırasıyla kompozisyonel gradyantlar $n=$ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için analizler yapılmıştır. Şekil 6.19'da alt ve üst plakalar ile yapıştırıcı tabakası bindirme bölgelerinde belirlenen kritik noktalarda kalınlıklar boyunca normal σ_{xx}, σ_{yy}, kayma σ_{xy} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin değişimleri görülmektedir. Kademelendirilmiş plakaların malzeme kompozisyonlarındaki metal yada seramik fazın artması alt ve üst plakalar ile yapıştırıcı tabakasındaki kritik gerilme profilleri üzerinde önemsiz etkilere sahiptir. Fakat, plakaların σ_{xy} kayma gerilmeleri ile yapıştırıcı tabakasının tüm baskın gerilmelerinde artış görülürken plakaların normal ve von Mises gerilme seviyeleri hemen hemen aynı kalmıştır. Sabitlenmiş modelde kompozisyonel gradyant kayma gerilmeleri üzerinde daha etkilidir. Bununla beraber, serbest model ile karşılaştırıldığında gerilme profilleri ve seviyeleri üzerinde alt ve

üst plakaların uç şartlarının daha etkili olduğu görülmüştür.

6.5 Sonuçlar

Üniform sıcaklık yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş (Ni–Al_2O_3) tek bindirme bağlantıların iki farklı sınır şartı için üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri yapıldı. Aşağıdaki sonuçlara varıldı:

i) Fonksiyonel kademelendirilmiş tek bindirme bağlantısının alt ve üst plakalarında normal gerilme σ_{xx} ve kayma gerilmesi σ_{xy} bileşenleri baskın iken yapıştırıcı tabakasında normal gerilme σ_{yy} ve kayma gerilmesi σ_{xy} bileşenleri baskındır.

ii) Tek bindirme bağlantılarda yapıştırıcı tabakasının serbest kenarları yüksek gerilmelere maruzdur ve özellikle yapıştırıcı-plaka arayüzeylerinde gerilmeler en büyük değerlere ulaşır. Bu nedenle, bu bölgeler yapıştırıcı bağlantısının en kritik bölgeleridir.

iii) Serbest haldeki tek bindirme bağlantıların gerilme durumları üzerinde malzeme kompozisyonundaki değişim etkili iken sabitlenmiş haldeki bağlantılarda uç şartları daha etkilidir. Yani, serbest modellerde kompozisyonel gradyant arttıkça seramikçe zengin yüzeylerdeki basma normal gerilmeleri azalırken metalce zengin yüzeylerdeki çekme normal gerilmeleri artar. Sabitlenmiş modellerde ise artan kompozisyonel gradyant ile gerilme seviyeleri azalır.

iv) Tek bindirme bağlantıların serbest uç şartlarında, yapıştırıcı tabakaları boyunca kritik gerilme profillerinin kompozisyonel gradyantın değişiminden etkilenmediği görülürken gerilme değerlerinin önemli oranlarda değiştiği görülmüştür. Yapıştırıcı tabakalarında en büyük gerilme değerleri lineer malzeme kompozisyonunda ($n=$ 1.0) oluşmuştur. Bunun sebebi lineer kompozisyonel gradyant ($n=$ 1.0) için fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların en büyük eğriliğe sahip olmalarıdır. Sabit uç şartlarında ise artan kompozisyonel gradyant ile yapıştırıcı tabakalarındaki kritik gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.

v) Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların katman sayılarındaki artışların kritik

gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı, fakat belirli katman sayılarına kadar gerilme seviyeleri arasında farklılıklar olduğu görülmüştür.

vi) Kademelendirilmiş malzeme özelliklerinin fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl yüklere olan tepkilerini önemli ölçüde etkilemeleri nedeniyle kompozisyonel gradyant n bağlantıların gerilme profilleri ve değerleri üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir.

BÖLÜM 7

FONKSİYONEL KADEMELENDİRİLMİŞ TÜP BAĞLANTILARDA ISIL ARTIK GERİLMELERİN ANALİZİ

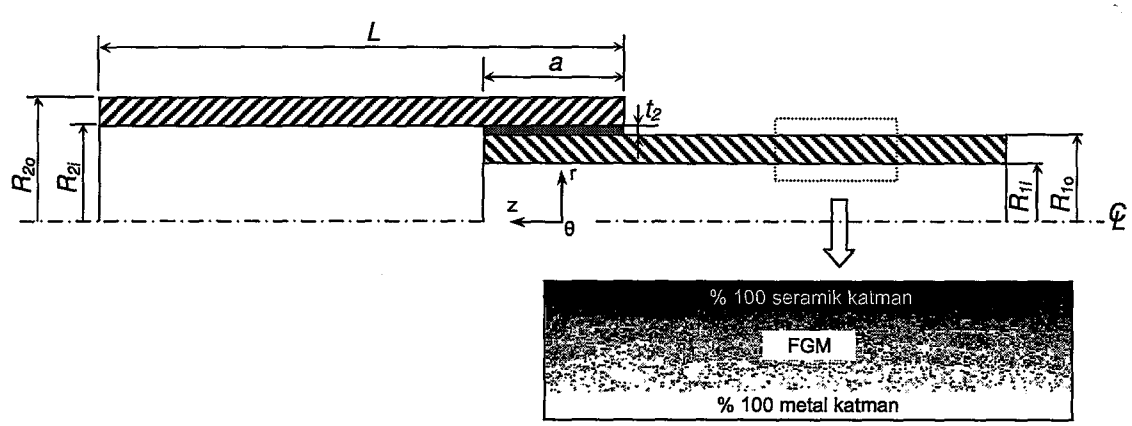
7.1 Giriş

Bu bölümde, epoxy yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantıların üniform sıcaklık yükü altındaki üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri iki farklı uç şartı için yapıldı. Analizlerde termomekanik özellikleri Tablo 6.1'de verilmiş olan epoxy yapıştırıcıyla birleştirilmiş metal (Ni) ve seramikten (Al_2O_3) oluşan fonksiyonel kademelendirilmiş plakalar kullanılmıştır. Kompozisyonel gradyant (n) ve katman sayısındaki (k) değişimlerin fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantılarda meydana gelen ısıl artık gerilmelerin büyüklüğü ve dağılımları üzerindeki etkileri de araştırıldı. Analizlerde, iç ve dış tüplerdeki malzeme kompozisyonu yönünün yapıştırıcı-plaka arayüzeyinde meydana gelen gerilme süreksizlikleri üzerindeki etkiside araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı tüp bağlantı tipi analiz edildi. Yani, tüp kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun dış yüzeyden iç yüzeye değişimi, sırasıyla i) dış tüp için Seramikten Metale ve iç tüp için Seramikten Metale (SM-SM), ii) dış tüp için Seramikten Metale ve iç tüp için Metalden Seramiğe (SM-MS) ve iii) dış tüp için Metalden Seramiğe ve iç tüp için Seramikten Metale (MS-SM) olarak kabul edildi.

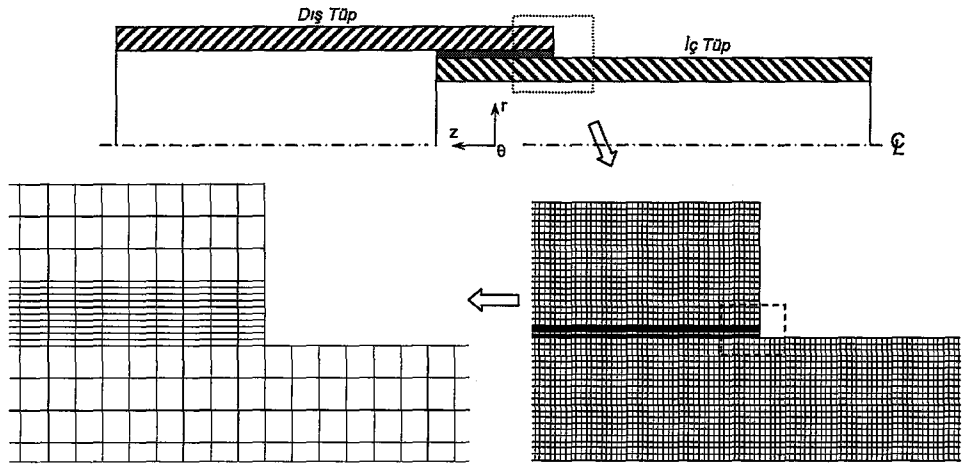
7.2 Teorik Model

Bu bölümde, üniform sıcaklık yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının iki farklı uç şartı ve üç farklı malzeme kompozisyon yönü dikkate alınarak üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri yapıldı. Analizlerde Şekil 7.1'de gösterilen fonksiyonel kademelendirmiş tüp bağlantı

kullanıldı. Bağlantıda iç ve dış tüplerinin iç yarıçapları sırasıyla R_{1i}= 20 mm ve R_{2i}= 22.2 mm, kalınlıkları 2 mm, boyları L= 225 mm, bindirme bölgesinin boyu a= 50 mm ve yapıştırıcı tabakasının kalınlığı t_2= 0.2 mm olarak kabul edilmiştir. İç ve dış tüpleri oluşturan malzemelerin (Ni–Al_2O_3) ısıl ve mekanik özelliklerinin tüp kalınlığı boyunca bir üstel fonksiyona göre sürekli olarak değiştiği kabul edilmiştir. Termomekanik özellikleri Tablo 6.1'de verilen seramik (Al_2O_3) ve metal (Ni) bileşenlerden oluşan tüpler epoxy yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Bölüm 4.2'de iç ve dış fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerin hacimsel oranları ve termomekanik özelliklerinin hesaplanmasıyla ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. Farklı kompozisyonel gradyantlar için bu termomekanik özelliklerin tüp kalınlığı boyunca değişimleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Tüp bağlantının eksenel simetrik geometrisi nedeniyle merkez ekseni etrafında bir derecelik bölümü üç boyutlu olarak modellenmiştir. Gerilme analizleri için iç ve dış fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerin sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında üç boyutlu sekiz düğüm noktalı izoparametrik katmanlı sonlu eleman kullanılırken yapıştırıcı tabakası için üç boyutlu sekiz düğüm noktalı yapısal sonlu eleman kullanılmıştır. Her iki sonlu elemanda, her bir düğüm noktasında üç serbestlik derecesine sahiptir ve üç boyutlu elastisite teorisi kullanılarak formülize edilmişlerdir (Bölüm 4.3). Tüpler kalınlıkları boyunca 20 elemana, yapıştırıcı tabakası ise kalınlığı boyunca 10 elemana bölünmüştür. Modelin toplam serbestlik derecesi artırıldığında katmanlı sonlu elemanlarda nümerik integrasyonlar için daha fazla hesaplama zamanı ve



Şekil 7.1: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantı.



Şekil 7.2: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının sonlu elemanlar modeli.

kaynağına ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, yapılan bir seri analizde Şekil 7.2'de gösterilen yapıştırıcıyla birleştirilmiş tüp bağlantının sonlu elemanlar modeli ile farklı katman sayıları için yeterli doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir.

Üniform sıcaklık yüküne maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının farklı uç şartlarında ısıl artık gerilme davranışını belirleyebilmek için yapıştırıcı bağlantısı Şekil 7.3'de gösterilen iki farklı uç şartı için analiz edilmiştir. İlaveten, tüplerin kalınlıkları boyunca dış yüzeyden iç yüzeye doğru malzeme kompozisyonlarındaki değişimler sırasıyla, i) dış tüp için Seramikten Metale ve iç tüp için Seramikten Metale (SM-SM), ii) dış tüp için Seramikten Metale ve iç tüp için Metalden Seramiğe (SM-MS) ve iii) dış tüp için Metalden Seramiğe ve iç tüp için Seramikten Metale (MS-SM) olacak şekilde gerilme analizleri tekrarlanmıştır. Bu üç farklı tasarlanmış tüp bağlantılarda, tüpler ve yapıştırıcı arayüzeyinde en küçük artık gerilme süreksizliklerine sahip bağlantı tüplerinin kompozisyonunu tespit etmemiz mümkün olacaktır.

Birinci sınır şartında (SŞ-I), yapıştırıcı bağlantısının tamamen serbest ve 100°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu kabul edilirken (Şekil 7.3a), ikinci sınır şartında (SŞ-II), bağlantının her iki ucunun tamamen sabitlendiği ve 40°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu kabul edilmiştir (Şekil 7.3b). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tüp bağlantının her iki sınır şartı için de yapılan ısıl gerilme analizleri neticesinde oluşan deforme olmuş ve deforme olmamış geometriler Şekil 7.3'de

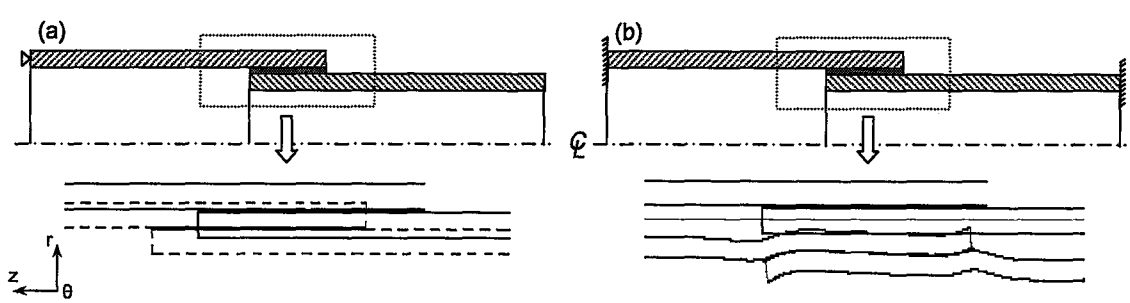
görülmektedir. Buna göre, ikinci sınır şartında (SŞ-II) tüp bağlantı bindirme bölgesinin ciddi deformasyonlara maruz kaldığı görülürken birinci sınır şartında (SŞ-I) bu deformasyonların daha küçük olduğu görülmektedir.

7.3 Serbest Model (SŞ-I)

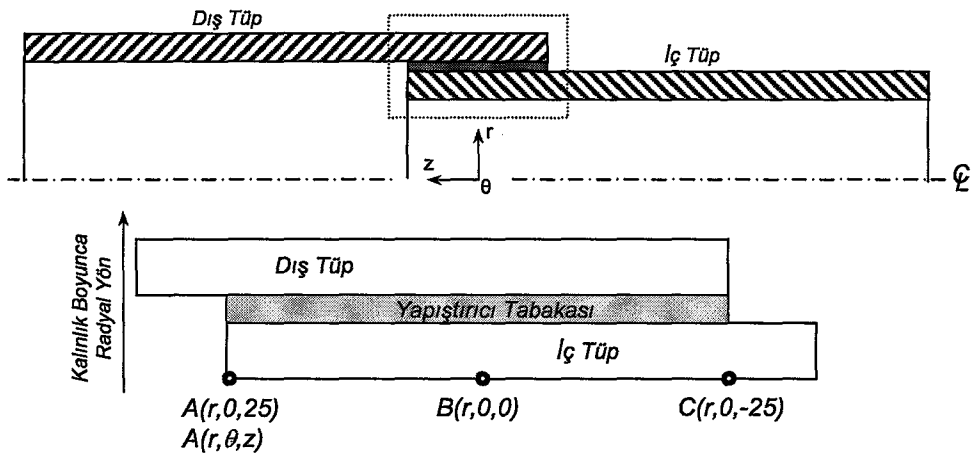
Burada, yapıştırıcıyla birleştirilmiş tüp bağlantının 100°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu ve serbest olduğu kabul edildi. Ayrıca, tüpler ve yapıştırıcı arayüzeyleri arasında gerilme süreksizliklerinin en küçük olduğu bağlantı tipini tespit edebilmek için üç farklı malzeme kompozisyon yönüne sahip tüpler için analizler tekrarlandı. Yani, fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların dış yüzeyden iç yüzeye doğru malzeme kompozisyonundaki değişimler sırasıyla i) dış tüp için Seramikten Metale ve iç tüp için Seramikten Metale (SM-SM), ii) dış tüp için Seramikten Metale ve iç tüp için Metalden Seramiğe (SM-MS) ve iii) dış tüp için Metalden Seramiğe ve iç tüp için Seramikten Metale (MS-SM) olarak kabul edildi.

i) SM-SM kompozisyonlu tüp bağlantı

Gerilme analizleri neticesinde iç ve dış tüplerde artık ısıl çevresel $\sigma_{\theta\theta}$ ve eksenel σ_{zz} gerilme bileşenleri ile σ_{rz} kayma gerilmesinin baskın olduğu görülürken yapıştırıcı tabakasında radyal σ_{rr} ve çevresel $\sigma_{\theta\theta}$ gerilme bileşenleri ile σ_{rz} kayma gerilmesinin bindirme bölgesinde baskın olduğu görülmüştür. Şekil 7.5'de metalce zengin ($n=$ 0.1) SM-SM malzeme kompozisyonu için bağlantı bindirme bölgesine tekabül eden iç ve dış tüpler ile yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca von Mises σ_{eqv} gerilmesi dağılımları görülmektedir. İç ve dış tüpler, kalınlıkları boyunca 60 katman (her bir



Şekil 7.3: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri a) SŞ-I ve b) SŞ-II.



