169760

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK YÖNLÜ TABAKALI KOMPOZİT TEK BİNDİRME BAĞLANTILARINDA HASAR OLUŞUMU VE GELİŞİMİ

Tezi Hazırlayan
Mak. Müh. M. Serdar GENÇ

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Z. Gül APALAK
Prof. Dr. M. Kemal APALAK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Bu tez Erciyes Üniversitesi Araştırma Fonu FBT-04-24 protokolu ile desteklenmiştir.

HAZİRAN-2005
KAYSERİ

Bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi **Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

13/06/ 2005

JÜRİ :

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Z. Gül APALAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ

ONAY :

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ..22-06-2005..tarih ve...0...9...sayılı kararı ile onaylanmıştır.

27 HAZİRAN 2005

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

Enstitü Müdürü

Mühür ve İmza

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı seçmemde ve yürütmemde bana rehberlik eden, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Yrd.Doç. Dr. Z. Gül APALAK Hanım ve Prof. Dr. M. Kemal APALAK Bey'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarım esnasında her aşamada bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği'nin değerli Öğretim Üyesi Prof. Dr. Hüseyin YAPICI Bey'e ve eşim Arş. Gör. Gamze GENÇ'e sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca deneyler için kompozit plakaların üretim aşamasında yardımcı olan Vedat BAŞTÜRK'e, çalışmalarımda bilgi ve tecrübesini esirgemeyen Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu'ndan Uzman Haluk DEMİRTAŞ ve Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Recep GÜNEŞ'e, testleri yapma aşamasında yardımcı olan Merkez Çelik A.Ş. Kalite Güvence Laboratuarı çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Erciyes Üniversitesi Rektörlüğü Araştırma Fonu'na FBT-04-24 kodlu proje desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK YÖNLÜ TABAKALI KOMPOZİT TEK BİNDİRME BAĞLANTILARINDA HASAR OLUŞUMU VE GELİŞİMİ

ÖZET

Uzay ve havacılık endüstrisinde, kompozit bağlantıların kullanımı son yıllarda hızla artmaktadır. Hafif ve yüksek mukavemetli olmaları birçok araştırmacının bu alana yönelmesine neden olmuştur. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş yapısal bağlantıları verimli tasarlamak ve yapıştırıcıyla birleştirmenin avantajlarını kullanmak için bağlantının hasar mekanizmasını doğru modellemek gerekir. Doğru ve gerçeğe yakın hasar modeli ile bağlantının taşıyabileceği en büyük yüklerin tahmin edilmesi daha verimli bir bağlantı tasarımını ortaya çıkarır.

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü tabakalı kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme ve eğme yükleri altında bindirme bölgesi civarında ilk hasar oluşumu ve bu hasarın gelişimi incelenmiştir. Kompozit bindirme bağlantılarının hasar mekanizmasını belirlemek maksadı ile çekme ve eğme deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar teorik analizler ile karşılaştırılmıştır. Hasar analizinde, sürekli ortamlar mekaniğine dayanan *meso-scale yaklaşımı* ile bir hasar modeli geliştirilmiştir ve bu model Ansys paket programı ile sonlu elemanlar metoduna tatbik edilmiştir. Bağlantının hem geometrisinden hem de bileşenlerinden doğan malzeme lineersizlikleri dikkate alınmamıştır. Yapıştırıcı ve kompozit plakalar lineer elastik özelliklere sahip kabul edilmiştir.

Hasar analizlerinde kompozit malzemelerin kırılma kriterlerinden Tsai-Wu ve Hashin kırılma kriterleri kullanılmıştır. Bu iki hasar kriteri ile 0, 15, 30, 45, 60 ve 90° lik lif açılarına sahip kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme, üç nokta eğme ve dört nokta eğme testleri sonucunda plakaların yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımlarında gerilme yığılmalarından dolayı ilk hasarın başladığı tahmin edildi. Bu kriterler ile hasarların çekme testinde alt plakada, eğme testlerinde ise üst plakada daha geniş bir bölgeye yayıldığı görüldü.

Deneysel aşamada, tek bindirme bağlantısının tek yönlü karbon liflerden ve epoksi reçineden oluşan yapışanları Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırıldı. 0, 15, 30,

45, 60 ve 90° lik tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme, üç ve dört nokta eğme testleri yapıldı. Çekme, üç ve dört nokta eğme testlerinde, çekmede 30, 45, 60 ve 90° lik tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantıları alt plakadan koparken 0 ve 15° lik bağlantılar yapıştırıcıdan koptu. Üç nokta eğme testi, 0 ve 15° lik bağlantıların yapıştırıcıdan ve 30, 45, 60 ve 90° lik bağlantıların da üst plakadan koptuğunu gösterdi. Dört nokta eğme testinde ise 45, 60 ve 90° lik bağlantılar üst plakadan koparken 0, 15 ve 30° lik bağlantılar yapıştırıcıdan kopmuştur. Hasar analizinde, bağlantıların ilk hasarı tüm testlerde plakaların yapıştırıcı serbest uçları boyunca başladı ve teorik tahminlere bağlı olarak ya yapıştırıcı içinden ya da plaka içinden gelişti. Bununla birlikte, hasar analizinde malzeme özelliğini düşürme modelinde kompozit plakaların mekanik özelliklerinin aniden düşürülmesi ve yapıştırıcı ile kompozit plakaların lineer elastik kabul edilmesi nedeniyle teorikte tahmin edilen kopma yükleri test sonuçlarındaki kopma yüklerinden düşük çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Hasar Analizi, Tabakalı Kompozit Tek Bindirme Bağlantıları, Hasar Gelişimi, Kırılma Kriteri.

INITIATION AND PROPAGATION OF DAMAGE IN ADHESIVELY BONDED UNIDIRECTIONAL LAMINATED COMPOSITE SINGLE LAP JOINTS

ABSTRACT

The use of composite joints in aerospace and aviation industry has increased rapidly in recent years. Due to lightweight and high strength, it has attracted many researchers. In order to achieve well-designed joints and to utilize the advantages of adhesively bonded structural joints, the failure mechanism of the joint must be accurately modelled. The prediction of the ultimate load that the joint can sustain as a result of an accurate and realistic damage model makes more productive joint design.

In this study, the first-ply failure and damage propagation around the overlap region of adhesively bonded unidirectional laminated composite lap joints under tension and flexural loads were investigated. The tension and bending testing of composite lap joints were carried out in order to determine the damage mechanism. The experimental results were compared with the theoretical results. In the damage analysis, a damage model was developed using the meso-scale approach based on the continuum mechanics and was implemented to the finite element method with Ansys packet program. Both geometrical and material non-linearities were not taken into account and the adhesive and the composite adherends were assumed to have linear elastic properties.

In the damage analysis, Tsai-Wu and Hashin failure criteria were used. In both failure criteria, the first damage initiation was predicted along the adhesive free-edges of the adherends due to the stress concentrations based on the tension, three and four point bending tests of unidirectional laminated composite lap joints with stacking sequences of 0, 15, 30, 45, 60 and 90°. The damage zones were found to propagate in a wide region in lower adherend in tension and in upper adherend under a bending load.

The adherends composed of unidirectional carbon fibers and epoxy resin of single lap joints were bonded using Araldite 2015 epoxy for experimental tests. The tension, three and four point bending tests of the unidirectional composite lap joints with the composite adherends having stacking sequences of 0, 15, 30, 45, 60 and 90° were performed. In the case of the tension, three and four point bending tests, the

unidirectional composite single lap joints with stacking sequence of 0 and 15° failed through the adhesive layer whereas the joints having adherends with fiber angles of 30, 45, 60 and 90° failed through the lower adherend in tension. The three point bending test showed that the unidirectional single lap joints with adherends of 0 and 15° failed through the adhesive layer and those with adherends of 30, 45, 60 and 90° failed through upper adherend. In the four point bending test, the joints with adherends of 0, 15 and 30° failed through the adhesive layer whereas the joints with adherends of 45, 60 and 90° failed through the upper adherend. In the damage analysis, the first failure of the joints initiated along the adhesive free-edges of adherends in all tests and propagated through either adherends or adhesive layer based on the theoretical predictions. However, the failure loads based on the theoretical predictions were less than in those of the tests since the mechanical properties of composite adherends decreased all at once in degradation model in the damage analysis and the adhesive and the composite adherends were assumed to have linear elastic properties.