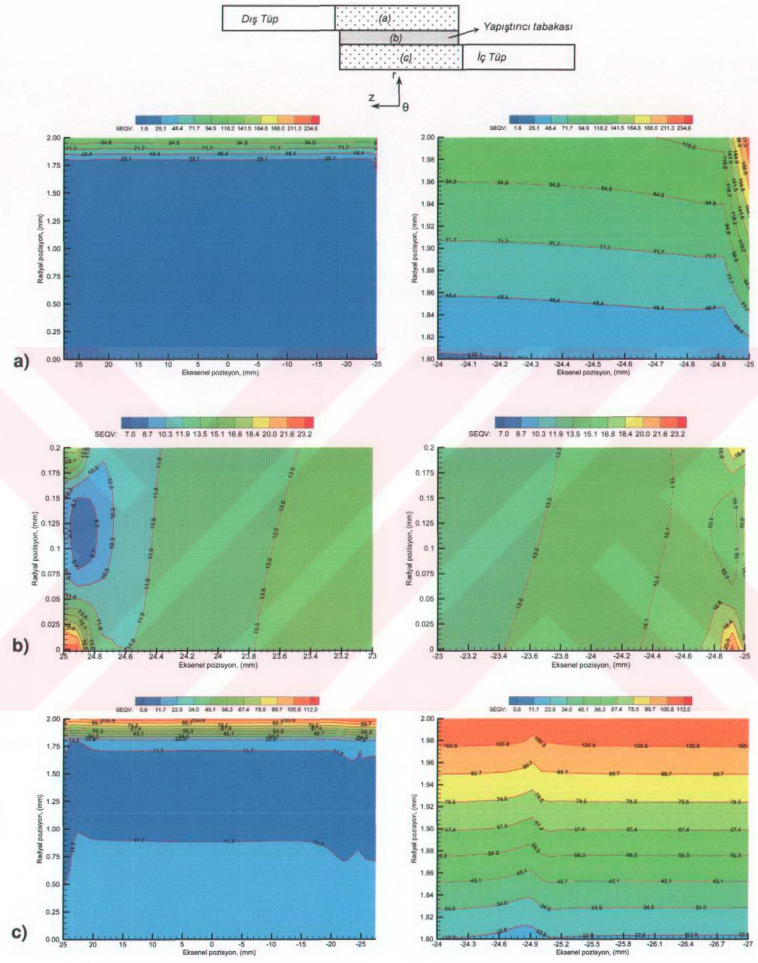
Şekil 7.4: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde dış tüp, yapıştırıcı tabakası ve iç tüpün kalınlıkları boyunca gerilme değişimlerinin değerlendirildiği kritik noktalar (Tüm ölçüler mm ve derece).

elemanda 3 katman) kullanılarak modellenmişlerdir. Dış tüpün seramikçe zengin dış yüzeyinde yüksek von Mises σ_{eqv} gerilmesi dağılımları meydana gelmiştir. Ancak, dış tüpün en üst katmanlarında malzeme kompozisyonu seramikten metale ani olarak değiştiği için ısıl yükler nedeniyle burada yüksek seviyelerde katmanlar arası kayma gerilmeleri oluşur ve bunun neticesinde dış tüpün sağ üst köşesinde gerilme tekillikleri görülür. Dış tüpün sağ üst köşesindeki bu yüksek gerilme değerleri yapıştırıcı bölgesinden uzak olmaları nedeniyle bağlantı dayanımında önem taşımazlar. $n=$ 0.1 iken dış tüpün kompozisyonel değişiminde metal bileşen (Ni) baskın olduğu için tüpün seramikçe zengin dış yüzeyi ve buraya yakın bölgeler hariç kalınlığı boyunca düşük gerilme dağılımları ortaya çıkar (Şekil 7.5a). Yapıştırıcı tabakasının alt köşelerinde yüksek von Mises gerilme yığılmalarının meydana geldiği görülürken üst köşelerdeki von Mises gerilme değerleri nispeten daha düşüktür (Şekil 7.5b). Yapıştırıcı tabakasının alt yüzeyi iç tüpün seramikçe zengin dış yüzeyi ile arayüze sahip olduğu için yapıştırıcı tabakasının alt köşelerinde yüksek von Mises gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu nedenle, muhtemel bir çatlak başlangıcı iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ ve sol kenarlarında beklenebilir. İç tüp bindirme bölgesindeki von Mises gerilmesi dağılımları dış tüp gerilme dağılımlarıyla benzerdir (Şekil 7.5c). En büyük von Mises gerilmeleri iç tüpün dış yüzeyinde oluşur ve seramik yüzeye yakın bölgelere doğru aniden azalarak metalce zengin katmanlarda en küçük seviyelerde bulunur. Yani, dış yüzeydeki von Mises gerilmesinin değeri iç

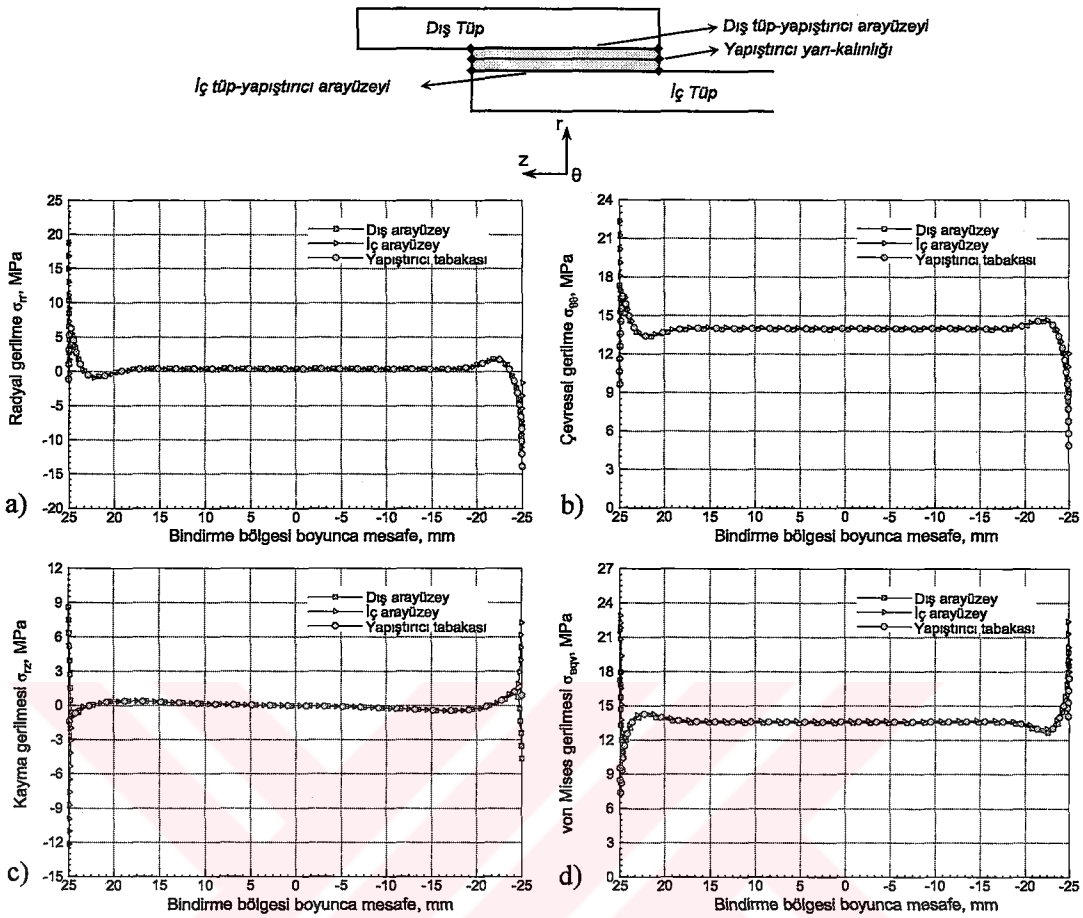
yüzeydekinden 9 kat daha büyüktür.

Kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için SM-SM malzeme kompozisyonuna sahip fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının ısıl artık gerilme analizinden her iki tüpün seramikçe zengin yüzeylerinin kritik bölgeler olduğu görülmüştür. Bununla beraber yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilmeleri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ ve sol serbest kenarlarında yığılmıştır. Artan kompozisyonel gradyant n ile iç ve dış tüplerin seramikçe zengin dış yüzeylerindeki en büyük von Mises gerilme değerleri azalırken tüplerin metalce zengin yüzeylerindeki gerilme değerleri artar. Yapıştırıcı tabakasında, en yüksek artık gerilmelerin lineer kompozisyon $n=$ 1.0 için meydana geldiği görülmüştür. Dolayısıyla, kompozisyonel gradyantlar $n=$ 1.0 ve 10.0 için gerilme dağılımları, gereksiz tekrarlamalardan kaçınmak için gösterilmemiştir.

Şekil 7.6'de $n=$ 0.1 için SM-SM malzeme kompozisyonunda iç ve dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyleri ile yapıştırıcı yarı-kalınlığında bindirme bölgesi boyunca radyal σ_{rr} ve çevresel $\sigma_{\theta\theta}$ normal gerilmeleri ile kayma σ_{rz} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin profillerindeki değişimler görülmektedir. Yapıştırıcı tabakasında gerilme yığılmaları sağ ve sol serbest kenarlar boyunca oluşmaktadır. Gerilme analizleri radyal σ_{rr} ve çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ ile kayma gerilmesi σ_{rz}'nin kritik gerilme bileşenleri olduğu görülmüştür. Radyal gerilme σ_{rr} bindirme bölgesinin orta kısmında geniş bir bölgede ihmal edilebilir seviyelerde iken yapıştırıcı sağ ve sol serbest kenarlarında sırasıyla basma ve çekme gerilmeleri tarzında yoğunlaşmıştır. En büyük radyal gerilme σ_{rr} değerleri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucunda oluşmuştur (Şekil 7.6a). Çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$'da iç tüp yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucunda en büyükken bindirme bölgesinin orta kısmınlarında da dikkate değer seviyelerdedir (Şekil 7.6b). Yapıştırıcı tabakasının serbest uçlarındaki σ_{rz} kayma gerilmesi değerinin en büyük normal gerilme değerleri ile karşılaştırıldığında dikkate değer seviyelerde olduğu görülür. Benzer şekilde, en büyük kayma gerilmesi σ_{rz} değeri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucunda oluşmuştur (Şekil 7.6c). Yapıştırıcı tabakasında von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımı baskın radyal σ_{rr} ve çevresel $\sigma_{\theta\theta}$ gerilme bileşenlerinden ciddi şekilde etkilenmiştir. İç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol ve sağ serbest uçları yüksek von Mises gerilmelerine maruzdur (Şekil 7.6d). Bu nedenle, bağlantıda muhtemel bir çatlak başlangıcı bu kritik bölgelerde beklenebilir.



Şekil 7.5: Üniform sıcaklık yüküne maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının SŞ-I için a) dış tüp, b) yapıştırıcı tabakası ve c) iç tüp bindirme bölgelerinde artık ısıl von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları (n= 0.1, k= 60) (Tüm gerilmeler MPa).



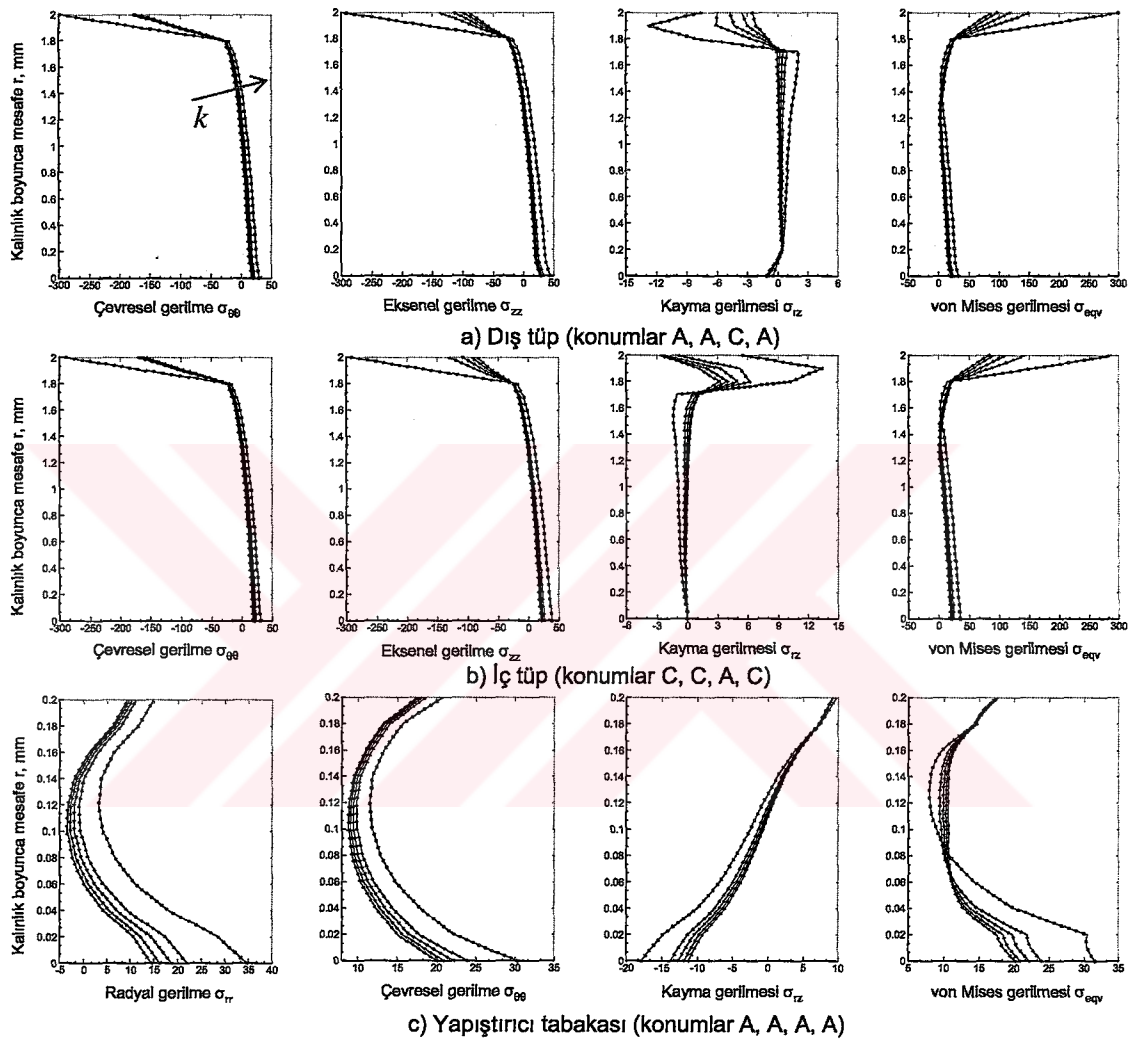
Şekil 7.6: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-I'e maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60) (Tüm gerilmeler MPa).

Fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerin katman sayılarının kalınlıklar boyunca ısıl artık gerilmelerin büyüklükleri ve profilleri üzerindeki etkileri üniform ısı yükü ve SM-SM bağlantı kompozisyonu için araştırıldı. Bu amaçla, tüp kalınlıkları boyunca katman sayıları k= 20, 40, 60, 100 ve 200 ve bu katman sayılarına göre katman kalınlıkları 0.1, 0.05, 0.033, 0.02 ve 0.01 mm alındı. Ancak, artan katman sayısıyla her bir katmanın kalınlığı boyunca nümerik integrasyon daha fazla hesaplama kaynağı ve zamanı gerektirdiğinden, 200 katmandan fazlası için çözüm yapılamamıştır. Şekil 7.7-9'de sırasıyla kompozisyonel gradyantlar n= 0.1, 1.0 ve 10.0 için plakalardaki katman sayılarının bağlantı bindirme bölgesinde belirlenmiş ve Şekil 7.4'de gösterilen

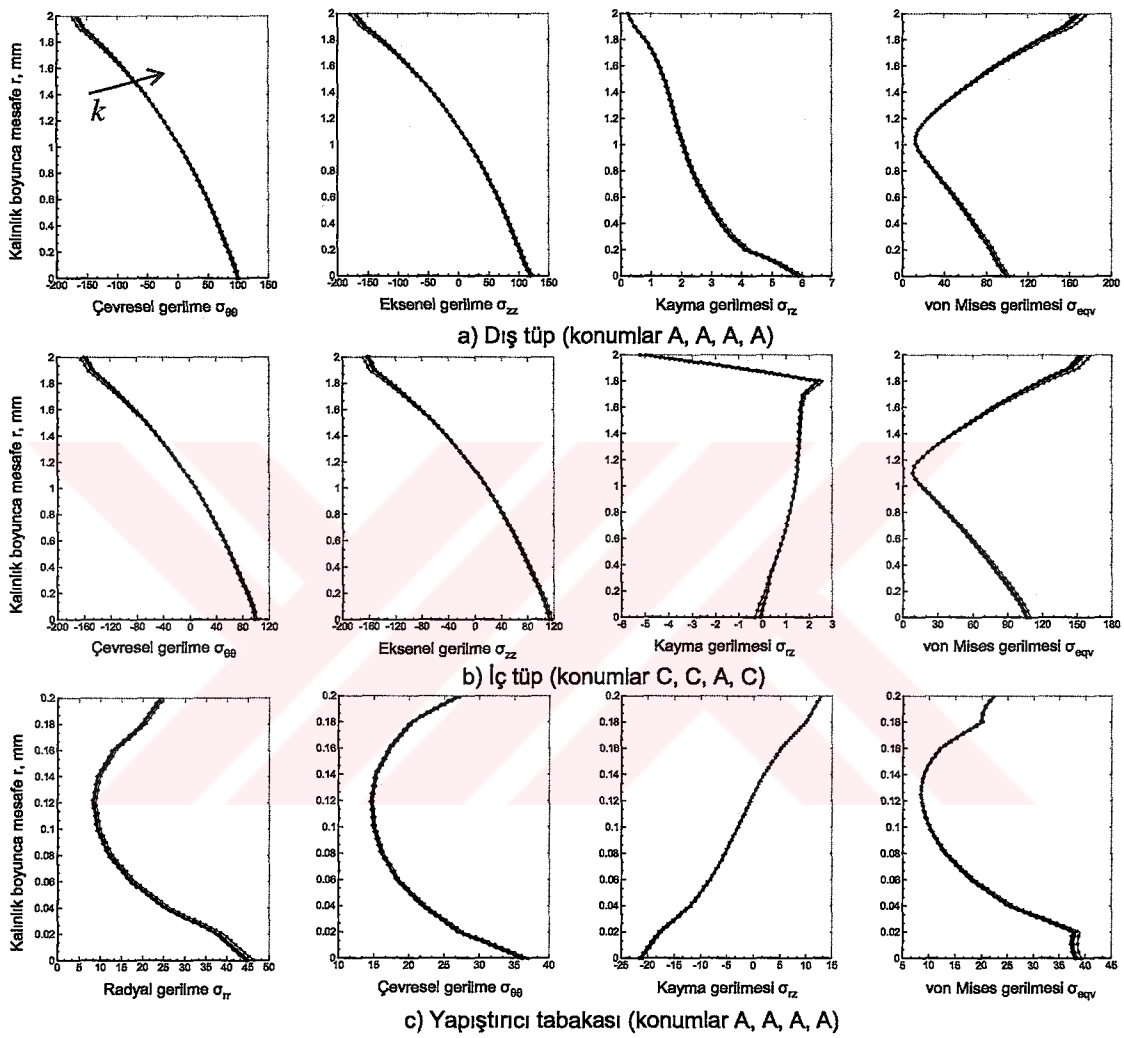
kritik noktalarda kalınlıklar boyunca normal, kayma ve von Mises gerilmelerindeki değişimler üzerindeki etkileri görülmektedir.