Keywords: Damage Analysis, Laminated Composite Single Lap Joints, Damage propagation, Failure Criteria.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa No
KABUL SAYFASI		i
TEŞEKKÜR		ii
ÖZET		iii
ABSTRACT		v
İÇİNDEKİLER		vii
ŞEKİLLER LİSTESİ		x
BÖLÜM 1		
YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BİNDİRME BAĞLANTILARI		
1.1	Giriş	1
1.2	Literatür Araştırması	2
1.2.1	Bindirme Bağlantıları	2
1.2.2	Hasar Analizi	4
1.3	Araştırmanın Takdimi	9
BÖLÜM 2		
KOMPOZİT MALZEMELER MEKANİĞİ		
2.1	Giriş	11
2.2	Kompozit Malzeme	11
2.3	Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matrisler	12
2.3.1	Plastikler	12
2.4	Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları	13
2.5	Lif Takviyeli Polimerik Kompozitlerin Mekanik Analizi	15
2.5.1	Bir Katmanın (Laminenin) Mikro Mekanik Analizi	16
2.5.2	Bir Katmanın Makro Mekanik Analizi	21
2.6	Sonlu Elemanlar Formülasyonu	34
2.6.1	Çok Katmanlı 3B İzoparametrik Sekiz-Düğüm Noktalı Sonlu Eleman	35
2.6.2	Şekil Değiştirme-Yerdeğiştirme İlişkileri	35

2.6.3 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri 37
2.6.4 Rijitlik Matrisi Formülasyonu 38
2.7 Kompozit Malzemeler İçin Özel Kırılma Kriterleri 39
2.7.1 En Büyük Gerilme Teorisi 40
2.7.2 En Büyük Şekil Değiştirme Teorisi 40
2.7.3 Tsai-Wu Kriteri 40
2.7.4 Hoffman Kriteri 42
2.7.5 Tsai-Hill Kriteri 42
2.7.6 Hashin Kriteri 43

BÖLÜM 3

HASAR ANALİZİ

3.1 Giriş 44
3.2 Bağlantı Geometrisi ve Sonlu Eleman Modeli 47
3.3 Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantılarında Tsai-Wu Kırılma Kriterine Göre Hasar Oluşumu ve Gelişiminin Teorik İncelenmesi 48
3.3.1 Çekme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları 48
3.3.2 Üç Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları 58
3.3.2 Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları 65

BÖLÜM 4

HASAR ANALİZİ

4.1 Giriş 73
4.2 Hasar Modları 73
4.3 Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantılarında Hashin Kırılma Kriterine Bağlı Hasar Oluşum ve Gelişiminin Teorik İncelenmesi 75
4.3.1 Çekme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları 75
4.3.2 Üç Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları 102
4.3.2 Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları 137

BÖLÜM 5

HASARIN DENEYSEL İNCELENMESİ

5.1	Giriş	166
5.2	Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Üretimi	166
5.3	Tek Yönlü Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Çekme Deneyi Sonuçları	169
5.4	Tek Yönlü Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	176
5.5	Tek Yönlü Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Dört Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	183

BÖLÜM 6

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 191

KAYNAKLAR 194

ÖZGEÇMİŞ 199

ŞEKİLLER LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 1-1	Uygulamada kullanılan yapıştırıcı bağlantıları	2
Şekil 1-2	Çatlak başlama ve gelişme tipleri a) tip I ve b) tip II	7
Şekil 1-3	Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda farklı kırılma tipleri; a) kohezif kırılma b) ara yüzey kırılması c) salınımlı kırılma d) değişken kırılma	8
Şekil 2-1	Kompozit malzemelerin analiz tipleri	15
Şekil 2-2	Gerilme doğrultusu takviye doğrultusuna paralel durum	16
Şekil 2-3	Lifin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_2'nin değişimi	18
Şekil 2-4	Kompozit parçanın kayması	20
Şekil 2-5	Tek eksenli gerilme hali	23
Şekil 2-6	Tam kayma gerilmesi hali	24
Şekil 2-7	Tek eksenli gerilme (yandan görünüş)	27
Şekil 2-8	Lif takviyeli bir katmanın problem ve malzeme koordinat sistemleri	28
Şekil 2-9	3B izoparametrik 8-düğüm noktalı katmanlı sonlu eleman	35
Şekil 2-9	Referans koordinat sistemi	42
Şekil 3-1	Akış diyagramı	46
Şekil 3-2	Bindirme bağlantısı geometrisi ve lif açısı değişimi	47
Şekil 3-3	Bindirme bağlantısının sonlu eleman modeli	48
Şekil 3-4	Çekme yükü altında bindirme bağlantısı	49
Şekil 3-5	0° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları	50
Şekil 3-6	45° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları	51
Şekil 3-7	90° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları	52
Şekil 3-8	Çekme yükü altında 0° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi	53

Şekil 3-9 Çekme yükü altında 45° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 54

Şekil 3-10 Çekme yükü altında 45° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 55

Şekil 3-11 Çekme yükü altında tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantısının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri 56

Şekil 3-12 Çekme durumunda bindirme bağlantılarının açıya göre kopma yükü değişimi 57

Şekil 3-13 Lif açısına göre E_1 elastiklik modülünün değişimi 57

Şekil 3-14 Üç nokta eğme yükü altında bindirme bağlantısı 58

Şekil 3-15 0° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları 59

Şekil 3-16 45° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları 60

Şekil 3-17 90° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları 61

Şekil 3-18 Üç nokta eğme yükü altında 0°lik yapıştırıcıyla birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 62

Şekil 3-19 Üç nokta eğme yükü altında 45 ve 90° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 63

Şekil 3-20 Kompozit tek bindirme bağlantısının üç nokta eğme yükü altındaki deforme olmuş ve olmamış geometrisi 64

Şekil 3-21 Üç nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi 64

Şekil 3-22 Dört nokta eğme yükü altında bindirme bağlantısı 65

Şekil 3-23 0° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları 66

Şekil 3-24 45° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları 67

Şekil 3-25 90° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları 68
Şekil 3-26 Dört nokta eğme yükü altında 0° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 69
Şekil 3-27 Dört nokta eğme yükü altında 45 ve 90° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 70
Şekil 3-28 Kompozit tek bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altındaki deforme olmuş ve olmamış geometrileri 71
Şekil 3-29 Dört nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi 71
Şekil 3-30 Üç nokta eğilme için basit kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları 72
Şekil 3-31 Dört nokta eğilme için basit kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları 72
Şekil 4-1 Muhtemel hasar modlarının gösterimi 74
Şekil 4-2 Çekme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 1 ve 2. katmanı ile üst plakanın 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 76
Şekil 4-3 Çekme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 3, 4, 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 78
Şekil 4-4 Çekme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 79
Şekil 4-5 Çekme durumunda 0° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 80
Şekil 4-6 Çekme durumunda 0° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 81
Şekil 4-7 Çekme durumunda 0° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 82

Şekil 4-8 Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 1 ve 2. katmanı ile üst plakanın 1. katmanın da Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 84

Şekil 4-9 Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 3 ve 4 katmanları ile üst plakanın 2. katmanında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 85

Şekil 4-10 Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 5, 6, 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 86

Şekil 4-11 Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 87

Şekil 4-12 Çekme durumunda 45° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 88

Şekil 4-13 Çekme durumunda 45° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 89

Şekil 4-14 Çekme durumunda 45° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 90

Şekil 4-15 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plaka ve üst plakanın 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 91

Şekil 4-16 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plaka ve üst plakanın 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 92

Şekil 4-17 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plaka ve üst plakanın 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 93

Şekil 4-18 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plaka ve üst plakanın 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 94

Şekil 4-19 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plaka ve üst plakanın 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 95

Şekil 4-20 Çekme durumunda 90° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 96
Şekil 4-21 Çekme durumunda 90° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 97
Şekil 4-22 Çekme durumunda 90° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 98
Şekil 4-23 Çekme durumunda 90° lik üst plakanın a) 3 ve 4 b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri 99
Şekil 4-24 Çekme durumunda 90° lik alt plakanın a) 7 ve 8 b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri 100
Şekil 4-25 Çekme yükü altında bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi 101
Şekil 4-26 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 103
Şekil 4-27 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 104
Şekil 4-28 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 105
Şekil 4-29 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 106
Şekil 4-30 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 108
Şekil 4-31 Üç nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 109
Şekil 4-32 Üç nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 110
Şekil 4-33 Üç nokta eğme durumunda 0° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 111

Şekil 4-34 Üç nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 3 ve 4 b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri 112
Şekil 4-35 Üç nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 7 ve 8 b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri 113
Şekil 4-36 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 114
Şekil 4-37 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 115
Şekil 4-38 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 116
Şekil 4-39 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 117
Şekil 4-40 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 118
Şekil 4-41 Üç nokta eğme durumunda 45° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 120
Şekil 4-42 Üç nokta eğme durumunda 45° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 121
Şekil 4-43 Üç nokta eğme durumunda 45° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 122
Şekil 4-44 Üç nokta eğme durumunda 45° lik alt plakanın a) 3 ve 4 b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri 123
Şekil 4-45 Üç nokta eğme durumunda 45° lik alt plakanın a) 7 ve 8 b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri 124
Şekil 4-46 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 126

Şekil 4-47 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 127

Şekil 4-48 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 128

Şekil 4-49 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 129

Şekil 4-50 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 130

Şekil 4-51 Üç nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 132

Şekil 4-52 Üç nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 133

Şekil 4-53 Üç nokta eğme durumunda 90° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 134

Şekil 4-54 Üç nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 3 ve 4 b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri 135

Şekil 4-55 Üç nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 7 ve 8 b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri 136

Şekil 4-56 Üç nokta eğme durumunda kompozit bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi 137

Şekil 4-57 Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 138

Şekil 4-58 Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 139

Şekil 4-59 Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5, 6, 7 ve 8.katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 140