$n=$ 0.1 iken, normal ($\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz}) ve von Mises σ_{eqv} gerilmeleri iç ve dış tüplerin seramikçe zengin dış yüzeylerinde sırasıyla C ve A noktalarında (Şekil 7.4) en büyük seviyelere ulaşırlar ve buradaki gerilme seviyeleri arasında dikkate değer ayrılıklar olduğu görülür (Şekil 7.7a,b). Bu gerilme değerleri plakaların kalınlıkları boyunca dış yüzeylerinden 0.2 mm mesafeye kadar büyük oranda azalırlar ve geriye kalan kalınlık bölgesi boyunca hemen hemen sabit oldukları görülür. Kayma gerilmesi σ_{rz} ise her iki tüpün seramikçe zengin dış yüzeyine (C, A) yakın bölgelerde en büyük olur ve geriye kalan bölgelerde metalce zengin yüzeylere kadar gerilmenin değeri hemen hemen sıfırdır. Ayrıca kayma gerilmesinin en büyük olduğu yerlerde gerilme seviyeler arasındaki ayrılıklarda en büyüktür. Katman sayısı $k=$ 40'dan sonraki değerlerde kalınlıklar boyunca gerilme profillerinin aynı kaldığı görülmektedir. Ayrıca, dış ve iç tüplerin seramikçe zengin yüzeylerindeki en büyük normal, kayma ve von Mises gerilme değerlerinin 40 katmana kadar dikkate değer oranlarda azaldığı da görülebilir. Yapıştırıcı tabakasında, normal (σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$), kayma σ_{rz} ve von Mises σ_{eqv} gerilmeleri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin A noktasında en büyük olurlar ve burada gerilme seviyeleri arasındaki ayrılıklarında en büyük olduğu görülür (Şekil 7.7c). Artan katman sayısının gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı; buna karşın, hem tüplerin hem de yapıştırıcı tabakasının özellikle seramik tarafındaki en büyük gerilme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu aşikardır.

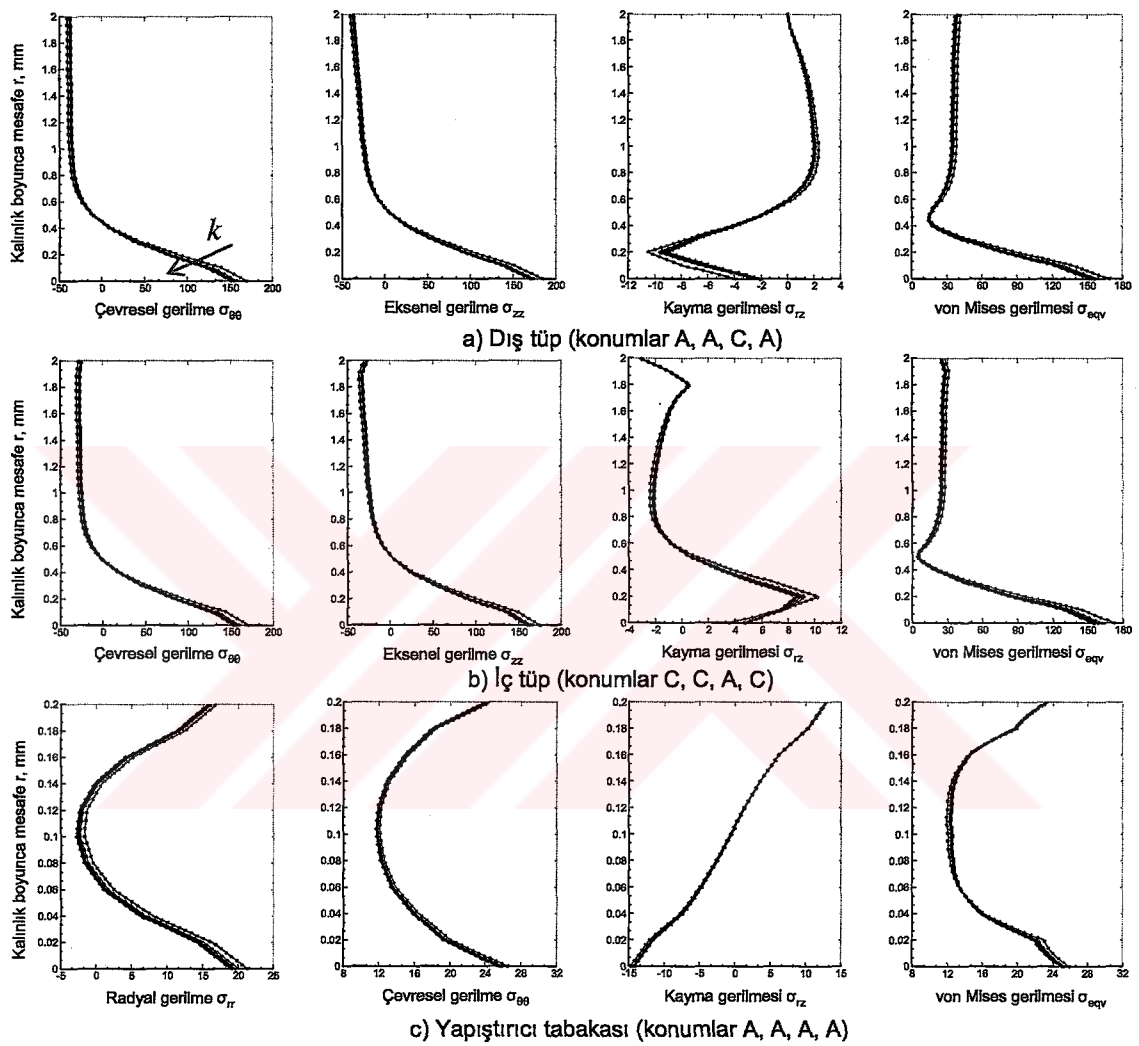
Lineer malzeme kompozisyonu $n=$ 1.0'de, iç ve dış tüplerin gerilme profillerinin kompozisyonel gradyanttan önemli şekilde etkilendiği buna karşın yapıştırıcı tabakasının gerilme profillerinin ise aynı kaldığı görülmektedir (Şekil 7.8). Yani, iç ve dış tüplerin gerilme profilleri $n=$ 0.1'deki gerilme profillerinden farklıdır. $n=$ 1.0 için artan katman sayısı ile normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin en büyük değerlerinin çok az arttığı, tüp ve yapıştırıcı kalınlıkları boyunca gerilme profillerinin daha üniform olduğu ve gerilme büyüklükleri arasındaki ayrılıkların ihmal edilebilir seviyelerde olduğu görülür. Özellikle, 40 katman sayısından sonra en büyük gerilmeler arasındaki ayrılıklar belirsiz haldedir.



Şekil 7.7: SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde katman sayısının (k= 20, 40, 60, 100 ve 200) etkisi. (n= 0.1) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 7.8: SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde katman sayısının (k= 20, 40, 60, 100 ve 200) etkisi. (n= 1.0) (Tüm gerilmeler MPa).

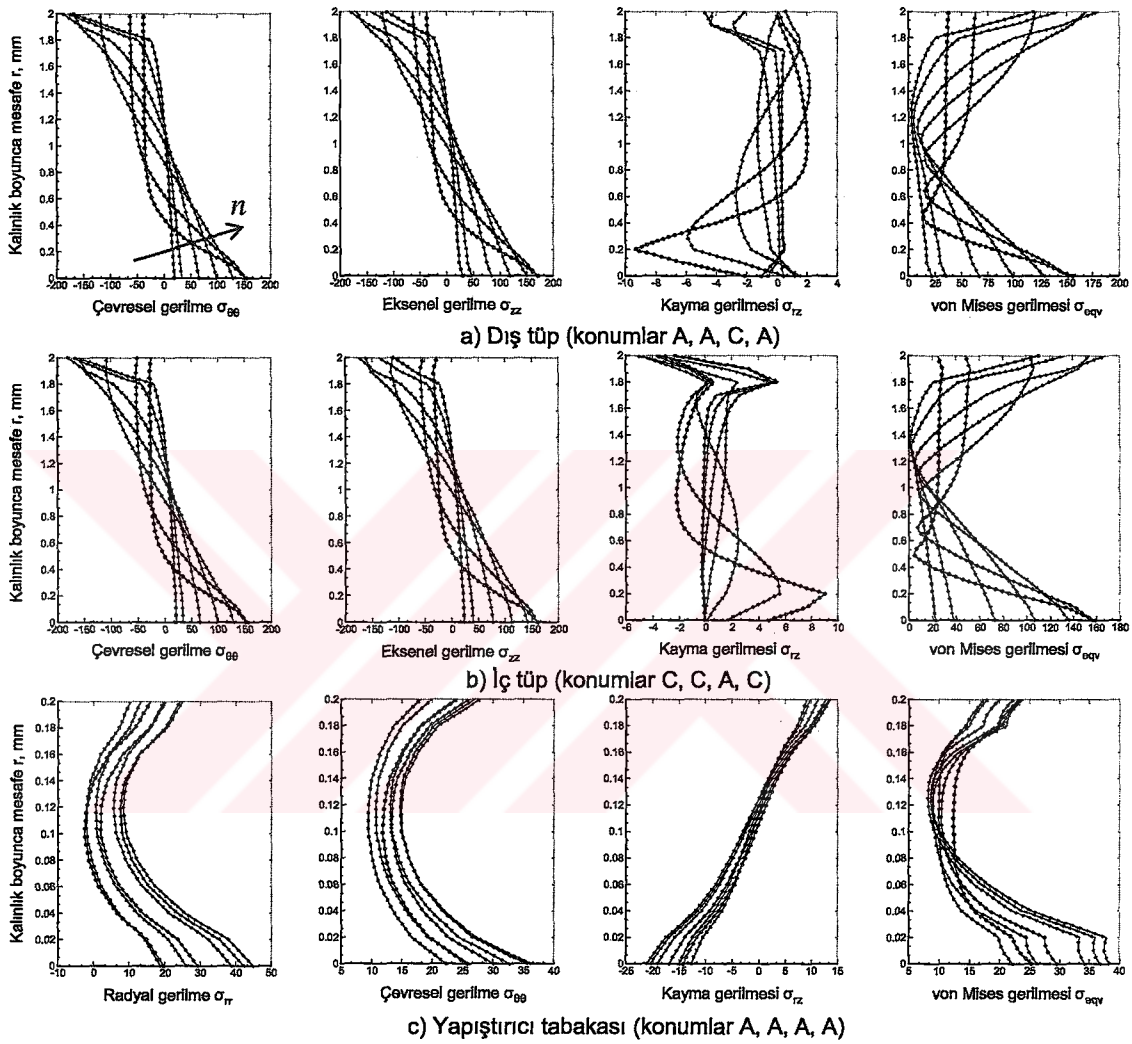


Şekil 7.9: SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde katman sayısının (k= 20, 40, 60, 100 ve 200) etkisi. (n= 10.0) (Tüm gerilmeler MPa).

Seramikçe zengin kompozisyon (n= 10.0), iç ve dış tüplerin bindirme bölgelerinde n= 0.1 ve 1.0'dekilerden farklı gerilme durumlarına sebep olurken yapıştırıcı tabakasındaki gerilme profilleri benzerdir (Şekil 7.9). En büyük normal ve von Mises gerilmeleri tüplerin metalce zengin iç yüzeylerinde yoğunlaşırken en büyük kayma gerilmesi metalce zengin yüzeyin yakınlarında meydana gelir. Seramikçe zengin dış yüzeydeki gerilme değerleri nispeten daha küçüktür. Yapıştırıcı tabakasının gerilme profilleri n= 0.1 ve 1.0'deki gerilme profilleri ile benzerdir. Fakat, gerilme değerleri yapıştırıcı kalınlığının ortalarında en küçük olurken yapıştırıcı tabakasının alt ve üst yüzeylerinde en büyük değerlere ulaşır ve tüplerin iç ve dış yüzeylerindeki gerilme değerleri hemen hemen aynı seviyelerdedir. Ayrıca, n= 10.0 içinde tüp kalınlıkları boyunca artan katman sayısı tüplerin ve yapıştırıcı tabakasının gerilme durumları üzerinde diğerleri (n= 0.1 ve 1.0) ile benzer etkiye sahiptir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının ısıl artık gerilme analizlerinden iç ve dış tüplerin artan katman sayılarının kalınlıklar boyunca oluşan gerilme profilleri üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu görülmüştür. Yani, iç ve dış tüplerin kalınlıkları boyunca katman sayısı 40'ı geçtiğinde tüplerin ve yapıştırıcı tabakasının gerilme durumu üzerinde katman sayısının etkisi görülmemektedir. Bununla beraber, metalce zengin kompozisyonda (n= 0.1) gerilmeler arasındaki ayrılıklar en büyük iken lineer ve seramikçe zengin malzeme kompozisyonlarında gerilmeler neredeyse çakışıktır. Sonuç olarak, ısıl yüklere maruz fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerin gerilme durumları katman sayılarındaki değişimden dikkate değer bir biçimde etkilenirler. Yani, herhangi bir kompozisyonel gradyant değerinde yapıştırıcı tabakası ve tüplerin kalınlıkları boyunca gerilme profilleri aynı kalırken en büyük gerilme değerleri değişmektedir.

Metalce zengin, seramikçe zengin ve lineer malzeme kompozisyonları için yapılan analizlerden tüp kalınlıkları boyunca artan katman sayısının belirli bir değerden sonra kalınlıklar boyunca değişen gerilme seviyeleri üzerinde etkisinin olmadığı görülmüştür. Halbuki, kompozisyonel gradyantın gerilme seviyeleri ve profilleri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. İç ve dış tüpler ile yapıştırıcı tabakasının kalınlıkları boyunca gerilme değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisini belirleyebilmek için üniform sıcaklık yüküne maruz fonksiyonel kademelendirilmiş



Şekil 7.10: SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa).

tüp bağlantının kompozisyonel gradyantlar n= 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için ısıl gerilme analizleri belirli bir katman sayısı (k= 60) dikkate alınarak yapılmıştır. Bu kompozisyonel gradyant değerleri için malzeme kompozisyonunun (Ni–Al_2O_3) ısıl ve mekanik özelliklerinin kalınlık boyunca değişimleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Şekil 7.10'da SM-SM bağlantı tipi için bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4) normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin kalınlıklar boyunca değişimleri üzerine kompozisyonel gradyantın etkisi görülmektedir. Dış tüpte, normal gerilmeler ($\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz}) ve kayma gerilmesi σ_{rz} bağlantı bindirme bölgesinde baskın olan gerilme bileşenleridir. Kompozisyonel gradyant n= 0.1'den 10.0'a artırıldığında dış tüpün kalınlığı boyunca normal gerilme profilleri ciddi şekilde değişirler. Yani, kompozisyonel gradyant n arttıkça en büyük normal gerilmeler $\sigma_{\theta\theta}$ ve σ_{zz} seramikçe zengin dış yüzeyde basma gerilmesinden metalce zengin iç yüzeye çekme gerilmesi olarak değişirler (Şekil 7.10a). Kayma gerilmesi σ_{rz} normal gerilmelere oranla ihmal edilebilir seviyelerdedir. Buna rağmen, artan kompozisyonel gradyant ile kayma gerilmesinin en büyük değeri seramikçe zengin yüzey civarından metalce zengin yüzey civarına değişir. Tüp kalınlıkları boyunca von Mises σ_{eqv} gerilmesinin profilleri farklıdır. Yani, kompozisyonel gradyant değeri arttıkça metalce zengin iç yüzeylerdeki von Mises gerilme değerlerinin büyük oranlarda arttığı görülür. Malzeme kompozisyonunun metalce zenginden seramikçe zengine değişimi kritik gerilmelerin hem profillerinin hem de değerlerinin önemli ölçüde değişmelerine neden olmuştur.