Şekil 4-60 Dört nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 143
Şekil 4-61 Dört nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 144
Şekil 4-62 Dört nokta eğme durumunda 0° lik üst plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 145
Şekil 4-63 Dört nokta eğme durumunda 0° lik üst plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 146
Şekil 4-64 Dört nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında üst plakanın 1, 2, 3 ve 4.katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 147
Şekil 4-65 Dört nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında üst plakanın 5, 6, 7 ve 8.katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 148
Şekil 4-66 Dört nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında üst plakanın 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 150
Şekil 4-67 Dört nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 151
Şekil 4-68 Dört nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 152
Şekil 4-69 Dört nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri 153
Şekil 4-70 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 154
Şekil 4-71 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 155
Şekil 4-72 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 156

Şekil 4-73 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 157
Şekil 4-74 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9 ve 10 katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi 158
Şekil 4-75 Dört nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri 160
Şekil 4-76 Dört nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri 161
Şekil 4-77 Dört nokta eğme durumunda 90° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri 162
Şekil 4-78 Dört nokta eğme durumunda 90° lik üst plakanın a) 3 ve 4 b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri 163
Şekil 4-79 Dört nokta eğme durumunda 90° lik üst plakanın a) 7 ve 8 b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri 164
Şekil 4-80 Dört nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi 165
Şekil 5-1 Kompozit plaka üretim kalıbı 167
Şekil 5-2 Bindirme bağlantısı oluşturma kalıbı 168
Şekil 5-3 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantısı 168
Şekil 5-4 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının çekme testi 169
Şekil 5-5 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantıların lif açısına göre kopma yükü değişimleri 170
Şekil 5-6 Çekme deneyinde kompozit tek bindirme bağlantılarının kırılma yüzeyleri 171
Şekil 5-7 0° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 174
Şekil 5-8 15° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 175
Şekil 5-9 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının üç nokta eğme testi 176

Şekil 5-10 Üç nokta eğme yükü altında tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimleri 176
Şekil 5-11 Üç nokta eğme testinde kompozit tek bindirme bağlantılarının kırılma yüzeyleri 178
Şekil 5-12 0° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 181
Şekil 5-13 15° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 182
Şekil 5-14 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme testi 183
Şekil 5-15 Dört nokta eğme yükü altında tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimleri 183
Şekil 5-16 Dört nokta eğme testinde kompozit tek bindirme bağlantıların kırılma yüzeyleri 185
Şekil 5-17 0° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 188
Şekil 5-18 15° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 189
Şekil 5-19 30° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 1, 6 ve 7 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x) 190

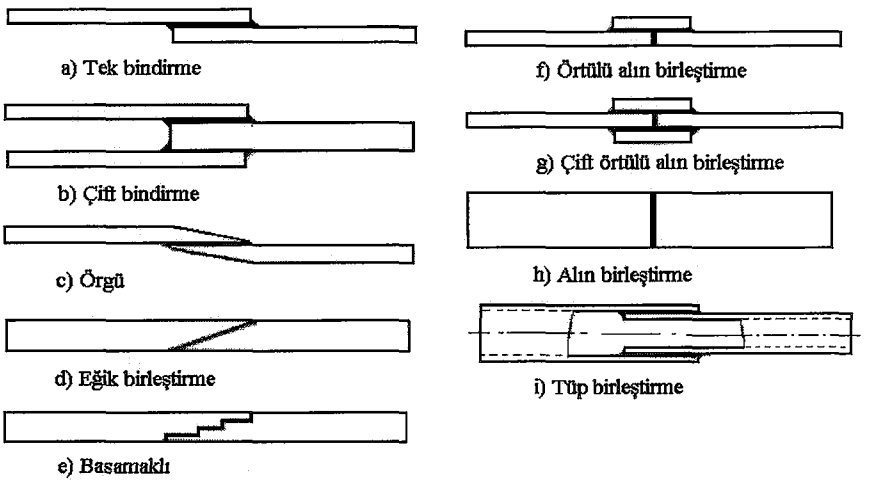
BÖLÜM 1

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT BİNDİRME BAĞLANTILARI

1.1 Giriş

En geniş anlamda, kompozit iki veya daha fazla bileşenden meydana gelen malzemedir. Bu bileşenler makroskobik seviyede bir araya getirilirler ve birbirleri içinde çözünmezler. Takviye elemanı olarak kullanılan bileşen; lif, partikül veya ince levha şeklinde olabilir iken diğer bileşen ise matristir. Bu malzemelerin bir araya getirilmesi ile bileşenlerinkinden daha iyi olan mukavemet, rijitlik gibi çalışma karakteristikleri elde edilir. Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre polimerik ve metal matrisli olarak ikiye ayrılır. Ayrıca üretim durumuna göre de rasgele dizilmiş, parçacık takviyeli, sandeviç ve lif takviyeli olarak dörde ayrılırlar. Polimer matris malzemenin lif ile takviye edilmesi sonucu meydana gelen malzemelere de *lif takviyeli polimerik (LTP)* kompozitler denir [1]. Bu kompozitler, yapılarda en yüksek verimi elde etmek için elemanların tabakadan tabakaya değişen açılarda tasarlanmasına olanak sağlarlar. Bundan dolayı, son yıllarda LTP kompozitler mekanik, havacılık, deniz ve otomotiv yapılarının tasarımında önemli bir mühendislik malzemesi olmuştur [2].

Yapıştırıcı ile birleştirme; mekanik bağlama, perçinleme ve kaynak gibi alışılmış metotlara tamamlayıcı olabilir ya da onların yerine kullanılabilir bir birleştirme tekniğidir. Uçak konstrüksiyonlarında ve ahşap yapılarda, yapıştırılmış yapıların mukavemeti ve gerilme değişimlerine olan dayanımı uzun yıllardan beri gösterilmiştir. Günümüzde polimerik ve kompozit malzemeler gibi farklı malzeme özelliklerine sahip yapısal bileşenler için de kullanılabilen tipik yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı çeşitleri Şekil 1-1'de gösterilmiştir.



Şekil 1-1 Uygulamada kullanılan yapıştırıcı bağlantıları [3]

Bu birleştirme tekniği; özellikler bakımından farklılık arz eden değişik tip malzemeleri birleştirilebilme, vida ve perçin gibi bağlama elemanları ile oluşacak düzensizlikleri ortadan kaldırma gibi bir veya daha fazla fayda sunabilmektedir. Ayrıca civata, vida gibi bağlama elamanları ve nokta kaynağında küçük temas alanlarında ortaya çıkan gerilme yığılmalarını azaltmakta ve tüm yapıştırma alanı boyunca daha düzenli gerilme dağılımı sağlamaktadır. Ağırlık ve maliyetten tasarruf sağlanarak ince malzemeler de dayanıklı bir şekilde birleştirilebilmektedir. Fakat bahsedilen avantajları olmasına rağmen bu birleştirme tekniği sınırlı olarak uygulanmaktadır. Bunun nedeni ise, bağlantı dayanımının işleme şartlarına bağlı olması, soyulma tarzında kopmalardan sakınmak için özel bağlantı tasarımı gerektirmesi ve özellikle ısı gibi olağanüstü çalışma şartlarına yapıştırıcı direncinin az olmasıdır. Ayrıca yapıştırma işlemi, birleştirmeden önce bileşenlerin hazırlanması, ısı ve basınç gibi özel çevre şartlarının sağlanması, özel yapıştırma yan gereçleri gerektirmesi bağlantı maliyetini arttırır [3].

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Bindirme Bağlantıları

İki plakanın kısmi bir bölgede üst üste yapıştırıcıyla bağlanmasıyla oluşan tek bindirme bağlantıları basit geometrileri ve testlerinin kolaylığı nedeniyle birçok bilim adamı ve araştırmacının ilgisini çekmiştir. Dolayısıyla bu alanda yapılan teorik ve deneysel çalışmalar çok fazladır.

Bindirme bağlantılarında bağlantı mukavemetinin başarılı olarak tahmini için ilk adım, yük altında zayıflamaya neden olan gerilme, şekil değiştirme ve yapışma mekanizmasını iyi anlamaktır. En basit gerilme analizi, iki rijit plakayı (yapışan) ve aralarında sadece kayma tesiriyle şeklini değiştiren yapıştırıcıyı göz önüne alır. Bindirme bağlantılarında; bindirme bölgesi boyunca yapışanların çekme deformasyonları, bindirme uçlarında yapıştırıcı kayma gerilmelerinin yığılmasına neden olur. Volkersen "diferansiyel şekil değiştirme" olarak bilinen bu tesiri ilk göz önüne alan araştırmacıdır [4]. Bu çalışmalar tek bindirmeli bağlantıları sadece yapıştırıcı tabakası kayma deformasyonlarına maruz ve deforme olmayan yapışanlardan oluşan bir boyutlu çubuk kabulüyle basit kayma modeli altında analiz edilmiştir ve tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantısının tam kayma gerilmesi altında olduğu kabul edilen bir klasik mekanik yaklaşımı kullanılmıştır. Ancak bu bağlantılarda yük hattı ile simetri ekseninin çakışmaması bağlantının dönmesine neden olur. Dolayısıyla yapıştırıcı bağlantısı, bindirme uçlarında kayma gerilmelerine ilaveten soyulma gerilmelerine de sahiptir. Bu nedenle yapışan malzemeler çekme etkisinden başka eğilme momentlerine de maruzdur. Goland ve Reissner, Volkersen analizinde ihmal edilen bu eğilme momentlerini de göz önüne alarak teoriyi düzelttiler ve eksantirik yükleme etkilerini içeren tek bindirme bağlantısı için bir deformasyon modeli sundular [5].

Ancak; Benson, Goland ve Reissner'in teorisinde eğilme momenti faktörünün türetilmesinde bindirme bölgesinin dönmesine müsaade ettiğini, ancak dönme olayının olmadığını kabul ederek bağlantıdaki iç gerilmeleri türettiğini ve bunun düşük yükler için mümkün olmadığını ifade etti [6].

Hart-Smith ilk olarak elastik-plastik davranışlı yapıştırıcıları içeren bağlantıları incelemek üzere Goland ve Reissner'in modelini geliştirmiştir ve PABST (Primary Adhesively Bonded Structure Technology) üzerine bir sürekli ortam mekaniğinden faydalanarak birçok çalışma yayınladı. Ayrıca Hart-Smith tek bindirmeli, çift bindirmeli, aynı veya farklı yapışanlardan oluşan bağlantılar, basamaklı, alın ve çift destekli vb. farklı bağlantıların analizi için bilgisayar programları geliştirdi ve bu bağlantıların elastik-plastik gerilme analizlerini gerçekleştirdi [7-13]. Benzer programlar İngiltere'de uzay çalışmalarında kullanılan elastik, elastik-plastik hesaplamalar için

ESDU tarafından geliştirilmiştir ve bu çalışmalarda Volkersen, Goland ve Reissner'in çalışmaları referans alınmıştır [14,15].

Harris ve Adams soyulma gerilmelerinin etkili olduğu yapıştırıcı tabakasının serbest uçlarındaki yapışan plakaların köşe geometrisini, bağlantıdaki büyük dönmeleri ve yer değiştirmeleri modellemek için lineer olmayan sonlu eleman modelini kullandı. Adams ve diğerleri epoksi yapıştırıcı ve CFRP/çelikten oluşturulmuş çift bindirmeli bir bağlantının mukavemetini belirlemek için analizlerinde yapıştırıcıyı elastik-plastik olarak modellediler [16,17].

Engin ve Apalak yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek ve çift bindirme bağlantılarının elastik-plastik analizi ve tasarımı konusunda çalıştılar [18]. Çalışmalarında düzlem şekil değiştirme kabulü altında farklı yük halleri için yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek ve çift bindirme bağlantılarında hasar bölgelerinin oluşumu ve gelişimini incelediler. Analizlerde geometrik bakımdan lineersizlikleri ve bağlantıyı oluşturan malzemelerden kaynaklanan lineersizlikleri dikkate aldılar. Bu amaçla büyük yer değiştirme teorisi ve plastisite teorisini lineer olmayan sonlu eleman metodu yardımıyla probleme tatbik ettiler. Çekme yüküne maruz tek bindirme bağlantısında hasar bölgelerinin sağ ve sol serbest uçlarda yapıştırıcı-plaka ara yüzeylerinde başladığını ve hasar bölgesi ucunda gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarını gözlediler.

1.2.2 Hasar Analizi

LTP kompozit plakaların birleştirildiği tek bindirme bağlantıları, uzay ve havacılık endüstrisinde geniş uygulama alanına sahiptir. Diğer mekanik bağlama metotlarına göre üstünlükleri birçok araştırmacının bu alana yönelmesine neden olmuştur. Araştırmacılar bağlantılar ile ilgili yaptıkları çalışmalarda geometri, malzeme, yükleme şartları, hasar biçimleri, sıcaklık ve nem etkilerinin çeşitli durumlarını incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmalar, karmaşık üç boyutlu tabaka geometrisi, anizotropi, lif yönleri ve çoklu tabaka yapılarının davranışlarına odaklanmıştır. Sonlu eleman tekniğinin sınır şartlarından ve malzeme özelliklerinden bağımsız olması kompozitlerdeki gerilme ve deformasyon davranışlarının tahmininde bu tekniği tercih edilir kılmıştır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş yapısal bağlantıları verimli tasarlamak ve yapıştırıcıyla birleştirmenin avantajlarını kullanmak için bağlantının hasar mekanizmasını doğru modellemek gerekir. Kompozitlerin geniş uygulama alanlarına rağmen, güvenilir tabakalı LTP kompozit yapıların tasarımı hala çözülmesi gereken bir problemdir. Tabakalı kompozit yapıların gerçeğe yakın bir hasar modeli ve hasar meydana gelmeden önce yapının taşıyabileceği en büyük yükleri etkileyen faktörlerin tam olarak anlaşılması ve değerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Genellikle ilk hasar katmanı (*first-ply failure*) düşüncesi, tabakalı kompozit yapıların tasarımı için bir kriter olarak kullanılmaktadır [2]. Bu nedenle ilk hasar katmanı yüklerinin doğru belirlenmesi önemli bir araştırma konusudur. Son yıllarda tabakalı kompozit plakaların ilk hasar katmanı mukavemeti konusunda birçok çalışma yapılmıştır.

Turvey klasik tabaka teorisi ile basit destekli simetrik ve anti-simetrik tabakalı kompozit plakaların lineer ve lineer olmayan ilk hasar katmanı yüklerini belirlemek için analitik metotlar kullandı [19-22]. Reedy ve diğerleri kayma deformasyonu teorisine dayanan farklı fenomonolojik kırılma kriterleri ile tabakalı kompozit plakaların lineer ve lineer olmayan ilk hasar katmanı yüklerini hesaplamak için sonlu elemanlar metodunu kullandılar [23,24]. Ayrıca Kam ve Lai farklı yükleme durumlarında tabakalı kompozit plakaların ilk hasar katmanı mukavemetinin teorik ve deneysel metotlarla tahminine çalıştılar [2]. Akustik emisyon tekniğini kullanarak ve Tsai-Wu kırılma kriteri yardımıyla hasar oluşumu esnasında plakada enerji yayılmasını incelediler.

Kompozitlerin mekanik özellikleri mikro mekanik ve makro mekanik yaklaşımlar kullanarak belirlenebilir. Mikro mekanik yaklaşım, lif ve matris malzemelerini bileşen olarak kabul eder ve kompozit yapıların mekanik davranışını tahmin etmek için bunların etkileştiğini düşünür. LTP kompozitlerin hasarını lif ve matris seviyesinde modeller. Makro mekanik yaklaşım, lif ve matris bileşenlerin özellikleri ortalama olarak alındığını ve kompozit yapının özellikleri homojen olarak üretilmiş varsayar. Haj-Ali ve Kılıç kalıplanmış (*pultured*) kompozitlerin lineer olmayan davranışını belirlemek için mikro mekanik modeller ile geliştirmiş oldukları hasar ve yapısal modelleri birleştirdiler [25-28]. Bu modeller yardımıyla rasgele dizilmiş ve sürekli liflerden oluşan kalıplanmış kompozitlerin tek eksenli yükleme durumları altında lineer olmayan davranışlarını

incelediler ve gelişen hasar analizlerini Tsai-Wu kırılma kriterini kullanarak teorik ve deneysel olarak çalıştılar.

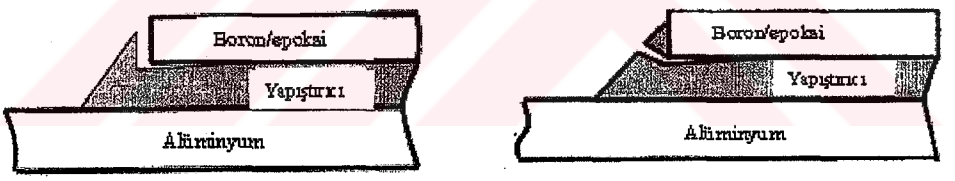
Kwon ve Berner, lif takviyeli tabakalı kompozitlerin hasar ve kırılma analizi için bir mikro mekanik model geliştirdiler ve sonlu eleman analizi ile lif ve matristeki çatlak ve kırılmaları incelediler [29]. Bu çalışmada; bölgesel hasar ve esas kırılma yükünün hasarın tipine, gelişimine ve gerilme dağılımına bağlı olduğunu gösterdiler. Jones çapraz katmanlı ve açılı katmanlı kompozitlerde mikro mekanik analiz kullanarak yanal matris çatlaklarını araştırdı [30]. Bu çalışmada, ilk yanal matris çatlağında enine yırtılmaları, Poisson oranının etkisi ile oluşan gerilmeleri, ısıl şekil değiştirmeleri ve sınırlı çatlakları inceledi. Hashin ve Rosen mikro mekanik açıdan değişik mikro çatlaklar içeren kompozit malzemedeki hasar konularını incelediler ve rijitlik azalmasının ve kompozit tabakanın ısıl değişiminin çatlak yığılmasına neden olduğunu gösterdiler [31].