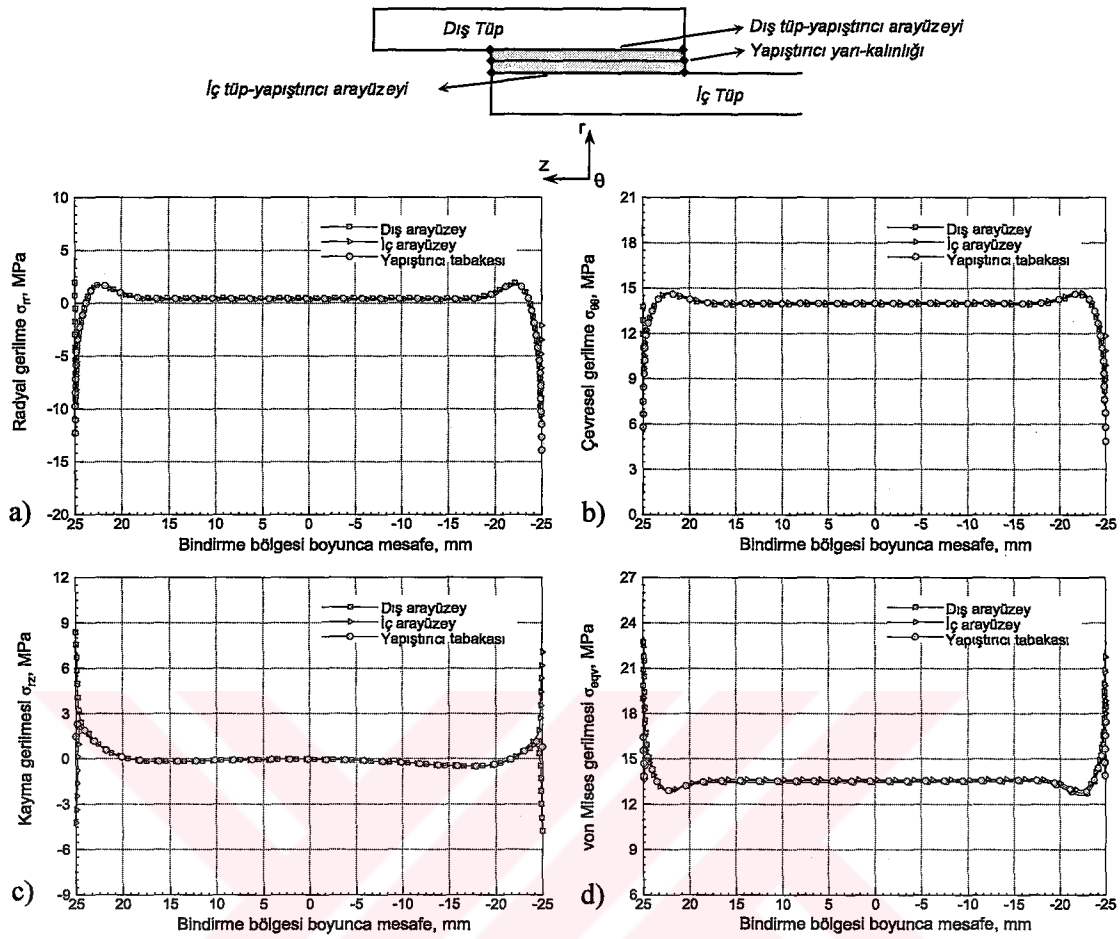
İç tüpteki kritik gerilme bileşenleri dış tüpteki gerilmeler ile benzer değişimler göstermektedirler. Yani, artan kompozisyonel gradyant kritik gerilmelerin hem kalınlıklar boyunca profillerinin hemde en büyük değerlerinin değişmesine neden olur (Şekil 7.10b). Malzeme kompozisyonu içindeki seramik fazın miktarı, iç tüpün gerilme karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemekte ve en büyük gerilme değerlerinin büyük oranlarda değişmesini sağlamaktadır.

Yapıştırıcı tabakasında, normal gerilmelerin (σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$) iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinde en büyük değerlere ulaştıkları görülmüştür (Şekil 7.10c). Bununla beraber, normal gerilme değerleri yapıştırıcı tabakasının üst yüzeyinde de dikkate değer

seviyelerdedir. Kayma gerilmesi σ_{rz} iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinde en büyük seviyelere ulaşır ve mevcut kompozisyonel gradyant değerlerinde tüm kayma gerilmesi profilleri benzerdir. En büyük von Mises gerilme σ_{eqv} değerleride iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinde medana gelmiştir. Yapıştırıcı kalınlığı boyunca kritik gerilme profilleri kompozisyonel gradyantın değişiminden etkilenmezken gerilme değerlerinin önemli oranlarda değiştiği görülmüştür. Bunun sebebi, kademelendirilmiş malzeme özelliklerinin fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl yükler altında ısıl deformasyonlarını etkilemesidir. Yapıştırıcı tabakasında en büyük gerilme değerleri lineer malzeme kompozisyonunda (n= 1.0) oluşmaktadır. Yapılan çalışmalardan lineer kompozisyonel gradyant (n= 1.0) için fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların en büyük eğriliğe sahip olduğu ve bu eğriliğin kompozisyonel gradyantın 1.0'den büyük yada küçük değerlerinde azaldığı bilinmektedir [4]. Bu nedenle, n= 1.0 için bağlantı sisteminde en büyük eğrilik oluşur ve bu en büyük eğrilik yapıştırıcı tabakasında da en yüksek gerilmelerin oluşmasına neden olur.

ii) SM-MS kompozisyonlu tüp bağlantı

Şekil 7.11'da n= 0.1 için üniform ısıl yüke maruz SM-MS bağlantı kompozisyonunun dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı kalınlığının orta yüzeyi boyunca radyal σ_{rr} ve çevresel $\sigma_{\theta\theta}$ gerilmeler ile kayma σ_{rz} ve von Mises σ_{eqv} gerilmelerinin bindirme boyunca değişimler görülmektedir. İç ve dış tüplerin kalınlıkları boyunca malzeme değişim yönleri simetrik olduğundan yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarlarındaki gerilme dağılımlarıda simetriktir (Şekil 7.11). Yapıştırıcı tabakasının alt ve üst yüzeyleri iç ve dış fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerin metalce zengin yüzeyleriyle arayüze sahiptir. Böylece, yapıştırıcı ve metal bileşenin ısıl genleşme katsayılarının birbirlerine yakın olması nedeniyle tüpler ve yapıştırıcı arayüzeyindeki gerilme süreksizliklerinin en küçük seviyelerde olduğu görülür. Radyal σ_{rr} ve çevresel $\sigma_{\theta\theta}$ gerilmeler kritik yapıştırıcı yüzeyleri boyunca benzer profillere sahiptirler. Bununla beraber, radyal gerilme σ_{rr}, yapıştırıcı yarı-kalınlığının sağ ve sol serbest uçlarında basma gerilmesi tarzında en büyük değerlere ulaşırken bindirme bölgesinin orta kısımlarında ihmal edilebilir seviyelerdedir (Şekil 7.11a). Halbuki, çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ bindirme bölgesinin orta



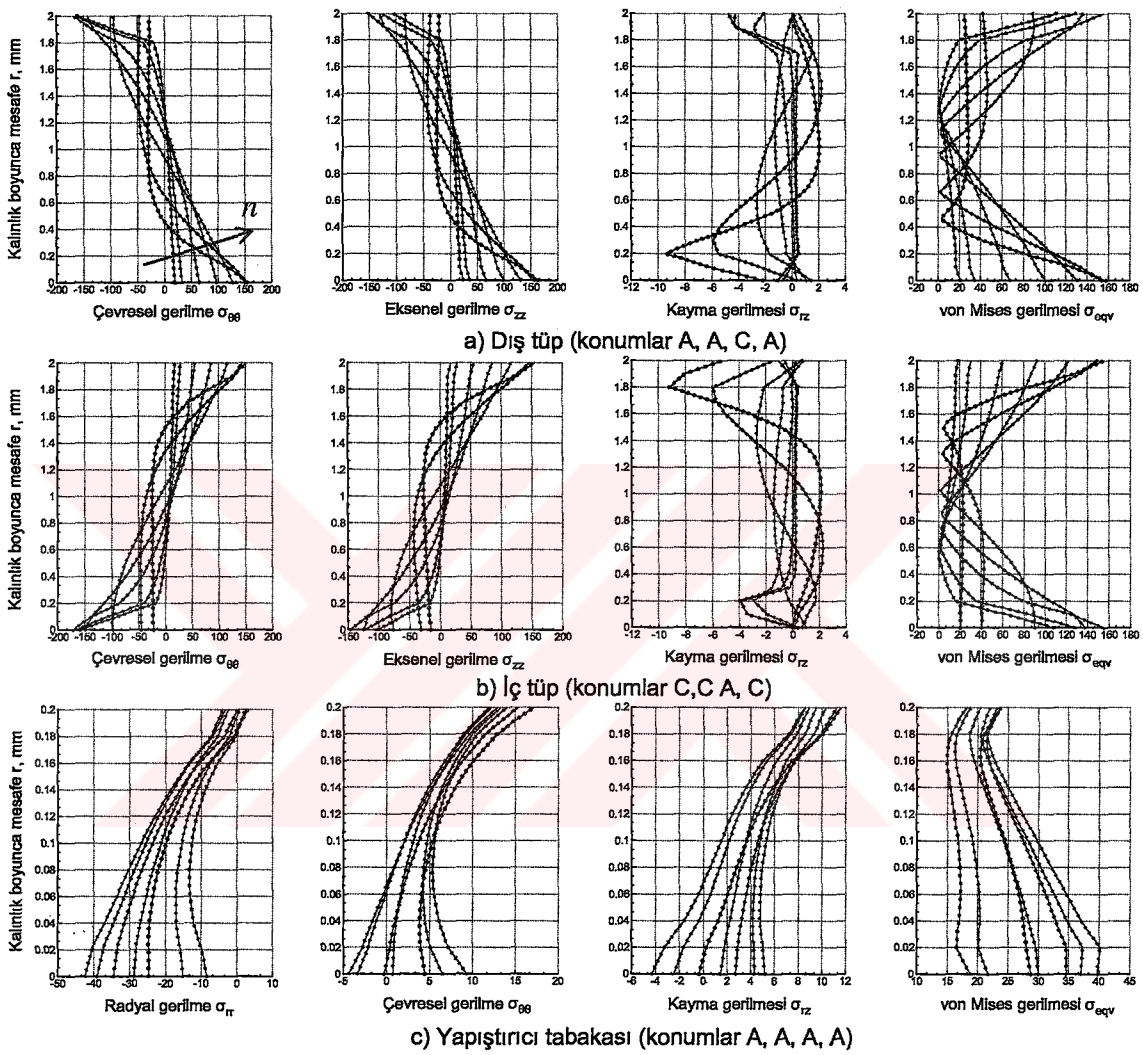
Şekil 7.11: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-I'e maruz SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları ($n = 0.1$, $k = 60$).

kısımlarında en büyük çekme gerilmesi tarzındadır (Şekil 7.11b). Kayma gerilmesi σ_{rz} iç ve dış tüp-yapıştırıcı arayüzeylerinin sağ ve sol serbest uçlarına doğru yoğunlaşmış olup dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucu ve iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda en büyük seviyelere ulaştığı görülmüştür. Kayma gerilmesi σ_{rz} yapıştırıcı tabakasının gerilme durumu üzerinde normal gerilmeler kadar etkilidir (Şekil 7.11c). En büyük von Mises σ_{eqv} gerilmeleri yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarlarında meydana gelmiştir. Bununla beraber, yapıştırıcı tabakasının orta bölgesi boyunca dikkate değer seviyelerdedir (Şekil 7.11d).

Şekil 7.12'de birinci sınır şartı (SŞ-I) için SM-MS bağlantı kompozisyonu ile fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesindeki kritik noktalarda kalınlıklar boyunca normal, kayma ve von Mises gerilmeleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisi görülmektedir. SM-MS bağlantı kompozisyonu için dış tüpün gerilme durumu SM-SM (Şekil 7.10) bağlantı kompozisyonundakinin benzeridir ve kompozisyonel gradyantın gerilmeler üzerindeki etkisi de benzerdir. Yani, SM-MS bağlantı kompozisyonunda dış tüpteki kritik gerilme profilleri ve değerlerinin değişmediği görülmüştür (Şekil 7.12a). Bağlantı kompozisyonu SM-MS iken iç tüpte, SM-SM bağlantı kompozisyonunun tersine malzeme kompozisyonu iç tüpün dış yüzeyinde metalden iç yüzeyine seramiğe değişmesi nedeniyle kalınlık boyunca kritik gerilme dağılımlarının ters döndüğü görülmüştür. Ancak, en büyük gerilme değerleri aynı kalmıştır (Şekil 7.12b). Buna ilaveten, dış tüpün metalce zengin iç yüzeyindeki gerilme değerleri ile iç tüpün metalce zengin dış yüzeyindeki gerilme değerleri birbirlerine uygun hale gelmiştir. Böylece yapıştırıcı tabakası termomekanik özellikleri kendine yakın olan her iki tüpün metal yüzeyleriyle arayüze sahip olur. Sonuçta, ısıl yükler nedeniyle oluşan tüp-yapıştırıcı arayüzeylerindeki gerilme süreksizlikleri en küçük seviyelerde olur. Yapıştırıcı tabakasında, gerilme profilleri SM-SM bağlantı kompozisyonundakilerden daha üniform değişimlere sahiptirler. En büyük radyal gerilme σ_{rr} iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinde basma tarzında oluşurken çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinde çekme tarzında en büyük olur. Kayma gerilmesi σ_{rz} dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinde dikkate değer seviyelerde en büyüktür. Gerilmeler arasındaki ayrılıklar yapıştırıcı tabakasının üst yüzeyine göre alt yüzeyi boyunca daha belirgindir (Şekil 7.12c).

iii) MS-SM kompozisyonlu tüp bağlantı

Yapıştırıcı tabakası ve tüpler arasında en küçük gerilme süreksizliklerine sahip optimum bağlantı kompozisyonunu belirlemek için yapıştırıcıyla birleştirilmiş tüp bağlantı için üçüncü bağlantı tipi olarak MS-SM bağlantı tipi kullanılmıştır. Şekil 7.13 MS-SM bağlantı tipinde $n=$ 0.1 için yapıştırıcı tabakasında belirlenmiş kritik yüzeyler boyunca radyal σ_{rr}, çevresel $\sigma_{\theta\theta}$, kayma σ_{rz} ve von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımlarını gösterir. SM-MS bağlantı kompozisyonunda olduğu gibi malzeme kompozisyon yönlerinin iç ve dış tüplerin kalınlıkları boyunca simetrik olması

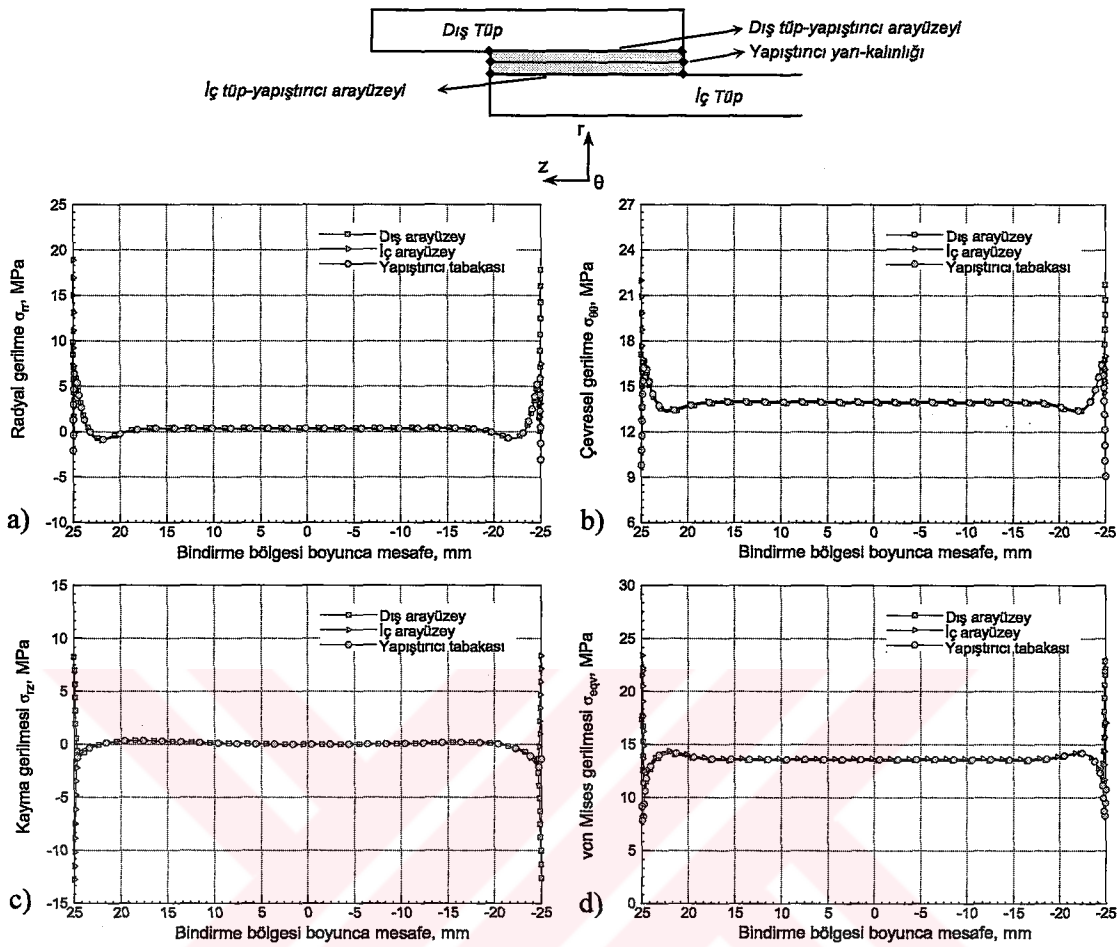


Şekil 7.12: SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa).

nedeniyle MS-SM bağlantı tipinde de yapıştırıcı tabakası boyunca gerilme dağılımları simetriktir. Ancak bu bağlantı tipinde (MS-SM) yapıştırıcı tabakasının alt ve üst yüzeyleri iç ve dış tüplerin seramikçe zengin yüzeyleriyle arayüze sahip olduğu için kritik gerilmelerin en büyük değerleri SM-MS bağlantı tipindeki en büyük gerilme değerlerine oranla daha yüksektir. Yani, en büyük radyal gerilme σ_{rr} değerleri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucunda ve dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda çekme tarzında oluşurken bindirme bölgesinin ortasında geniş bir bölgede ihmal edilebilir seviyelerdedir (Şekil 7.13a). Çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ radyal gerilmeyle aynı bölgelerde en büyük değerlerdedir, ancak farklı olarak yapıştırıcının orta bölgelerinde de dikkate değer seviyelerdedir (Şekil 7.13b). Kayma gerilmesi σ_{rz} iç ve dış tüp-yapıştırıcı arayüzeylerinin sağ ve sol serbest uçlarında yoğunlaşmış olup yapıştırıcı tabakasının gerilme durumu üzerinde de oldukça etkilidir (Şekil 7.13c). von Mises gerilmeleri σ_{eqv} yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarlarında en büyük değerlere ulaşırken yapıştırıcı orta bölgeleri boyunca da dikkate değer seviyelerdedir (Şekil 7.13d).