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda zayıflama mekanizması ile ilgilenmiş olan Crocombe, elastik-plastik davranışlı yapıştırıcı kabulü altında bir çift bindirmeli bağlantının mukavemetinin yapıştırıcı kalınlığı azalırken arttığını gösterdi [32]. Crocombe bu çalışmasında kırılma kriteri olarak bindirme bölgesi boyunca yapıştırıcıya uygulanan yükte daha fazla artışı taşımaması sonucu kabul edilen "*bütünsel akma*" denilen bir düşünceyi önerdi. Bu kriter bağlantı mukavemet tahminlerinde birçok etmeni göz ardı eder ve bu yaklaşım çoğu bağlantılar için geçerli değildir. Çünkü bölgesel hasar bütünsel akmadan önce olabilir. Bu tip malzeme mukavemeti ile ilgili problemlerin çözümünde, Suo ve diğerleri yapıştırılmış bağlantıların hasar tahmini için kırılma mekaniği yaklaşımlarını kullanmayı önermişlerdir [33-35]. Son yıllarda literatürdeki genel fikir birliği, polimer yapısal bileşiklerin ve yapıştırılmış bağlantıların hasar içermesi durumunda bu bileşiklerin kırılmasının hasarlı malzeme bölgesinden başlayabileceğidir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların dayanımını değerlendirmede önemli yöntemlerden biride çatlak ilerleme davranışında kırılma modunun tanımlanması ve lineer veya lineer olmayan elastik-plastik kırılma mekaniği yardımıyla yorumlanmasıdır. Kırılma mekaniğinde, makroskobik bir çatlağın malzemede var olduğu ve kırılmanın çatlağın ilerlemesinden dolayı oluştuğu varsayılır.

Sheppard ve diğerleri bağlantı mukavemetinin tahmininde kırılma kriterine dayanan bir hasar bölgesi modeli sundular [36]. Bu modelin hem yapıştırılmış bağlantılarda düzlem dışı yapışan kırılması için hem de kohezif kırılma için geçerli olduğunu gösterdiler. Kompozit reçinesinin gevrekliği nedeniyle, kritik hasar bölgesinin kompozit bağlantılarda yapıştırıcıyla birleştirilmiş alüminyum bağlantılara göre daha küçük olduğunu gösterdiler.

Owens ve Lee-Sullivan kompozit/alüminyumdan oluşan yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek bindirmeli bağlantıdaki çatlak başlaması ve gelişmesi nedeniyle rijitlik değişimini tahmin edecek basit bir teorik model geliştirdiler ve yaptıkları deneysel çalışma ile bu teoriyi doğruladılar [37,38]. Esnek yapıştırıcının bağlantıdaki çatlak başlangıcı ve son kırılmayı önemli oranda ertelediğini belirlediler. Polimer kompozitin rijitliği nedeniyle kompozit/alüminyum bağlantıda test sıcaklığının etkili olduğunu ve aynı veya farklı malzemelerden oluşan bağlantı testlerinin hem en büyük bağlantı rijitliğini hem de çatlak gelişimiyle rijitlik kaybı oranının önerdikleri teorik modelle tahmin edilebileceğini gösterdiler.



a) b)

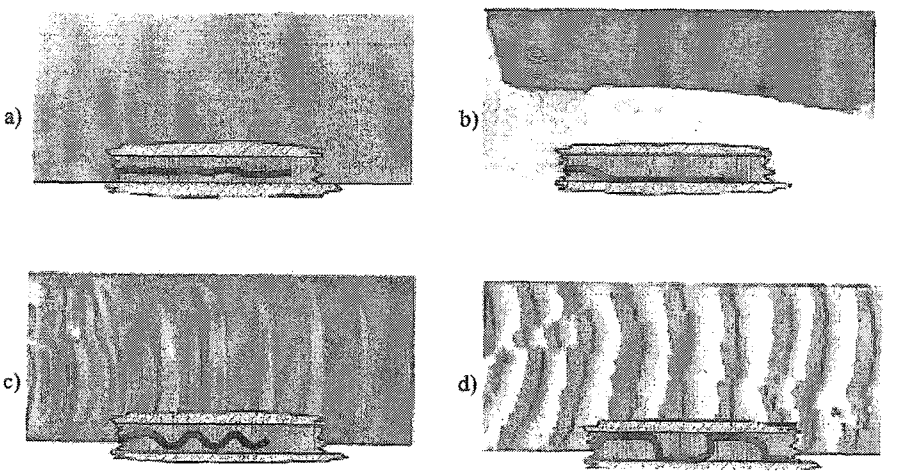
Şekil 1-2 Çatlak başlama ve gelişme tipleri a) tip I ve b) tip II [39]

Cheuk ve diğerleri metal-kompozit çift bindirmeli bağlantılarda yorulma çatlağının başlaması ve gelişmesi mekanizmasını nümerik analizlerle ve deneysel olarak incelediler [39]. Şekil 1-2'de gösterildiği gibi iki tip çatlak gelişiminin olduğunu ve her iki tip çatlağın da yapıştırıcı birikintisinde başladığını tespit ettiler. Cheuk ve Tong bindirmeli kayma bağlantılarında kompozit plakalar içindeki gömülü çatlakların etkisini incelemek için lineer olmayan sonlu eleman analizi kullandılar [40]. Analitik ve deneysel çalışmalarda gömülü çatlakların kırılma yükünü azaltıcı etki yaptığı gibi kırılma yolunun da gömülü çatlak boyuna bağlı olarak değiştiğini gösterdiler. Kayupov ve Dzenis farklı boyda çatlaklar içeren tek bindirmeli kompozit bağlantılardaki gerilme

alanlarını incelemek için lineer olmayan sonlu eleman analizi kullandılar [41]. Bu çalışmada çatlak ucuna yakın gerilmelerin çatlak gelişirken lineer olmayan bir tarzda arttığını gösterdiler.

Qin ve Dzenis, keyfi ortotropik tabakalı yapışanlı çatlak yerleştirilmiş yapıştırıcılı bağlantılar için gerilme ve deformasyon modeli geliştirerek, tek yönlü ve açılı yapışanlı bağlantıları çalıştılar [42]. Çatlak dağılım ve büyüklüğü ile şekil değiştirme enerjisi boşalma oranlarının değişimini inceleyerek açılı katmana sahip yapışanlı bağlantıların tek yönlü yapışanlı bağlantılardan daha yüksek enerji boşalma oranlarına sahip olduklarını gösterdiler.

Chen ve Dillard, alüminyum yapışan ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturulan çift ankastre kirişleri test ettiler [43]. Şekil 1-3'de görüldüğü gibi kırılma yüzeyleri için dört farklı kırılma tipi gözlenmiştir; **i)** yapıştırıcı tabakasının ortası boyunca çatlağın yayıldığı *kohezif kırılma*, **ii)** yapışanlar ve yapıştırıcı arasındaki ara yüzey boyunca kırılmanın meydana geldiği *ara yüzey kırılması*, **iii)** birleştirmenin orta düzlemi etrafında fakat yapıştırıcı tabakasında kalan ve çatlak yörüngesinin değiştiği *salınımlı kırılma*, **iv)** yapıştırıcı ve yapışanın oluşturduğu iki ara yüzey arasında çatlağın yörüngesinin değiştiği *değişken kırılma*. Elde edilen bu bilgi, yapıştırıcı bağlantılarında çatlak yolu seçiminin temel mekanizmasının "*kırılma merkezi*" ve "*yöne bağlı çatlağın dengesi*" ile ilişkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 1-3 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda farklı kırılma tipleri; a) kohezif kırılma b) ara yüzey kırılması c) salınımlı kırılma d) değişken kırılma [43]

Spootswood ve Palazotto yanal yüklemeye karşı mukavemetli olacak şekilde tasarlanmış ince ve eğrisel kompozit panelin hasar davranışını belirlemek için; basitleştirilmiş büyük yer değiştirme ve dönme teorisi kullanarak Hashin kırılma kriteri ile ve ayrıca kriter kullanmadan lineer olmayan sonlu eleman analizini yapmıştır [44]. Analizler sonucunda, deneysel sonuçlara Hashin kriteri kullanarak yaptıkları analizlerin kriter kullanmadan hasarsız kabul ettikleri analizlerinkinden daha yakın olduğunu gösterdiler. Ayrıca Hashin kırılma kriterinin ± 45° lik açılara sahip katmanların hasar davranışını tahmin etmede 0° açılı katmanlarınkinden daha başarılı olduğunu ortaya koydular.

Ambur ve diğerleri eğrisel kompozit panellerin hasar oluşumu ve gelişimi konusunda araştırma yaptılar [45]. Araştırmada paneller hem delikli ve hem de deliksiz olarak ayrı ayrı incelenmiş ve hasar analizleri Hashin kırılma kriteri kullanarak matris çatlağı, lif-matris kayması ve lif kırılması hasar modları dikkate alınarak yapılmıştır. Yapılan analizler ile deneyler birbirlerine uyumlu sonuçlar vermiştir. Çalışmada ek olarak başlangıç geometrik kusurlarının ve delik boyutlarının etkisini de araştırdılar ve geometrik kusurların etkisinin öneminin büyük olduğunu gösterdiler. Ayrıca delaminasyon hasar modunun etkisinin hesaba katılması ile analizlerin daha doğru sonuç verebileceğini önermişlerdir.