Kompozisyonel gradyantın yapıştırıcıyla birleştirilmiş MS-SM tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenmiş noktalarda (Şekil 7.4) kalınlıklar boyunca kritik gerilmelerdeki değişimler üzerindeki etkisi Şekil 7.14'de gösterilmiştir. MS-SM bağlantı tipinde de iç ve dış tüplerinin gerilme karakteristikleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisi SM-SM (Şekil 7.10) ve SM-MS (Şekil 7.12) bağlantı tiplerinde olduğu gibidir. MS-SM bağlantı kompozisyonunda iç ve dış tüplerin kalınlıkları boyunca kritik gerilme dağılımlarının yönleri SM-MS bağlantı kompozisyonundaki gerilme yönlerinin tam tersidir. Ancak her iki bağlantı tipinde de en büyük gerilme değerleri aynıdır. MS-SM (Şekil 7.14c) bağlantı kompozisyonu tipinin yapıştırıcı tabakasındaki gerilme profilleri ve büyüklükleri SM-SM (Şekil 7.10c) bağlantı tipindeki yapıştırıcı gerilme profilleri ve büyüklükleri ile benzerdir.

Sonuç olarak, normal gerilmeler ($\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz}) tüplerin gerilme durumları üzerinde ciddi etkilere sahiptirler ve üç bağlantı kompozisyonunda da (SM-SM, SM-MS ve MS-SM) iç ve dış tüplerin seramikçe zengin yüzeyde basma gerilmesinden metalce zengin yüzeyde çekme gerilmesine değişirler. Yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi σ_{rz} değerleri dikkate değer seviyelerdedir. Yani, fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerde

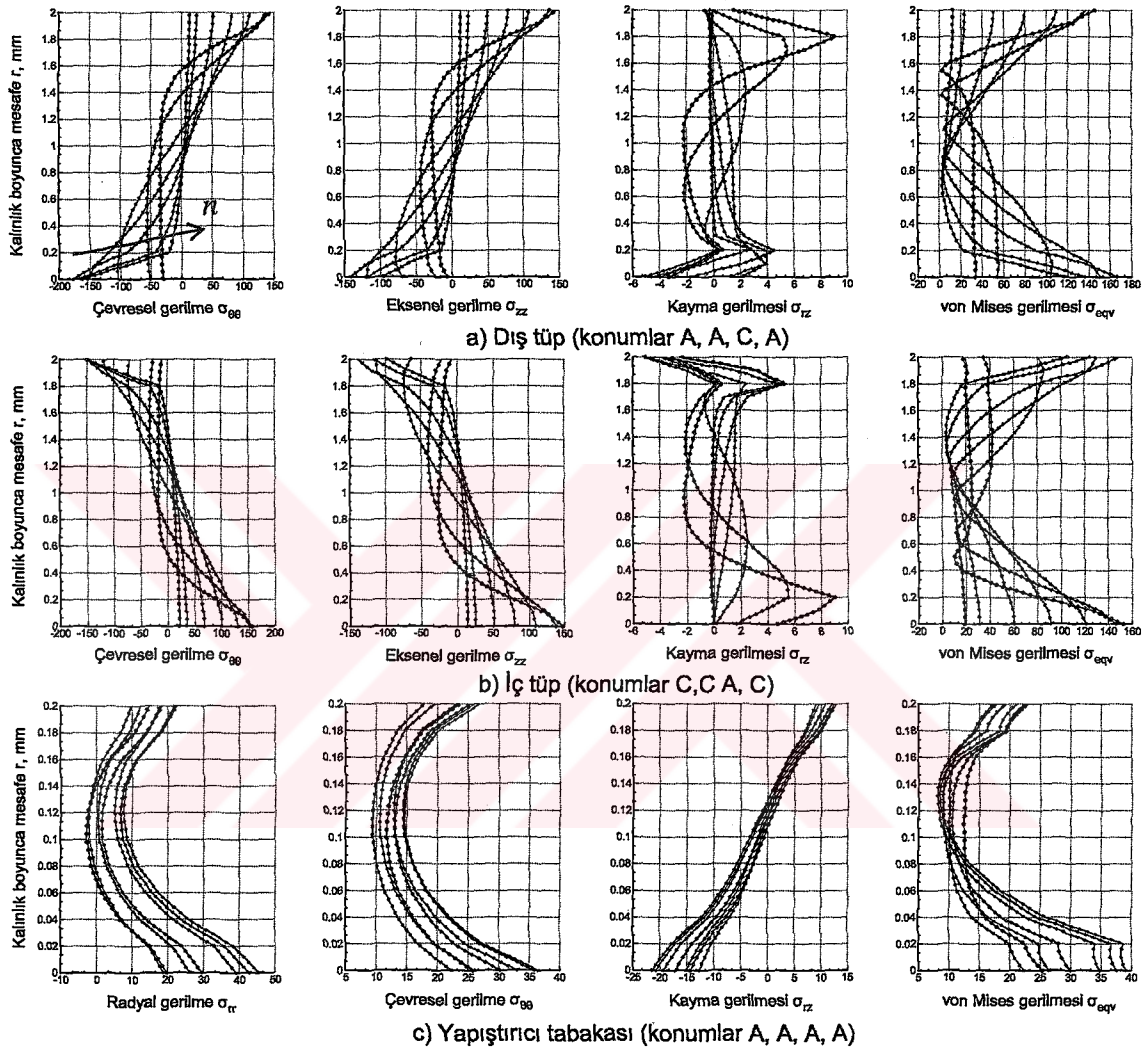


Şekil 7.13: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-I'e maruz MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60).

normal gerilmeler ($\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz}) kayma gerilmesinden (σ_{rz}) yaklaşık 20 kat daha büyük iken yapıştırıcı tabakasında bu oran 2 kattır.

7.4 Sabitlenmiş Model (SŞ-II)

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının gerilme durumu ikinci sınır şartı (SŞ-II) için de incelendi (Şekil 7.3b). Bu sınır şartında, tüp bağlantının her iki ucunun her yönde sabitlendiği ve 40°C'den 20°C'ye üniform olarak soğutulduğu kabul edilmiştir. Gerilme analizlerinden özellikle bağlantı bindirme bölgesinde yüksek gerilme gradyantları nedeniyle büyük deformasyonların

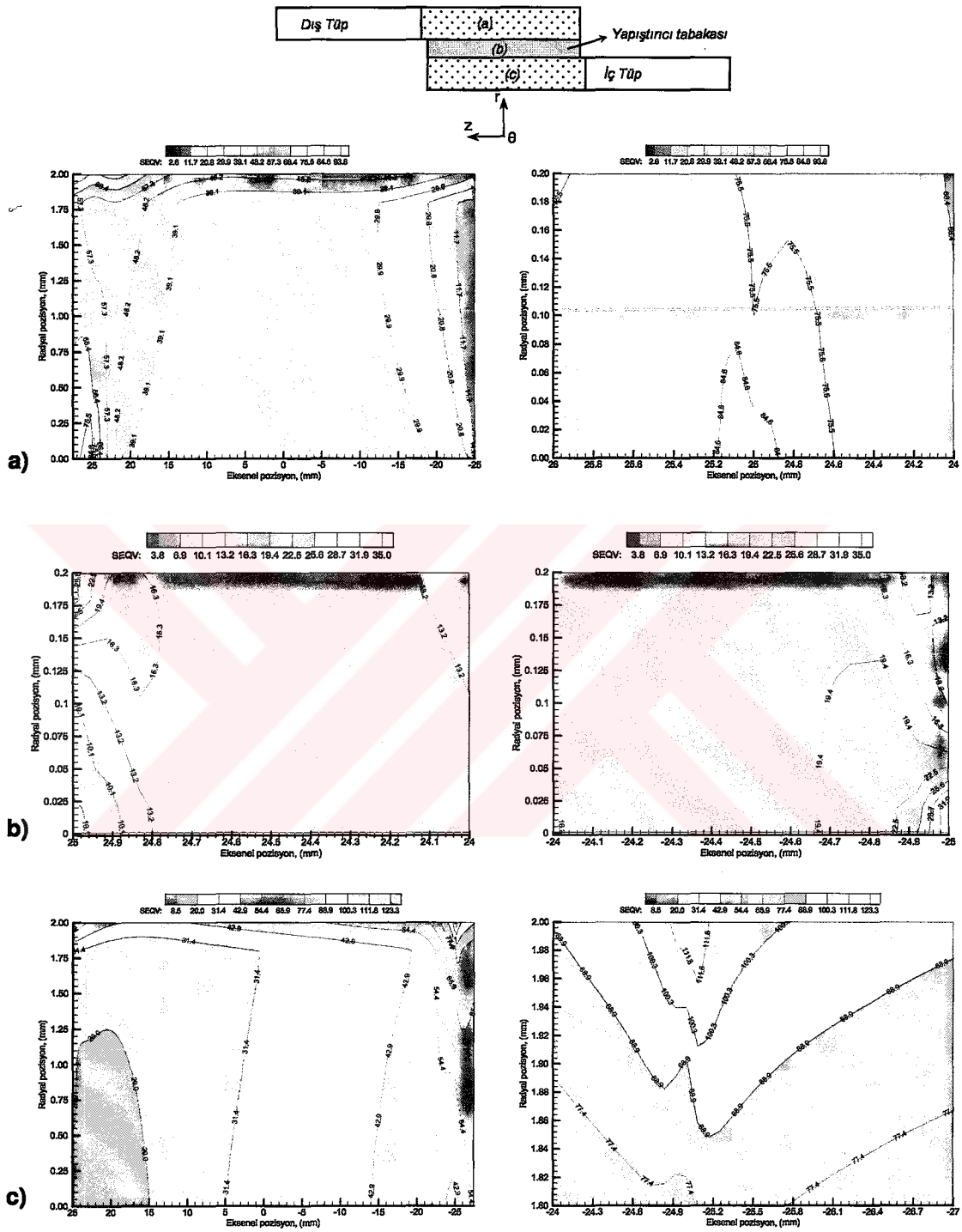


Şekil 7.14: MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-I için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa).

meydana geldiği görülmüştür (Şekil 7.3). Bu nedenle, yapıştırıcı serbest uçlarında yüksek gerilme ve şekil değiştirme yığılmaları meydana gelmiştir. Buna ilaveten, yapıştırıcı serbest uçlarına tekabül eden iç ve dış plaka bölgeleri de ciddi gerilme yığılmalarına maruzdur. Öncelikle, yapıştırıcıyla birleştirilmiş tüp bağlantının kompozisyonel gradyant $n=$ 0.1 için SM-SM bağlantı kompozisyonunda ısıl gerilme analizleri yapıldı. Daha sonra, SŞ-II için malzeme kompozisyonu yönünün yapıştırıcı tüp bağlantısının gerilme durumu üzerindeki etkisini belirlemek için SM-MS ve MS-SM bağlantı kompozisyonları için analizler tekrarlandı. İç ve dış tüpler kalınlıkları boyunca 60 katman (her bir elemanda 3 katman) kullanılarak modellendiler. Analizler neticesinde iç ve dış tüplerin gerilme bileşenleri arasında normal gerilmeler ($\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz}) ve kayma gerilmesi σ_{rz} baskın gerilme bileşenleri iken yapıştırıcı tabakasında normal gerilmeler (σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$) ve kayma gerilmesi σ_{rz} baskındır.

$n=$ 0.1 için SM-SM malzeme kompozisyonuna sahip bağlantının bindirme bölgesinde iç ve dış tüpler ile yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca von Mises σ_{eqv} gerilmesi dağılımları Şekil 7.15'de görülmektedir. Dış tüpte, von Mises gerilmelerinin dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucunda yığıldığı ve burada en büyük değerlere ulaştığı görülmüştür (Şekil 7.15a). Yapıştırıcı tabakasında, von Mises gerilme yığılmalarının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucu ve iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca von Mises gerilme seviyelerinin yapıştırıcı tabakası boyunca da dikkate değer oranlarda olduğu ve en büyük gerilme değerinin iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda oluştuğu görülmüştür (Şekil 7.15b). İç tüpte, en büyük von Mises gerilmeleri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda oluşur ve burası iç tüpün en kritik bölgesidir (Şekil 7.15c). von Mises gerilme yığılmaları iç tüpün seramikçe zengin üst yüzeyinde meydana gelirken dış tüpün metalce zengin alt yüzeyinde meydana gelmiştir. Ancak, iç tüpteki en büyük von Mises gerilmesinin değeri dış tüptekinden yaklaşık olarak 1.32 kat daha büyüktür.

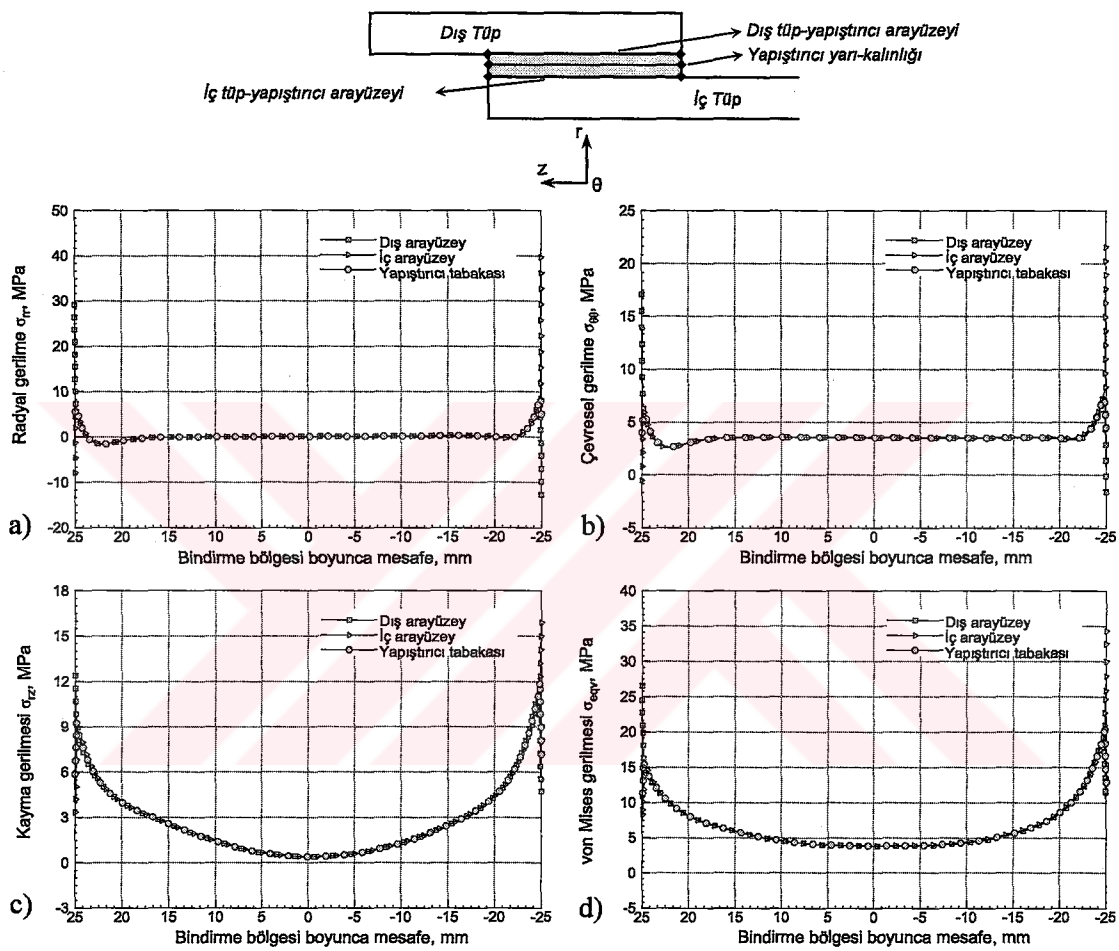
Isıl artık gerilme analizleri neticesinde yapıştırıcı tabakasının serbest kenarlarının yüksek von Mises gerilmelerine maruz kaldıkları görülmüştür. Bu gerilmeler dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest kenarında ve iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin



Şekil 7.15: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının a) dış tüp, b) yapıştırıcı tabakası ve c) iç tüp bindirme bölgelerinde artık ısıl von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları (n= 0.1, k= 60) (Tüm gerilmeler MPa).

sağ serbest kenarında en büyüktür ve bu bölgeler yapıştırıcı tabakasının en kritik bölgeleridir. Bundan dolayı, bağlantıdaki ilk hasarın bu kritik bölgelerden başlaması beklenebilir.

Serbest modelde, en büyük von Mises gerilmeleri iç ve dış tüplerin seramikçe zengin dış yüzeylerinde oluşmuş ve bu yüzeyden ani olarak azalarak metalce zengin alt yüzeylerde en küçük seviyelere inmişti. Buna ilaveten, yapıştırıcı tabakasında en büyük von Mises gerilmeleri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ ve sol serbest uçlarında meydana gelmişti (Şekil 7.5). Halbuki sabitlenmiş modelde, en büyük von Mises gerilmeleri tüpler ve yapıştırıcı tabakasının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucunda ve iç tüp-yapıştırıcı aryüzeyinin sağ serbest ucunda oluşmuşlardı (Şekil 7.15). Sonuç olarak, serbest modelde kompozisyonel gradyant n bağlantının gerilme durumu üzerinde daha etkili iken; sabitlenmiş modelde, bağlantı gerilme durumu üzerinde sınır şartı daha etkilidir. Isıl yüklere maruz yapıştırıcı bağlantısında tüpler ve yapıştırıcının ısıl ve mekanik özellikleri arasındaki farklar nedeniyle gerilme seviyeleri daha da kritik olmaktadır. SŞ-II için de benzer şekilde, dış ve iç tüp kalınlıkları boyunca sırasıyla, i) SM-SM, ii) SM-MS ve iii) MS-SM olmak üzere üç çeşit bağlantı kompozisyonu dikkate alınmıştır. Üniform sıcaklık yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının metalce zengin (n= 0.1) SM-SM malzeme kompozisyonu için belirlenmiş kritik yapıştırıcı yüzeyleri boyunca normal (σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$), kayma (σ_{rz}) von Mises (σ_{eqv}) gerilme dağılımları Şekil 7.16'de gösterilmiştir. Kritik gerilme bileşenlerinin yapıştırıcı tabakasının sağ ve sol serbest kenarları boyunca yığıldıkları görülmüştür. Radyal gerilme σ_{rr} bindirme bölgesinin ortasında geniş bir bölgede ihmal edilebilir seviyelerdedir. Dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sol serbest ucu çekme radyal gerilmelerine maruzken sağ serbest ucu nispeten daha düşük basma radyal gerilmelerine maruzdur. Bununla beraber, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi boyunca radyal gerilmenin davranışı dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyindekinin tam tersidir. En büyük radyal gerilme iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda meydana gelir (Şekil 7.16a). Çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ değeri iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda en büyük olurken bindirme bölgesinin ortalarında oldukça küçük değerlere sahiptir (Şekil 7.16b). Etkili kayma gerilmesi bileşeni σ_{rz} bindirme bölgesinin ortasından sağ

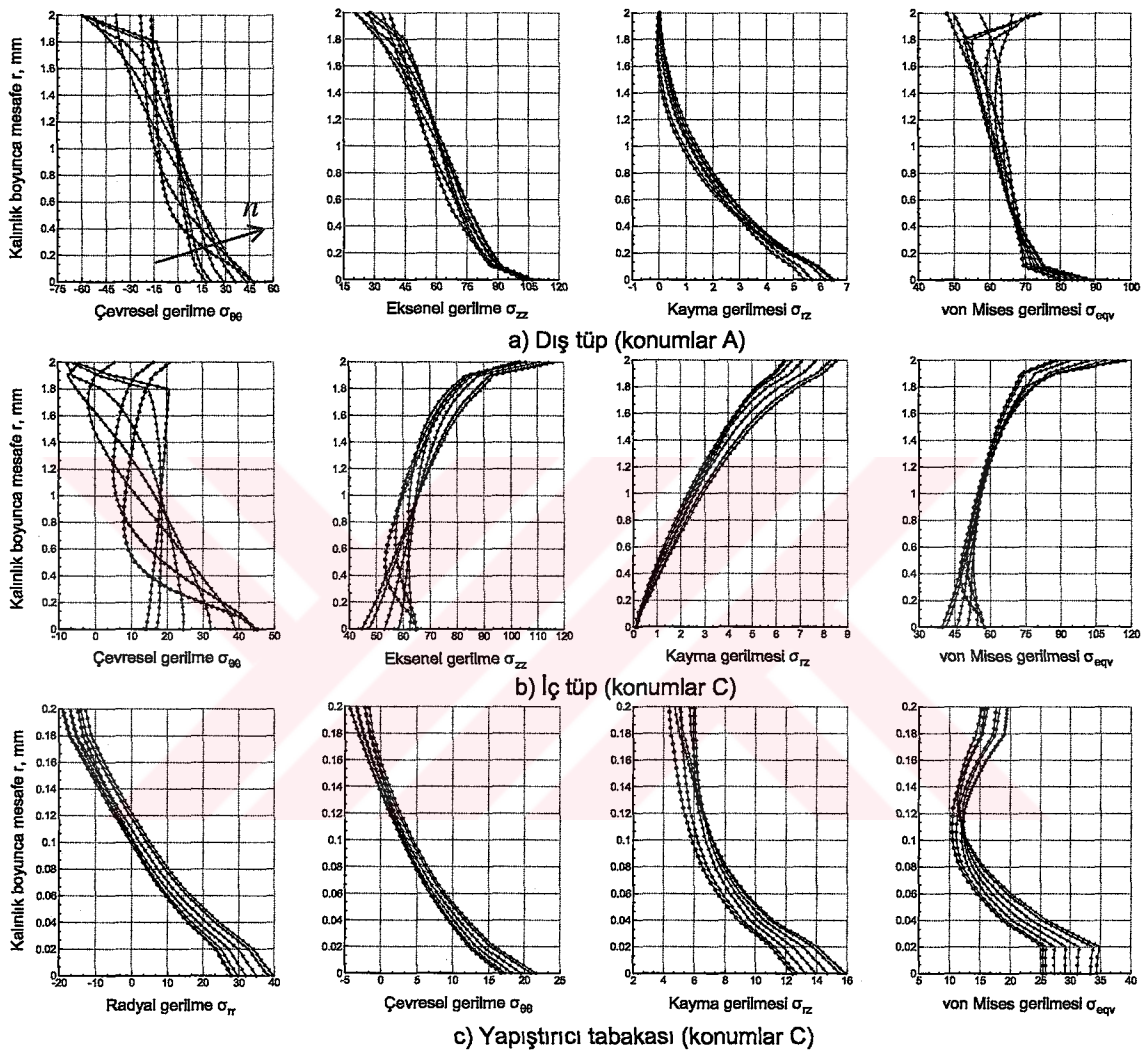


Şekil 7.16: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları ($n = 0.1$, $k = 60$).

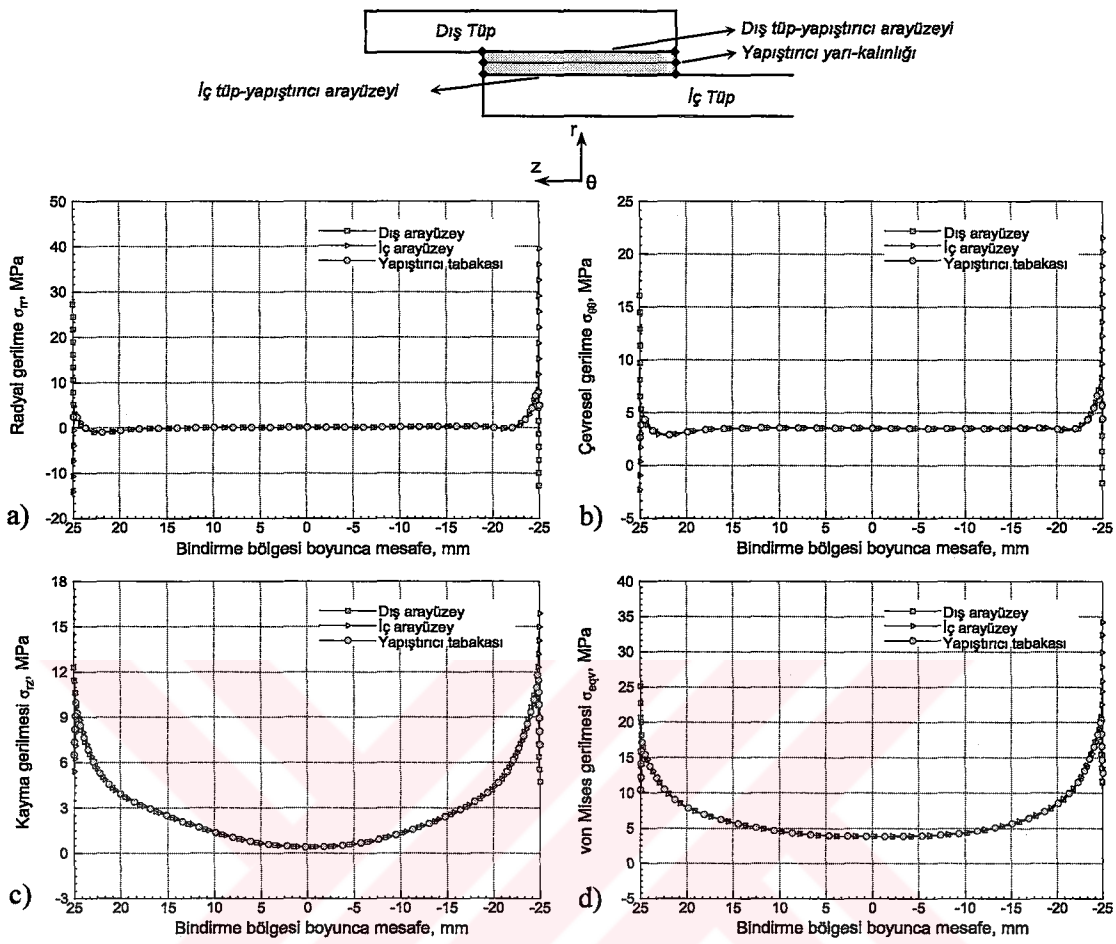
ve sol yapıştırıcı kenarlarına doğru artar ve iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda en büyük değere ulaşır (Şekil 7.16c). von Mises gerilme σ_{eqv} profili kayma gerilmesinin profiliyle benzerdir ve von Mises gerilmesi de iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucunda en büyük değerlere ulaşırken bindirme bölgesinin orta kısmında en küçük değerlere sahiptir (Şekil 7.16d). Sonuç olarak, bağlantının ikinci sınır şartı (SŞ-II) için, yapıştırıcı tabakasının en kritik bölgesi iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyinin sağ serbest ucudur. Metalce zengin ($n=$ 0.1) SM-MS ve MS-SM malzeme kompozisyonlarına sahip yapıştırıcı bağlantılarının bindirme bölgelerindeki kritik yüzeyler boyunca radyal σ_{rr}, çevresel $\sigma_{\theta\theta}$, kayma σ_{rz} ve von Mises σ_{eqv} gerilme dağılımları sırasıyla Şekil 7.18 ve 20'de gösterilmiştir. Buradan kritik gerilme profilleri ve değerlerinin SM-SM bağlantı kompozisyonundaki gerilme profilleri ve değerleriyle benzer oldukları görülür. Bunun sebebi bağlantı uç şartlarının yapıştırıcı tüp bağlantısının gerilme durumları üzerinde daha etkili olmasıdır.

SŞ-II için de yapıştırıcı bağlantısının gerilme durumu üzerinde tüplerin katman sayılarının etkileri incelendi. Kompozisyonel gradyantlar $n=$ 0.1, 1.0 ve 10.0 için yapılan analizler sonucunda iç ve dış tüpler ile yapıştırıcı tabakasının bindirme bölgelerinde belirlenen kritik noktalarda kalınlıklar boyunca normal, kayma ve von Mises gerilmelerinin değişimleri üzerinde katman sayısının etkisinin önemsiz olduğu belirlenmiştir. Gerilme değişimleri gereksiz tekrarlamalardan kaçınmak amacıyla burada gösterilmemiştir. Burada da tüplerin katman sayıları 40 olana kadar gerilme profilleri ve büyüklükleri arasında küçük değişiklikler gözlenirken, 40'dan büyük katman sayılarında bu değişimlerin neredeyse belirsiz hale geldikleri görülmüştür. SŞ-I'de, farklı katman sayılarında tüpler ve yapıştırıcı tabakasının kritik gerilmeleri arasındaki ayrılıklar SŞ-II'dekilerden daha belirgindir. Sabitlenmiş yapıştırıcı tüp bağlantısının ısıl yükler nedeniyle serbestçe uzayıp kısalamaması nedeniyle meydana gelen ısıl deformasyonlar bağlantının gerilme durumları üzerinde tüplerin katman sayılarındaki değişimlerden daha etkilidirler. Bundan dolayı, her iki sınır şartında da katman sayısı yapıştırıcı tabakası ve tüplerin gerilme ve şekil değiştirme durumları üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.

SM-SM bağlantı tipinde iç ve dış tüpler ile yapıştırıcı tabakasının gerilme durumları üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisini belirlemek için tüplerin katman sayısı

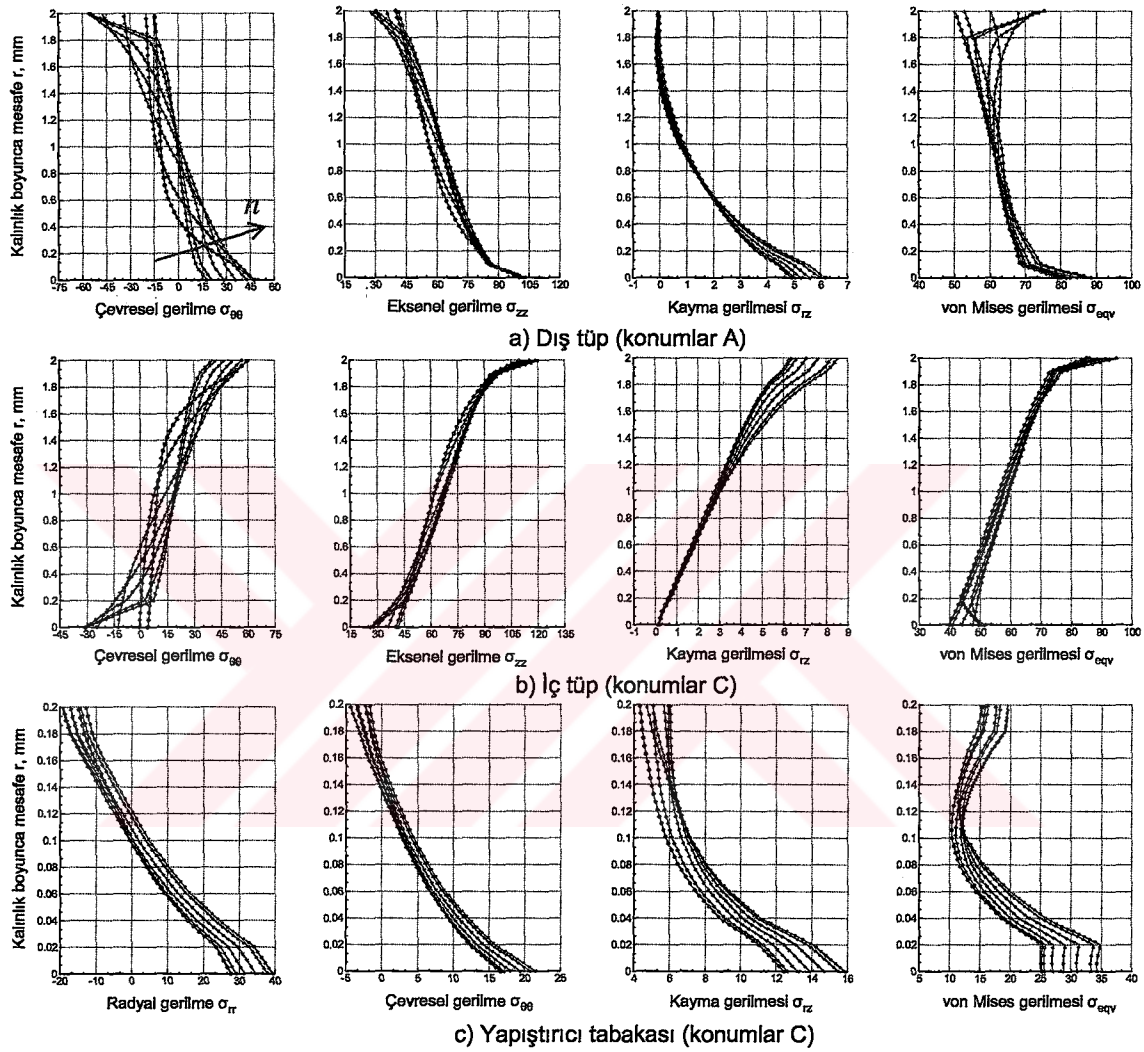


Şekil 7.17: SM-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-II için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa).