1.3 Araştırmanın Takdimi

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü tabakalı kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme ve eğme yükleri altında bindirme bölgesi civarında ilk hasar oluşumu ve bu hasarın gelişimi incelenmiştir. Kompozit bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerini belirlemek maksadı ile mühendislik için önemli olan çekme ve eğme deneyleri yapılmıştır ve deneyler ile teorik olarak Ansys paket programında yapılan analizler karşılaştırılmıştır. Hasar analizinde sürekli ortamlar mekaniğine dayanan *meso-scale yaklaşımı* kullanılarak hasar modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bağlantının geometrisinden dolayı ortaya çıkan lineersizlikler ve kullanılan malzemenin elastik-plastik özellikleri dikkate alınmamıştır. Yapıştırıcı elastik ve büyük plastik şekil değiştirmelere dayanır kabul edilmiştir.

Bölüm 2' de kompozit malzemeler hakkında temel bilgiler ve bu malzemelerin mikro ve makro mekanik analiz yöntemleri, kırılma kriterleri sunulmuştur. Bölüm 3 'de ilk olarak hasar analizi irdelenmiş ve bir akış diyagramı ile açıklanmıştır. Sonra bağlantı geometrisi tanımlanmış ve bağlantının analizlerinde kullanılan sonlu eleman yöntemi kısaca açıklanarak tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarında değişik açılar ve değişik yükleme şartları altında hasar oluşumu ve gelişimi Tsai-Wu kırılma kriterine bağlı olarak incelenmiştir. Bölüm 4'de bindirme bağlantısının değişik açılar ve değişik yükleme şartları altında Hashin kırılma kriterine bağlı olarak hasar oluşumu ve gelişimi incelenmiş ve Tsai-Wu kırılma kriteri sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 5'de ise tek yönlü plakalardan oluşan tek bindirme bağlantılarının çekme ve eğme testleri altında kırılma yükleri, yapıştırıcı boyunca kırılma yüzeyleri ve kompozit plakalardaki kırılma davranışları SEM (Scanning Electron Microscope) yardımıyla analiz edildi. Meso-scale yaklaşımı ile elde edilen teorik sonuçlar bu deneysel sonuçlar ile mukayese edildi. Bölüm 6'da ise hasar analizi ile deney sonuçları değerlendirilerek daha sonraki yapılacak çalışmalarda üzerinde durulması gereken hususlar ifade edildi.

BÖLÜM 2

KOMPOZİT MALZEMELER MEKANİĞİ

2.1 Giriş

20. yüzyılın ikinci yarısında teknolojinin hızla gelişmesi, endüstrinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Fakat bu gelişim yeryüzünde bulunan ana malzemelerin sınırlı olmasından dolayı endüstriyel malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri teknolojinin gelişmesine katkı sağlayamamıştır. Uzay araçlarının yapımına geçilen 20. yüzyılın ikinci yarısında bilim adamları çağın yenilikleri ile birlikte mevcut olan malzemelerin özelliklerinden bilimin gelişmesi paralelinde günün koşullarına uyacak şekilde gerek ekonomik gerekse teknik yönde daha uygun malzemeleri üretme yolunu seçmişlerdir. Diğer bir deyişle hem ekonomik hem mukavim hem de daha hafif malzemelerin elde edilmesine yoğunlaşılmıştır. Böylece kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır.

2.2 Kompozit Malzeme

İki veya daha fazla malzemenin kullanım yerlerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun bir malzemeyi oluşturabilmek için makro seviyede birleştirme sonucu elde edilen malzemeye *kompozit malzeme* denir. Kompozit malzemeler genellikle matris adı verilen ana faz ile takviyelendirici olarak adlandırılan ikinci veya tali fazdan oluşur.

Kompozit malzemeler örneklerini doğadan almış olup aslında çok uzun bir kullanım tarihine sahiptirler. Ülkemizin kırsal bölgelerinde kullanılan kerpiç, kompozit malzemelerin en ilkel örneklerindendir. Kerpiç saman çöpleri ile takviye edilen bir yapıya sahiptir. Günümüzde kullanılan kompozitler ise cam lif-reçine (polyester), tungsten, molibden takviyeli alüminyum, karbon ve çelik lif takviyeli plastiklerdir. Bunlar genellikle plastik-plastik, plastik-dolgu maddesi, plastik-cam lif, plastik-metal,

lif-metal matrisli kompozitler ve seramikler olarak sınıflandırılır. Son yıllarda yüksek mukavemet-ağırlık, katılık-ağırlık oranlarına sahip olan lif takviyeli reçine özlü kompozitler uçak ve uzay araçlarında, ayrıca ağırlığa karşı hassas uygulamalarda önemli oranda yer bulmuşlardır. Daha önceleri sacdan ve tahtadan yapılan tekneler, yatlar, kotralar yerini artık polyester ve cam liften yapılanlara bırakmışlardır. Bakım onarım bakımından daha avantajlı olan kompozit malzemelerden yapılan tekneler aynı zamanda hafif, uzun ömürlü ve süratli olmaları nedeni ile tercih edilmektedir. Kompozit malzeme ile elde edilebilecek üstün özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

a) Mukavemet
b) Aşınma direnci
c) Ağırlık
d) Isı izolasyonu
e) Akustik izolasyon
f) Katılık – rijitlik
g) Görünüm güzelliği
h) Yorulma ömrü
i) Isıya dayanıklılık
j) İmalat kolaylığı

2.3 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matrisler

Kompozit malzeme üretiminde matris olarak metaller, hafif metaller, seramikler, plastikler gibi çok çeşitli malzemeler kullanılır. Metal ve hafif metal matris malzemeler teorik olarak kompozit malzemeyi teşkil etmekle beraber, kompozit malzeme yapımında amaçlanan hafiflik ve imalat kolaylığını sağlayamazlar. Mukavemet özellikleri için arzu edilen özellikler ise yalın olarak metallerin kullanılmasıyla elde edilecek değerlerden çok farklı olmayacaktır. Ayrıca genelde metal matrisler metal liflerle kullanılırlar. Bu dezavantajdan dolayı kompozitlerde matris olarak metal yerine plastik tercih edilir.

2.3.1 Plastikler

Plastik, moleküllerin belli bir düzen içerisinde sıralamasıyla oluşan organik kimyasal bir malzemedir. Moleküllerin sıralanması sırasında yapılacak değişim plastiğe farklı

özellikler kazandırır. Yani, değişik moleküllerin bir araya getirilmesiyle değişik özelliklerde plastik malzemeler elde edilir. Plastikleri oluşturan molekül bağlarının fazla olması ve farklı veya aynı malzemelerin bir ana malzeme içinde kullanılabilmesi plastiklerin teorik olarak sonsuz çeşit ve sayıda olabileceğini ortaya koyar. Plastikler kullanımları sırasında gösterdikleri özelliklere göre sınıflanırlar. *Elastomerler*, üç boyutlu şebeke yapısı oluşturarak yüksek esneklik gösteren polimerlerden meydana gelirler. *Termoplastikler*, molekül yapısı olarak yan zincirler ve gruplar ihtiva ederler. Molekülleri üç boyutlu şebeke yapıyı oluşturamazlar. Bundan dolayı rijit yapıya sahip değillerdir. Isı altında çabuk yumuşarlar. Tekrar ısıtılarak yeniden şekillendirilebilirler. Piyasada toz veya granül halde bulunurlar. Kompozit malzeme yapımında fazla kullanılmazlar. Başlıca çeşitleri; asetol reçineler, akrilikler, selülozik, florokarbon, izosiyanatlar, poliavidler, polipolefinler, stiren, vinil, polikarbonatlardır. *Termosetler*, molekül yapıları polimerizasyon sırasında molekülün reaktif olan kısmı moleküller arasındaki zincir yapıyı teşkil eder. Moleküller üç boyutlu şebeke yapıyı oluşturacak şekilde birbirlerine bağlı rijit bir yapıyı teşkil ederler. Bu plastik malzeme şekil aldıktan sonra artık şekil değiştirmezler. Başlıca çeşitleri; amino reçineler, akidler, epoksi reçineler, furan reçineler, fenolik reçineler, silikonlar, polyesterlerdir.

Plastik malzemeler genel olarak reçine diye de adlandırılırlar. Kompozit malzeme imalatında en çok kullanılan reçineler termosetlerdir. Gelişmiş mekanik özelliklere sahip olması istenen malzemeler, termosetler kullanılarak kolayca üretilirler. Günümüzde otomotiv sanayisinde, inşaat sektöründe, depo, tank, boru ve mobilya yapımında ekonomik olduğu ve aranan özellikleri sağladığı için yaygın olarak kullanılır. Termosetler içinde en çok polyesterler, epoksi reçineler, fenolik reçineler ve silikonlar kullanılır. Uygulamada kullanılan reçineler genelde polyester ve epoksi reçinelerdir. Yüksek mukavemet istenen yerlerde epoksi reçineler kullanılır.