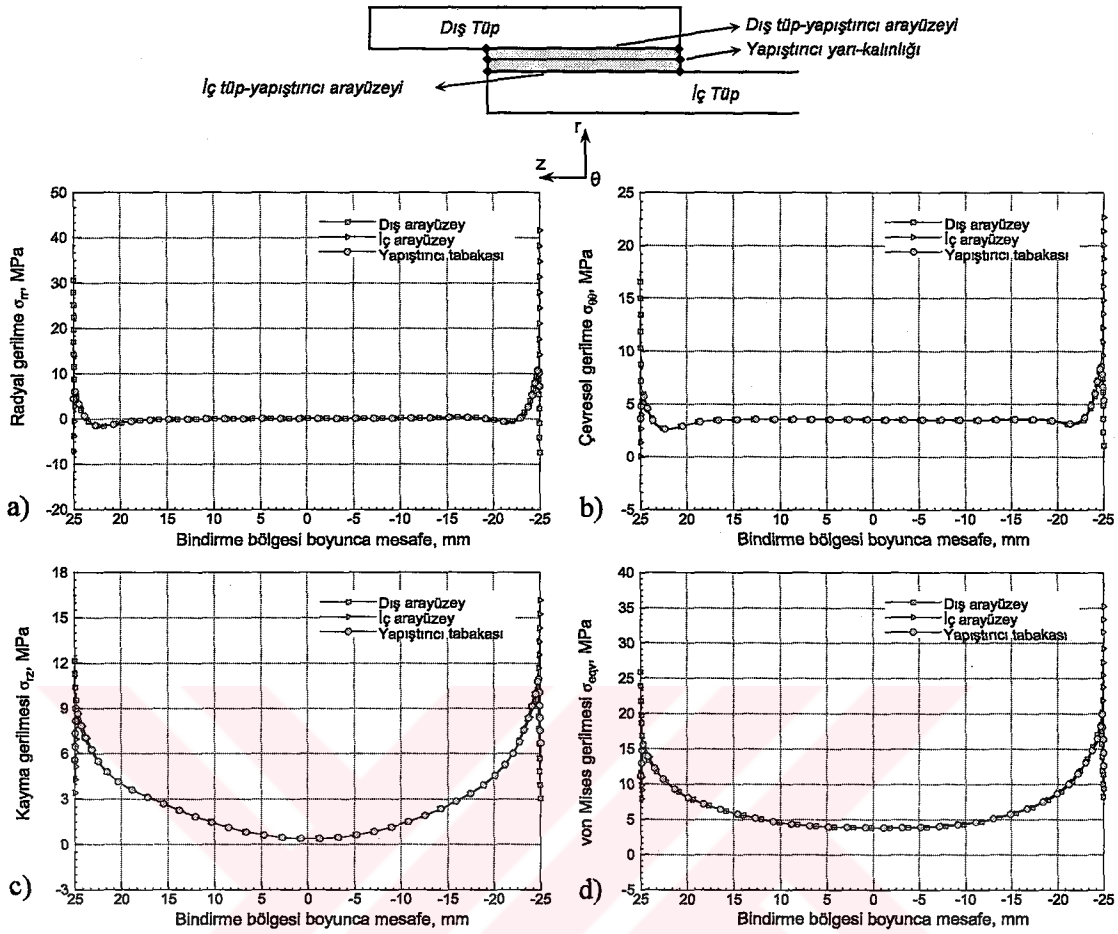


Şekil 7.18: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları ($n = 0.1$, $k = 60$).

($k = 60$) sabit tutularak kompozisyonel gradyantlar $n = 0.1$, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 ve 10.0 için analizler yapılmış ve bindirme bölgesinde belirlenen noktalarda (Şekil 7.4) kritik normal ve kayma gerilmeleri ile von Mises gerilmesinin kalınlıklar boyunca değişimleri Şekil 7.17'da gösterilmiştir. Dış tüpte, çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$'nın kalınlık boyuca profili artan kompozisyonel gradyant ile ciddi şekilde değişir. Yani, dış tüpün seramikçe zengin dış yüzeyindeki en büyük çevresel gerilmeler artan kompozisyonel gradyant ile azalırken metalce zengin iç yüzeyde artarlar. Eksenel gerilmeler σ_{zz} benzer profiller ile seramikçe zengin dış yüzeyden metalce zengin iç yüzeye doğru lineer olarak artarlar. Buna ilaveten, kompozisyonel gradyantın eksenel gerilmeler

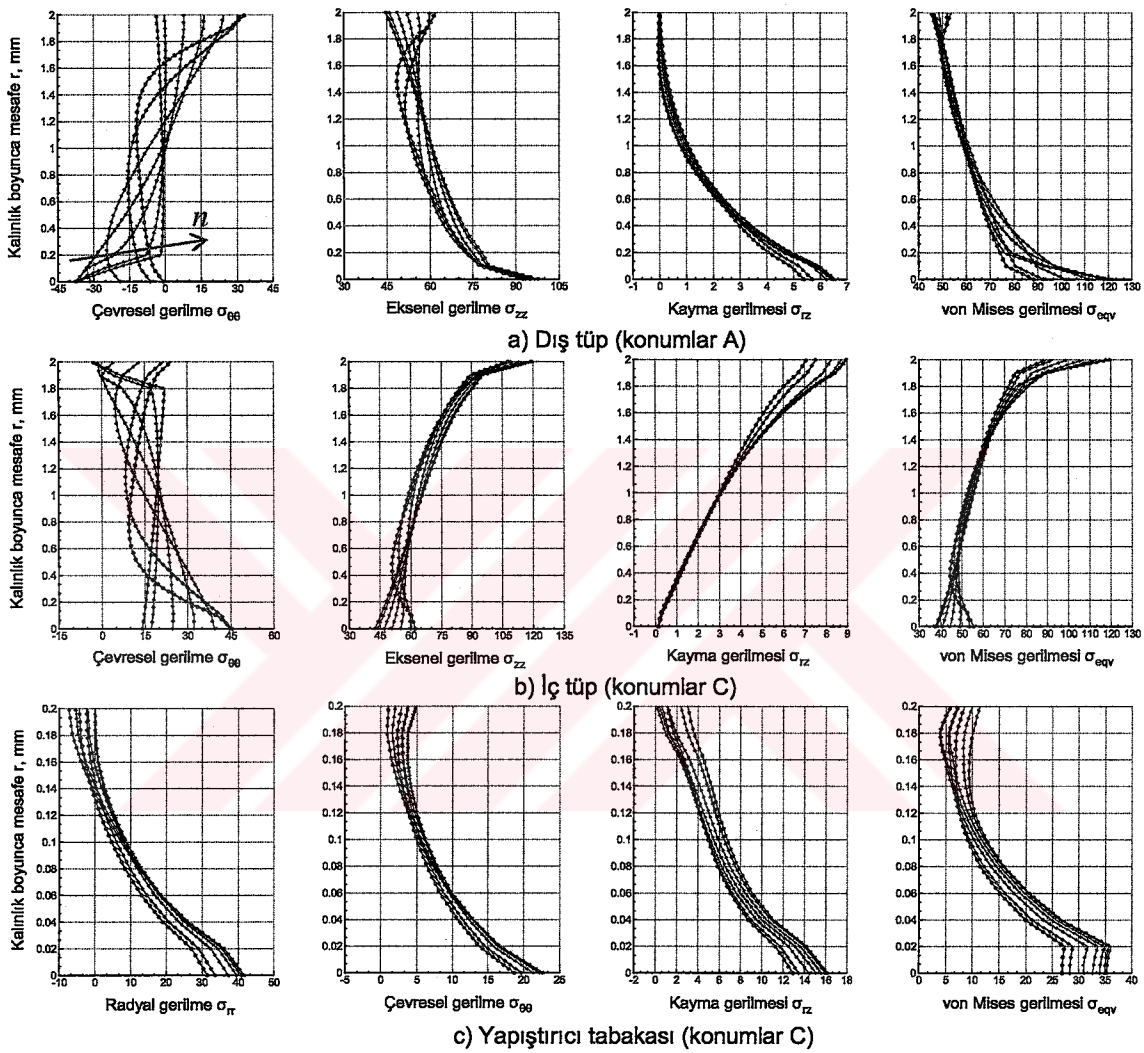


Şekil 7.19: SM-MS malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-II için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa).



Şekil 7.20: Üniform sıcaklık yüküne ve SŞ-II'ye maruz MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının dış tüp-yapıştırıcı arayüzeyi, iç tüp-yapıştırıcı arayüzeyi ve yapıştırıcı yarı-kalınlığı boyunca artık ısıl a) radyal gerilme σ_{rr}, b) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$, c) kayma gerilmesi σ_{rz} ve d) von Mises gerilmesi σ_{eqv} dağılımları (n= 0.1, k= 60).

üzerindeki etkisi oldukça küçüktür. Kayma gerilmesi σ_{rz} normal gerilmelere göre ihmal edilebilir seviyelerdedir, ve seramikçe zengin dış yüzeyden metalce zengin iç yüzeye doğru artar. Kompozisyonel gradyantın kayma gerilmesi profilleri ve değerleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı görülür. von Mises σ_{eqv} gerilmeleri normal gerilme bileşenlerinden ciddi şekilde etkilenirler. Bu nedenle, artan kompozisyonel gradyant ile von Mises gerilme değerleri seramikçe zengin dış yüzeyde önemli ölçüde azalırken metalce zengin iç yüzeyde gerilme değerleri hemen hemen aynı kalır (Şekil 7.17a). İç tüpte, çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ kompozisyonel gradyanttan ciddi şekilde etkilenir. Yani, artan kompozisyonel gradyant ile metalce zengin iç yüzeydeki çevresel gerilme değerleri artar. Eksenel gerilmeler σ_{zz} metalce zengin iç yüzeyden



Şekil 7.21: MS-SM malzeme komposizyonuna sahip yapıştırıcı ile birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının bindirme bölgesinde belirlenen kritik noktalarda (Şekil 7.4'e bak) SŞ-II için a) dış tüp, b) iç tüp ve c) yapıştırıcı tabakası kalınlıkları boyunca artık ısıl normal, kayma ve von Mises gerilme dağılımları üzerinde komposizyonel gradyantın n etkisi. (katman sayısı $k = 60$) (Tüm gerilmeler MPa).

seramikçe zengin dış yüzeye doğru artar. Artan kompozisyonel gradyant değeri ile eksenel gerilme değerlerinin metalce zengin iç yüzeyde arttığı görülürken seramikçe zengin dış yüzeyde gerilme değerlerinin hemen hemen çakışık oldukları görülür. Kayma gerilmesi σ_{rz} değerleri metalce zengin iç yüzeyde tüm kompozisyonel gadyant değerleri için sıfır iken seramikçe zengin dış yüzeye doğru lineer olarak artarlar. Kayma gerilmesi değerleri arasındaki ayrılıklar seramikçe zengin dış yüzeyde belirgin olarak gözlenebilir ve burada artan kompozisyonel gradyant ile gerilme değerlerinin azaldığı görülür. En büyük von Mises gerilme değerleri iç tüpün seramikçe zengin dış yüzeyinde meydana gelir ve kompozisyonel gradyanttaki artış seramikçe zengin dış yüzeyde von Mises gerilme değerlerinin azalmasına neden olurken metalce zengin iç yüzeyde azda olsa artmasına neden olur (Şekil 7.17b). Yapıştırıcı tabakasında, tüm kritik gerilme bileşenleri üst yüzeyden alt yüzeye doğru artarlar ve alt yüzeyde en büyük değerlere ulaşırlar. En büyük gerilme değerleri artan kompozisyonel gradyant ile azalırlar (Şekil 7.17c). SM-MS ve MS-SM malzeme kompozisyonlarına sahip yapıştırıcı tüp bağlantısının bindirme bölgesindeki kritik noktalarda kalınlıklar boyunca gerilme değişimleri üzerinde kompozisyonel gradyantın etkisi sırasıyla Şekil 7.19 ve 21'de gösterilmiştir. Tüplerin ve yapıştırıcı tabakasının kalınlıkları boyunca çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ haricinde tüm gerilme profillerindeki değişimler SM-SM bağlantı kompozisyonundaki gerilme profilleriyle benzerdir. Yani, kompozisyonel gradyant arttıkça üç bağlantı kompozisyonunda da (SM-SM, SM-MS ve MS-SM) çevresel gerilme $\sigma_{\theta\theta}$ profilleri seramikçe zengin yüzeyde basma gerilmesinden metalce zengin yüzeyde çekme gerilmesine değişirler. Analizler sonucunda elde edilen gerilme profilleri ve büyüklükleri serbest modeldeki gerilmeler (Şekil 7.10,12,14) ile karşılaştırıldığında iç ve dış tüplerin uç şartlarının bağlantının gerilme durumu üzerinde daha baskın oldukları görülür.

7.5 Sonuçlar

Üniform sıcaklık yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş (Ni–Al_2O_3) tüp bağlantıların iki farklı sınır şartı için üç boyutlu ısıl artık gerilme analizleri yapıldı. Aşağıdaki sonuçlara varıldı:

i) Fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantının iç ve dış tüplerinde normal

gerilmeler $\sigma_{\theta\theta}$, σ_{zz} ve kayma gerilmesi σ_{rz} bileşenleri baskın iken yapıştırıcı tabakasında normal gerilmeler (σ_{rr}, $\sigma_{\theta\theta}$) ve kayma gerilmesi σ_{rz} bileşenleri baskındır.

ii) Tüp bağlantılarda yapıştırıcı tabakasının serbest kenarları yüksek gerilmelere maruzdur ve özellikle yapıştırıcı-plaka arayüzeylerinde gerilmeler en büyük değerlere ulaşır. Bu nedenle, bu bölgeler yapıştırıcı bağlantısının en kritik bölgeleridir.

iii) Serbest haldeki tüp bağlantıların gerilme durumları üzerinde malzeme kompozisyonundaki değişim etkili iken sabitlenmiş haldeki bağlantılarda uç şartları daha etkilidir. Yani, serbest modellerde kompozisyonel gradyant arttıkça seramikçe zengin yüzeylerdeki basma normal gerilmeleri azalırken metalce zengin yüzeylerdeki çekme normal gerilmeleri artar. Sabitlenmiş modellerde ise artan kompozisyonel gradyant ile gerilme seviyeleri azalır.

iv) Tüp bağlantıların serbest uç şartlarında, yapıştırıcı tabakaları boyunca kritik gerilme profillerinin kompozisyonel gradyantın değişiminden etkilenmediği görülürken gerilme değerlerinin önemli oranlarda değiştiği görülmüştür. Yapıştırıcı tabakalarında en büyük gerilme değerleri lineer malzeme kompozisyonunda ($n=$ 1.0) oluşmuştur. Bunun sebebi lineer kompozisyonel gradyant ($n=$ 1.0) için fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların en büyük eğriliğe sahip olmalarıdır. Sabit uç şartlarında ise artan kompozisyonel gradyant ile yapıştırıcı tabakalarındaki kritik gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.

v) Tüp bağlantıda, tüpler ve yapıştırıcı arayüzeyleri arasında gerilme süreksizliklerinin en küçük olduğu bağlantı tipini tespit edebilmek amacıyla üç farklı (SM-SM, SM-MS ve MS-SM) yöne bağlı malzeme kompozisyonuna sahip tüpler için yapılan analizler sonucunda; SM-MS malzeme kompozisyonuna sahip bağlantı tipinde dış tüpün metalce zengin iç yüzeyindeki gerilme değerleri ile iç tüpün metalce zengin dış yüzeyindeki gerilme değerlerinin birbirlerine uygun oldukları ve yapıştırıcı tabakasının termo-mekanik özellikleri kendine yakın olan her iki tüpün metal yüzeyleriyle arayüze sahip olması nedeniyle de bu arayüzeylerde en küçük gerilme süreksizliklerinin oluştuğu görülmüştür.

vi) Fonksiyonel kademelendirilmiş tüplerin katman sayılarındaki artışların kritik gerilme profilleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı, fakat belirli katman sayılarına kadar gerilme seviyeleri arasında farklılıklar olduğu görülmüştür.

vii) Kademelendirilmiş malzeme özelliklerinin fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların ısıl yüklere olan tepkilerini önemli ölçüde etkilemeleri nedeniyle kompozisyonel gradyant n bağlantıların gerilme profilleri ve değerleri üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Çok katmanlı ve fonksiyonel kademelendirilmiş plakalarda ısıl artık gerilme analizlerinin yapıldığı bu tez çalışmasında FGM'lerin uygulaması olarak da yapısal ve ısıl yüklere maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş fonksiyonel kademelendirilmiş bindirme bağlantıların üç boyutlu elastik gerilme analizleri yapıldı ve aşağıdaki sonuçlar elde edildi:

i) Fonksiyonel kademelendirilmiş plakaların gerilme analizlerinin üç boyutlu incelenmesiyle plakalardaki Poisson tesirlerinin gerilme durumu üzerindeki etkili olduğu görüldü.

ii) Farklı sıcaklık yüklerine maruz fonksiyonel kademelendirilmiş plakanın üç boyutlu ısıl artık gerilme analizinde plakaların metalce zengin kompozisyonlarında ($n < 1.0$) en yüksek normal gerilmeler plakanın seramikçe zengin yüzeyinde basma gerilmesi tarzında meydana gelirken, seramikçe zengin malzeme kompozisyonlarında ($n > 1.0$) en yüksek gerilmeler metalce zengin yüzeyde çekme gerilmesi tarzında oluşmaktadır. En büyük plaka eğriliği ise lineer malzeme kompozisyonunda ($n = 1.0$) gözlenmiştir.

iii) Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin uygulaması olarak; fonksiyonel kademelendirilmiş yapıştırıcı bağlantılarının farklı plaka uç şartlarında yapısal ve ısıl yükler altındaki gerilme davranışları incelendi ve yükleme şartlarının gerilmelere olan etkileri araştırıldı. Buna göre bağlantıların gerilme durumları üzerinde, yapısal yüklemelerde yükleme ve sınır şartlarının daha baskın

oldukları görülürken, ısıl yüklemelerde malzeme kompozisyonu ve katman sayısı gibi parametrelerin daha etkili oldukları tespit edilmiştir.

iv) Tek bindirme ve tüp bağlantıların en zayıf bölgesi olan yapıştırıcı tabakasındaki gerilmelerin plakaların lineer malzeme kompozisyonunda ($n=$ 1.0) meydana geldiği gözlendi. Bunun nedeni, Bölüm 4'de yapılan fonksiyonel kademelendirilmiş plaka analizlerinde de belirtilen ve $n=$ 1.0 iken plaka eğriliklerinin en yüksek olmasıdır.

v) Fonksiyonel kademelendirilmiş tüp bağlantıların ısıl artık gerilme analizlerinde plaka ve yapıştırıcı tabakası arasındaki gerilme süreksizliklerinin en küçük olduğu bağlantı kompozisyonu araştırıldı. Yapılan analizlerde, yapıştırıcı tabakasının termo-mekanik özelliklerine yakın olan metal malzemelerin yapıştırıcı tarafında seramik malzemenin ise plaka kalınlığının diğer tarafında kullanılmasıyla arayüzeydeki gerilme süreksizliklerinin en küçük seviyelerde olduğu tespit edildi.