2.4 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları

Kompozitlerin yapımında kullanılan reçineler birçok elemanla takviye edildikten sonra kullanılırlar. Plastik lifler, metal veya hafif metal lifler en çok kullanılan takviye elemanlarıdır.

a) Cam Lifleri: Yaygın olarak kullanılan cam lifler silika esaslı (~%50-60 SiO_2) olanlarıdır ve Na, Al, Fe gibi diğer oksitleri de içerirler. E, C ve S çeşitleri mevcuttur. E cam lifi, iyi bir elektrik izolatörüdür ve uygun elastiklik modülüne sahiptir. C cam lifi, oldukça iyi korozyon direncine sahiptir ancak mekanik özellikleri düşüktür. S cam lifi, daha yüksek oranda silika içerir, pahalıdır ve daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Cam lifler üretilirken, camı oluşturan hammaddeler bir fırında eritilir. 400-2400 adet deliğe sahip özel olarak yapılmış bölümlerden aşağıya doğru akıtılır. Kendi ağırlığı ile akan cam eriyiği belli bir hızla masuralara sarılmak suretiyle çekilir. Böylece çekme hızına bağlı olarak 10-15 mikron kalınlıklara sahip cam lifler elde edilir. Elde edilen cam lifler bağlayıcı bir malzeme ile temas ettirilerek istenen miktarda gruplar halinde masuralarda toplanırlar.

b) Karbon Lifler: Bu lifler çok hafiftirler ve yüksek çekme dayanımı ve yüksek elastiklik modülüne sahiptirler. Karbon liflerin bir çeşidi olan grafit, karbon atomlarının hegzagonal düzlem katmanında ABABAB sırasıyla düzenli olarak dizilmesiyle oluşur. Bu lifler organik maddelerden üretildikleri için organik lif olarak da adlandırılırlar. Ham madde olarak poli-akro-nitril (PAN), selüloz ve zift kullanılır. Karbon lif ile takviye edilmiş kompozit malzemeler mukavemetlerinin ve rijitliklerinin cam liflerle imal edilen kompozitlere oranla çok daha yüksek olması, yoğunluğunun az olması ve yorulma mukavemetinin fazla olması nedeniyle kullanımları gittikçe artmaktadır. Uçak yapımında, roket lülesi imalinde ve türbin kanatçıklarının imalinde kullanılmaktadır.

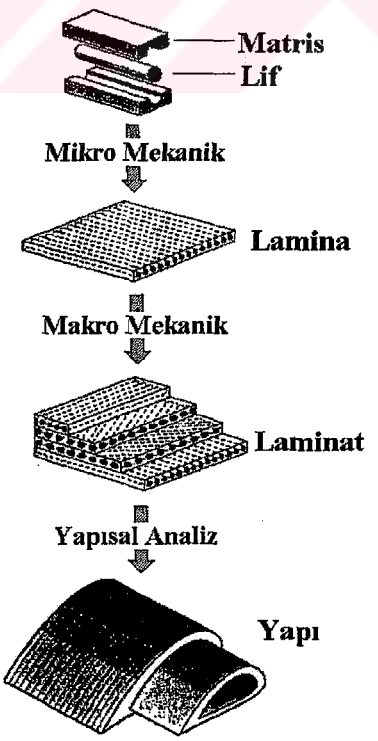
c) Boron Lifler: Bu tür lifler uygun bir malzeme üzerine boronun kaplanması ile elde edilir. Bor, hidrojen ile bor triklorürürün reaksiyonuyla elektriksel olarak yaklaşık 1300°C' ye kadar ısıtılmış tungsten teli veya son zamanlarda karbonun üzerine çökeltilmesiyle elde edilir. Bu liflerde yüksek modül, dayanım ve ergime noktası elde edilmektedir. Bu avantajlarına rağmen boron lif içindeki tungsten telden dolayı yoğunluğu fazladır. Bu sebeple son zamanlarda tungsten yerine karbon çekirdek kullanılarak yoğunlukları azaltılmaktadır. Ancak tungsten çekirdek boron ile reaksiyona girebilir fakat karbon ise giremez. Boron lifler metalik matrisler için uygundur. Boron takviyeli alüminyum esaslı borular uzay araçlarında konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılmaktadır.

d) Oksit Lifler: Sürekli ve süreksiz seramik oksit lifler, ticari amaçlar için üretilmektedirler. İşlem ve mikro yapı kontrolü, arzu edilen özellikleri elde etmek için çok iyi yapılmalıdır.

e) Whisker (Metal Partikül Lifler): Whiskerler de diğer lifler gibidir, aynı çaptadırlar fakat genellikle liflere göre daha kısa ve daha küttürler. Diğer lifler gibi kullanılırlar ve onlara göre daha iyi özelliklere sahiptirler. Çelikten imal edilen whiskerler teorik olarak 220000 kg/cm^2'lik kopma mukavemetine sahiptirler. Ama uygulamada mevcut yapı çeliklerinde bu mukavemet 5000-7000 kg/cm^2' arasında değişmektedir [46, 47, 48].

2.5 Lif Takviyeli Polimerik Kompozitlerin Mekanik Analizi

Kompozitlerin mekanik davranışları mikro mekanik ve makro mekanik analizlerle belirlenir. Mikro mekanik analizlerde yapı bileşenlerinin kendi özelliklerinden hareket ederek ve aralarındaki karşılıklı etkileşimleri göz önüne alınarak kompozit malzeme özelliklerinin hangi sınırlar içerisinde değişeceği tahmin edilir. Bu tür analizler kompozit tasarımı açısından oldukça yararlıdır. Makro mekanik analizlerde ise kompozit malzemenin servis koşullarındaki mekanik davranışı incelenir [49].



Şekil 2-1 Kompozit malzemelerin analiz tipleri [50]

2.5.1 Bir Katmanın (Laminenin) Mikro Mekanik Analizi

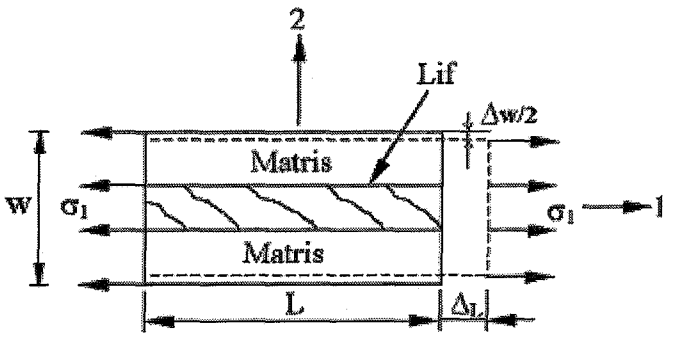
Tabakalı kompozitlerin mikro mekanik analizinde, yapı bileşenleri olan lif ve matris seviyesinde çalışılır. Bu iki yapı bileşeninden hareketle kompozit malzemenin davranışı tahmin edilir. Sürekli lif takviyeli kompozitlerin mikro mekanik analizinde esas alınan varsayımlar [49];

a. Matris homojen, izotropik yapıda olup lineer elastik davranış gösterir.
b. Lifler homojen, izotropik yapıda olup lineer elastik davranış gösterirler, yapı içerisinde düzenli bir dağılım ve kusursuz bir yönlenmeye sahiptirler.
c. Kompozit malzeme ortotropik karakterli olup lineer elastik davranış gösterir.
d. Yapı bileşenlerinde ve kompozitte yapı hataları, iç gerilmeler bulunmamakta ve bileşenler arasında kusursuz ara yüzey bağları bulunmaktadır.

2.5.1.1 Tek Yönlü Bir Katmanın Lif Yönündeki Elastiklik Modülünün (E_1) Hesaplanması

Şekil 2-2'de görüldüğü gibi kompozit malzemeye takviye doğrultusunda bir σ_1 gerilmesinin uygulandığını varsayalım. Temel kabulde hem lifler hem de matris aynı miktarda ε_1 kadar uzar.

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \tag{2-1}$$



Şekil 2-2 Gerilme doğrultusu takviye doğrultusuna paralel durum.

Kompozit malzemeye tesir eden P kuvveti;

$$P = \sigma_1 A \tag{2-2}$$

$$A = A_f + A_m \quad , \quad \sigma_1 = \sigma_f + \sigma_m \tag{2-3}$$

$$P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \tag{2-4}$$

A = Kompozit malzemenin kesit alanı, A_f= Lifin kesit alanı, A_m= Matrisin kesit alanı.

olup malzemenin, lifin ve matrisin uzama miktarları genişlik boyunca (3 yönünde) birbirine eşit alınır. Kompozitteki, lifteki ve matristeki normal gerilmeler,

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad , \quad \sigma_f = E_f \varepsilon_1 \quad , \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_1 \tag{2-5}$$

$$E_1 \varepsilon_1 A = E_f \varepsilon_1 A_f + E_m \varepsilon_1 A_m \tag{2-6}$$

(1) yönündeki elastisite modülü,

$$E_1 = \frac{A_f}{A} E_f + \frac{A_m}{A} E_m \tag{2-7}$$

bulunur. Hacimsel konsantrasyon ise;

$$V_f = \frac{A_f . L}{A . L} = \frac{A_f}{A} \tag{2-8}$$

benzer şekilde matris için, $V_m = \frac{A_m}{A}$ olur.

$$V_m + V_f = 1 \tag{2-9}$$

Yukarıdaki ifadeler (2-7) denkleminde yerlerine yazılırsa aşağıdaki E_1 denklemi elde edilir [46].