8.2 Öneriler

i) Yüksek sıcaklık ortamlarında kullanılan çok katmanlı plakaların malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca katmandan katmana kademeli olarak değişmesi nedeniyle katmanların arayüzeylerinde gerilme süreksizliklerinin olduğu görülmüştür. Bu gerilme süreksizlikleri plaka kalınlığı boyunca malzeme kompozisyonunun sürekli olarak değiştiği fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler kullanılarak azaltılabilir.

ii) Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin geometrik lineer olmayan ve lineer olmayan malzeme davranışlarının gerilme durumları üzerindeki etkileri şu ana kadar ki çalışmalarda dikkate alınmamış olup, takip eden araştırmaların ana konusu olabilir.

iii) Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemeler yüksek sıcaklıklarda üretilirler. Bu nedenle, üretimleri esnasında ısıl artık gerilmelere maruz kalırlar. Bu ısıl artık gerilmelerin, bu malzemelerin kullanılmaları esnasında oluşacak gerilmelere katkısının ne olacağı yeni bir araştırma konusu olabilir.

iv) Fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretilebilmeleri ve üretildikten sona ısıl artık gerilmelerin tespitini sağlayacak ölçüm sistemleri yüksek teknoloji gerektirmektedir. Bu ise oldukça yüksek maliyetlere ulaşmaktadır. Maddi olanaksızlıklar nedeniyle tez çalışması teorik olarak yürütülmüştür. Ancak yeterli maddi imkan sağlandığı takdirde fonksiyonel kademelendirilmiş malzemelerin üretimi yapılarak kullanımları esnasında oluşabilecek ısıl artık gerilmelerin tespiti deneysel olarak da yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Lee, Y.D. ve Erdogan. F., Residual Thermal Stresses in FGM and Laminated Thermal Barrier Coatings, International Journal of Fracture, 69(2), 145-165, 1994.

[2] Suresh, S. ve Mortensen, A., Fundamentals of Functionally Graded Materials, The University Press Cambridge, 1997.

[3] Koizumi, M., The Concept of FGM, Ceramic Transaction: Functionally Gradient Materials, 34, 3-10, 1993.

[4] Shaw, L.L., Thermal Residual Stresses in Plates and Coatings Composed of Multi-layered and Functionally Graded Materials, Composites Part B: Engineering, 29, 199-210, 1998.

[5] Reddy, J.N., Analysis of Functionally Graded Plates, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 47, 663-684, 2000.

[6] Noda, N., Thermal Stresses in Functionally Graded Materials, Journal of Thermal Stresses, 22, 477-512, 1999.

[7] Shabana, Y.M. ve Noda, N., Thermo-elasto-plastic Stresses in Functionally Graded Materials Subjected to Thermal Loading Taking Residual Stresses of the Fabrication Process into Consideration, Composites Part B: Engineering, 32, 111-121, 2001.

[8] Becker, T.L., Cannon, R.M. ve Ritchie, R.O., An Approximate Method for Residual Stress Calculation in Functionally Graded Materials, Mechanics of Materials, 32, 85-97, 2000.

[9] Ravichandran, K.S., Thermal Residual Stresses in a Functionally Graded Material System, Materials Science and Engineering A, 201, 269-276, 1995.

[10] Bruck, H.A., A One-dimensional Model for Designing Functionally Graded Materials to Manage Stress Waves, Int. Jour. of Solids and Structures, 37, 6383-6395, 2000.

[11] Jin, G. ve Awaji, H., Residual Thermal Stresses in Multilayered Functionally Graded Material Plates, Japanese Society of Materials Science, 51(6), 628-632, 2003.

[12] Ootao, Y., Tanigawa, Y. ve Nakamura, T., Optimization of Material Composition of FGM Hollow Circular Cylinder under Thermal Loading: A Neural Network Approach, Composites Part B: Engineering, 30, 415-422, 1999.

[13] Ootao, Y., Tanigawa, Y. ve Ishımaru, O., Optimization of Material Composition of Functionally Graded Plate for Thermal Stress Relaxation Using A Genetic Algorithm, Journal of Thermal Stresses, 23, 257-271, 2000.

[14] Ootao, Y. ve Tanigawa, Y., Transient Thermoelastic Problem of Functionally Graded Thick Strip Due to Nonuniform Heat Supply, Composite Structures, 63, 139-146, 2004.

[15] Zimmerman, R.W. ve Lutz, M.P., Thermal Stresses and Thermal Expansion in a Uniformly Heated Functionally Graded Cylinder, Journal of Thermal Stresses, 22, 177-188, 1999.

[16] Jabbari, M., Sohrabpour, S. ve Eslami, M.R., Mechanical and Thermal Stresses in a Functionally Graded Hollow Cylinder Due to Radially Symmetric Loads, Int. Jour. of Pressure Vessels and Piping, 79, 493-497, 2002.

[17] Obata, Y., Takeuchi, K., Kawazoe, M. ve Kanayama, K., Two-dimensional Unsteady Thermal Stresses in an FGM Plate with Material Properties of Wood, Proceedings of the 5th International Congress on Thermal Stresses and Related Topics, TS2003, 8-11 June 2003, Blacksburg, VA, USA.

[18] Kim, K.S. ve Noda, N., Green's Function Approach to Three-dimensional Heat Conduction Equation of Functionally Graded Materials, Journal of Thermal Stresses, 24, 457-477, 2001.

[19] Khor, K.A. ve Gu, Y.W., Effects of Residual Stress on the Performance of Plasma Sprayed Functionally Graded $ZrO_2/NiCoCrAlY$ Coatings, Materials Science and Engineering A, 277, 64-76, 2000.

[20] Lidong, T. ve Wenchao, L., Residual Stress Analysis of Ti–ZrO_2 Thermal Barrier Graded Materials, Materials and Design, 23, 627-632, 2002.

[21] Polat, A., Sarikaya, O. ve Celik, E., Effects of Porosity on Thermal Loadings of Functionally Graded Y_2O_3–$ZrO_2/NiCoCrAlY$ Coatings, Materials and Design, 23, 641-644, 2002.

[22] Sarikaya, O. ve Celik, E., Effects of Residual Stress on Thickness and Interlayer of Thermal Barrier Ceramic MgO–ZrO_2 Coatings on Ni and AlSi Substrates using Finite Element Method, Materials and Design, 23, 645-650, 2002.

[23] Yang, Z.M., Zhou, Z.G. ve Zhang, L.M., Characteristics of Residual Stress in Mo-Ti Functionally Graded Material with a Continuous Change of Composition, Materials Science and Engineering A, 358, 214-218, 2003.

[24] Bruck, H.A. ve Gershon, A.L., Three-dimensional Effects near the Interface in a Functionally Graded Ni–Al_2O_3 Plate Specimen, Int. Jour. of Solids and Structures, 39, 537-557, 2002.

[25] Na, K.S. ve Kim, J.H., Three-dimensional Thermal Buckling Analysis of Functionally Graded Materials, Composites Part B: Engineering, 35, 429-437, 2004.

[26] Sankar, B.V., An Elasticity Solution for Functionally Graded Beams, Composites Science and Technology, 61, 689-696, 2001.

[27] Dao, M., Gu, P., Maewal, A. ve Asaro, R.J., A Micromechanical Study of Residual Stresses in Functionally Graded Materials, Acta Material, 45(8), 3265-3276, 1997.

[28] Ueda, S. ve Gasik, M., Thermal-elasto-plastic Analysis of W-Cu Functionally Graded Materials Subjected to a Uniform Heat Flow by Micromechanical Model, Journal of Thermal Stresses, 23, 395-409, 2000.

[29] Ueda, S., Thermoelastic Analysis of W-Cu Functionally Graded Materials Subjected to a Thermal Shock using a Micromechanical Model, Journal of Thermal Stresses, 24, 19-46, 2001.

[30] Ueda, S., Elastoplastic Analysis of W-Cu Functionally Graded Materials Subjected to a Thermal Shock by Micromechanical Model, Journal of Thermal Stresses, 24, 631-649, 2001.

[31] Shabana, Y.M. ve Noda, N., Combined Macroscopic and Microscopic Analysis of Thermoelastoplastic Stresses of a Functionally Graded Material Plate, Journal of Thermal Stresses, 24, 799-815, 2001.

[32] Tsukamoto, H., Analytical Method of Inelastic Thermal Stresses in a Functionally Graded Material Plate by a Combination of Micro- and Macro-mechanical Approaches, Composites Part B: Engineering, 34, 561-568, 2003.

[33] Nemat-Alla, M., Reduction of Thermal Stresses by Developing Two-dimensional Functionally Graded Materials, Int. Jour. of Solids and Structures, 40, 7339-7356, 2003.

[34] Cheng, Z.Q. ve Batra, R.C., Three-dimensional Thermoelastic Deformations of a Functionally Graded Elliptic Plate, Composites Part B: Engineering, 31, 97-106, 2000.

[35] Reddy, J.N. ve Cheng, Z.Q., Three-dimensional Thermomechanical Deformations of Functionally Graded Rectangular Plates, Eur. J. Mech. A/Solids, 20, 841-855, 2001.

[36] Cho, J.R. and Oden, J.T., Functionally Graded Material: A Parametric Study on Thermal-Stress Characteristics Using the Crank-Nicolson-Galerkin Scheme, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 188, 17-38, 2000.

[37] Pitakthapanaphong, S. ve Busso, E.P., Self-consistent Elastoplastic Stress Solutions for Functionally Graded Material Systems Subjected to Thermal Transients, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 50, 695-716, 2002.

[38] Vel, S.S. ve Batra, R.C., Three-dimensional Analysis of Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Plates, Int. Jour. of Solids and Structures, 40, 7181-7196, 2003.

[39] Li, L.X. ve Wang, T.J., A Unified Approach to Predict Overall Properties of Composite Materials, Materials Characterization, basımda, 2004.

[40] Javaheri, R. ve Eslami, M.R., Buckling of Functionally Graded Plates under In-plane Compressive Loading, Z. Angew. Math. Mech., 82, 277-283, 2002.

[41] Shen, H. S., Postbuckling Analysis of Pressure-loaded Functionally Graded Cylindrical Shells in Thermal Environments, Engineering Structures, 25, 487-497, 2003.

[42] Pradhan, S.C., Loy, C.T., Lam, K.Y. ve Reddy, J.N., Vibration Characteristics of Functionally Graded Cylindrical Shells under Various Boundary Conditions, Applied Acoustics, 61, 111-129, 2000.

[43] Yang, J. ve Shen, H.S., Dynamic Response of Initially Stressed Functionally Graded Rectangular Thin Plates, Composite Structures, 54, 497-508, 2001.

[44] Reddy, J.N., Wang, C.M. ve Kitipornchai, S., Axisymmetric Bending of Functionally Graded Circular and Annular Plates, Eur. J. Mech. A/Solids, 18, 185-199, 1999.

[45] Chakraborty, A., Gopalakrishnan, S. ve Reddy, J.N., A New Beam Finite Element for the Analysis of Functionally Graded Materials, Int. Jour. of Mechanical Sciences, 45, 519-539, 2003.

[46] Rao, B.N. ve Rahman, S., Mesh-free Analysis of Cracks in Isotropic Functionally Graded Materials, Engineering Fracture Mechanics, 70, 1-27, 2003.

[47] Cho, J.R. and Ha, D.Y., Volume Fraction Optimization for Minimizing Thermal Stress in Ni–Al_2O_3 Functionally Graded Materials, Materials Science and Engineering A, 334, 147-155, 2002.

[48] Shabana, Y.M. ve Noda, N., Parametric Study for the Optimal Design of the Functionally Graded Material Plate, Proceedings of the 5th International Congress on Thermal Stresses and Related Topics, TS2003, 8-11 June 2003, Blacksburg, VA, USA.

[49] Huang, J., Fadel, G.M., Blouin, V.Y. ve Grujicic, M., Bi-objective Optimization Design of Functionally Graded Material Materials, Materials and Design, 23, 657-666,2002.

[50] Praveen, G.N. ve Reddy, J.N., Nonlinear Transient Thermoelastic Analysis of Functionally Graded Ceramic-Metal Plates, Int. Jour. of Solids and Structures, 35, 4457-4476, 1998.

[51] Woo, J. ve Meguid, S.A., Nonlinear Analysis of Functionally Graded Plates and Shallow Shells, Int. Jour. of Solids and Structures, 38, 7409-7421, 2001.

[52] Shen, H.S., Nonlinear Bending Response of Functionally Graded Plates Subjected to Transverse Loads and in Thermal Environments, Int. Jour. of Mechanical Sciences, 44, 561-584, 2002.

[53] Yang, J. ve Shen, H.S., Non-linear Analysis of Functionally Graded Plates under Transverse and In-plane Loads, Int. Jour. of Non-linear Mechanics, 38, 467-482, 2003.

[54] Ma, L.S. ve Wang, T.J., Nonlinear Bending and Post-buckling of a Functionally Graded Circular Plate under Mechanical and Thermal Loadings, Int. Jour. of Solids and Structures, 40, 3311-3330, 2003.

[55] Drake, J.T., Williamson, R.L. and Rabin, B.H., Finite Element Analysis of Thermal Residual Stresses at Graded Ceramic-Metal Interfaces. Part II. Interface Optimisation for Residual Stress Reduction, J. Appl. Phsy., 74(2), 1321-1326, 1993.

[56] Apalak, M.K and Güneş, R., Thermal Residual Stresses in Multi-Layered Plates Subjected to Üniform, Linear and Parabolic Temperature Distributions, Thermal Stresses'2003, The Fifth International Congress on Thermal Stresses and Related Topics, Virginia, USA, TA/3/1/1-4, June 8-11, 2003.

[57] Reddy, J.N., Mechanics of Laminated Composite Plates; Theory and Analysis, CRC Press, New York, 1997.

[58] Ahmad, S., Irons, B.M. and Zienkiewicz, O.C., Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements, Int. J. of Numerical Methods in Engineering, 2, 419-451, 1970.

[59] Güneş, R. and Apalak, M.K., Investigation of Thermal Residual Stresses in Multi-Layered Plates with Different Material Combinations, UMTIK'2002, The Tenth International Conference on Machine Design and Production, Cappadocia, 361-373, September 4-6, 2002.

[60] Yunus, S.M. and Khonke, P.C., An Efficient Through-Thickness Integration Scheme in an Unlimited Layer Doubly Curved Isoparametric Composite Shell Element, Int. J. of Numerical Methods in Engineering, 28, 2777-2793, 1989.

[61] Cho, J.R. and Ha, D.Y., Averaging and Finite Element Discretization Approach in the Numerical Analysis of Functionally Graded Materials, Materials Science and Engineering A, 302, 187-196, 2001.

[62] Reiter, T., Dvorak, G.J. and Tvergaard, V., Micromechanical Models for Graded Composite Materials, J. Phys. Solids, 45, 1281-1302, 1997.

[63] Reiter, T., and Dvorak, G.J., Micromechanical Models for Graded Composite Materials II: Thermomechanical Loading, J. Phys. Solids, 46(9), 1655-1673, 1998.

[64] Grujicic, M. and Zhang, Y., Determination of Effective Elastic Properties of Functionally Graded Materials Using Voronoi Cell Finite Element Method, Materials Science and Engineering A, 251, 64-74, 1998.

[65] Tomota, Y., Kuroki, K., Mori, T. and Tamura, T., Tensile Deformation of Two-Ductile-Phase Alloys: Flow Curves of α–γ Fe–Cr–Ni Alloys, Materials Science and Engineering, 24, 85-94, 1976.

[66] Wakashima, K. and Tsukamoto, H., Mean-Field Micromechanics Model and its Application to the Analysis of Thermomechanical Behaviour of Composite Materials, Materials Science and Engineering A, 146, 291-316, 1991.

[67] Schapery, R.A., Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials, J. Comput. Materials, 2, 380-404, 1968.

[68] Levin, V.M., Thermal Expansion Coefficients of Heterogeous Materials, Mekh. Tverd. Tela, 2, 88-94, 1967.

[69] Cook, R.D., Malkus, D.V. and Plesha, M.E., Concept and Applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, Canada, 1989.

[70] Panda, S. and Natarajan, R., Analysis of Laminated Composite Shell Structures by Finite Element Method, Computers and Structures, 14, 225-230, 1981.

[71] Kumar, W.P.P. and Palaninathan, R., Finite Element Analysis of Laminated Shell with Exact Through-Thickness Integration, Computers and Structures, 63, 173-184, 1997.

ÖZGEÇMİŞ

Recep Güneş 1974 yılında Kırşehir'de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kırşehir'de tamamladı. 1995 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 1997 yılından aynı üniversitenin Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 1998 yılında Yüksek Lisans programını tamamlayıp aynı Enstitüde Doktora öğrenimine başladı. Evli olup halen Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesindeki görevine devam etmektedir.

Adres	:	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 38039 - KAYSERİ
Tel	:	0 352 437 49 01 - 32153
Faks	:	0 352 437 57 84
e-mail	:	recepg@erciyes.edu.tr