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{2-10}$$

2.5.1.2 Poisson Oranının (ν_{12}) Hesaplanması

Kompozit malzemenin Poisson oranını bulmak için Şekil 2-2'de gösterilen durumu göz önüne alalım. Poisson oranı, enine deformasyonun boyuna deformasyona oranı olarak tanımlanır:

$$\upsilon_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{2-11}$$

ve enine şekil değiştirme,

$$\varepsilon_2 = -\frac{\Delta w}{w} \tag{2-12}$$

$$\Delta w = -w\varepsilon_2 = w\varepsilon_1 \nu_{12} \tag{2-13}$$

Δw, matris ve liflerin kısalmasının toplamı olup ($\Delta w = \Delta w_m + \Delta w_f$) şeklinde yazılabilir.

$$\Delta w_m = w V_m \varepsilon_1 \nu_m \tag{2-14}$$

$$\Delta w_f = w V_f \varepsilon_1 \nu_f \tag{2-15}$$

(2-13), (2-14) ve (2-15) eşitliklerinden,

$$w\varepsilon_1 \nu_{12} = w V_f \varepsilon_1 \nu_f + w V_m \varepsilon_1 \nu_m \tag{2-16}$$

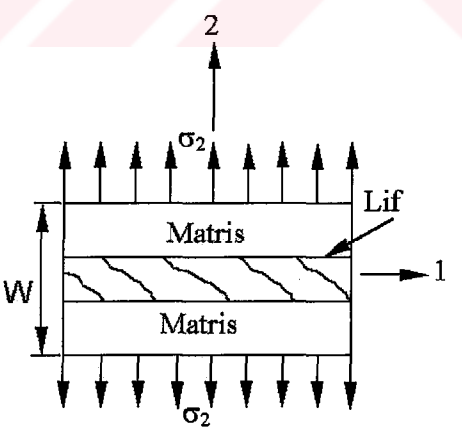
elde edilir ve sadeleştirmeler yapılırsa Poisson oranı;

$$\nu_{12} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \tag{2-17}$$

olarak elde edilir [46].

2.5.1.3 Lif Eksenine Dik Yönde Elastiklik Modülünün (E_2) Hesaplanması

Lif eksenine dik yönde katmana σ_2 gerilmesinin uygulandığını varsayalım. σ gerilmesinin matris ve lifte eşit olarak taşındığını kabul edelim (Şekil 2-3).



Şekil 2-3 Lifin hacimsel konsantrasyonuna bağlı olarak E_2'nin değişimi

$$\sigma_m = \sigma_f = \sigma_{kompozit} \tag{2-18}$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \tag{2-19}$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \tag{2-20}$$

$$\sigma_{kom} = E_2 \varepsilon_2 \tag{2-21}$$

P yükü uygulandığı zaman w kalınlıklı kompozit malzeme Δw kadar uzuyorsa, bu uzama matrisin (Δw_m) ve lifin (Δw_f) uzamalarının toplamına eşit olur. Yani,

$$\Delta w = \Delta w_m + \Delta w_f \tag{2-22}$$

Burada, $\Delta \mathrm{w} = \mathrm{w}\varepsilon_2$, $\Delta \mathrm{w}_m = \mathrm{w}_m \varepsilon_m$, $\Delta \mathrm{w}_f = \mathrm{w}_f \varepsilon_f$ şeklinde yazılabilir. Dik yöndeki plakanın, matrisin ve lifin şekil değiştirmeleri,

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta \mathrm{w}}{\mathrm{w}}, \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta \mathrm{w}_\mathrm{m}}{\mathrm{w}_\mathrm{m}}, \quad \varepsilon_f = \frac{\Delta \mathrm{w}_\mathrm{f}}{\mathrm{w}_\mathrm{f}} \tag{2-23}$$

dir ve hacimsel oranları

$$\mathrm{V}_\mathrm{m} = \frac{\mathrm{w}_\mathrm{m}}{\mathrm{w}} \qquad \mathrm{V}_\mathrm{f} = \frac{\mathrm{w}_\mathrm{f}}{\mathrm{w}} \tag{2-24}$$

(2-19) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 \mathrm{w} &= \varepsilon_m \mathrm{w} V_m + \varepsilon_f \mathrm{w} V_f \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \end{aligned} \tag{2-25}$$

bulunur. (2-20), (2-21) ve (2-22) eşitlikleri (2-23) eşitliğinde yerlerine yazılıp sadeleştirme yapılarak lif eksenine dik yöndeki elastiklik matrisi bulunur.

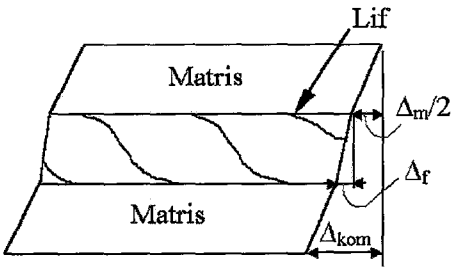
$$\frac{\sigma_{\mathrm{kom}}}{\mathrm{E}_2} = \frac{\sigma_\mathrm{f}}{\mathrm{E}_\mathrm{f}} \mathrm{V}_\mathrm{f} + \frac{\sigma_\mathrm{m}}{\mathrm{E}_\mathrm{m}} \mathrm{V}_\mathrm{m} \tag{2-26}$$

$$\frac{1}{\mathrm{E}_2} = \frac{1}{\mathrm{E}_\mathrm{f}} \mathrm{V}_\mathrm{f} + \frac{1}{\mathrm{E}_\mathrm{m}} \mathrm{V}_\mathrm{m} \tag{2-27}$$

$\mathrm{E}_1 > \mathrm{E}_2$ 'dir ve genellikle $\mathrm{E}_\mathrm{f} > \mathrm{E}_\mathrm{m}$ 'dir [46].

2.5.1.4 Kayma Modülünün (G_{12}) Hesaplanması

Kompozit malzemeden w kalınlığında ve ℓ boyunda alınan deney parçalarına kayma gerilmeleri uygulandığında, parçalar Şekil 2-4'de görüldüğü gibi bir şekil değişimine uğrar.



Şekil 2-4 Kompozit parçanın kayması

Şekil 2-4'deki abartılarak çizilmiş olan şekil değişimi gerçekte çok küçüktür. Bu sebepten dolayı şekil değişiminden sonra parça kalınlığının (w) sabit kaldığı kabul edilir. γ_m matrisin ve γ_f lifin τ kayma gerilmesi altında dönme açılarıdır. Kompozit malzemeden alınan w kalınlığındaki parçalarda dönmeler çok küçük olduğundan dönme açılarının tanjantları radyan olarak açının kendisine eşittir.

$$\Delta_{kom} = w\gamma_{12} \;, \quad \Delta_{kom} = \Delta_m + \Delta_f \tag{2-28}$$

Hooke Kanunu gereği kayma açıları

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \;, \qquad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \;, \qquad \gamma_{12} = \frac{\tau}{G_{12}} \tag{2-29}$$

karşı yatay yerdeğiştirmeler (lif ve matris)

$$\Delta_f = wV_f\gamma_f \;, \quad \Delta_m = wV_m\gamma_m \tag{2-30}$$

kompozitte oluşan yatay yerdeğiştirme

$$\Delta_{kom} = w\gamma_{12} = wV_m\gamma_m + wV_f\gamma_f \tag{2-31}$$

kompozit plakanın kayma açısı

$$\gamma_{12} = V_m\gamma_m + V_f\gamma_f \tag{2-32}$$

bulunur. (2-32) eşitliğinde (2-29) eşitliği yerlerine yazılırsa;

$$\frac{\tau}{G_{12}} = \frac{\tau}{G_m}V_m + \frac{\tau}{G_f}V_f \tag{2-33}$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_m}V_m + \frac{1}{G_f}V_f \tag{2-34}$$

kompozitin kayma modülü (2-34) eşitliğindeki gibi elde edilir [46].

2.5.2 Bir Katmanın Makro Mekanik Analizi

Tabakalı kompozitlerin makro mekanik analizi, tek tek katmanların yapısal davranışları ile alakalıdır. Bu bölümde, gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ile katmanların davranışlarını içeren analizler verilmiştir. Yani, bir noktadaki gerilme hali ile şekil değiştirmelerin nasıl belirlendiği izah edilecektir. Gerilme-şekil değiştirme bağıntılarına katmanın *rijitlik (stiffness) analizi* denir. Katmanın rijitlik analizinde dikkate alınan kriterler [49];

a. Küçük deformasyonlar teorisi dikkate alınır. Problemler büyük deformasyonlar ile bağlantılı olsa bile lineer olmayan geometri yok sayılır.
b. Ayrıca Lineer Elastisite Teorisi dikkate alınır. Yani, Hooke Kanunu uygulanır.
c. Düzlem gerilme hali mevcuttur. Bu nedenle gerilme hali iki boyutludur, normal veya kayma gerilmesi düzlem dışında mevcut değildir.
d. Makroskobik ölçekte katman homojen kabul edilir, yani özellikler partiküller boyunca bir noktadan diğer noktaya değişmez.

2.5.2.1 Ortotropik Katmanlar İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Bağıntıları

Lif/matris takviyeli kompozit üretimi esnasında, istenilen kompozit kalınlığını sağlamak için liflerin çok katlı, düz veya değişik yönlü ve doğrultulu düzenlenmesi gerekir. Bu düzenleme üretilecek parçaya bağlıdır ve eğer izotropik özellik isteniyorsa lifler rasgele, ortotropik özellik isteniyorsa ortogonal yönlü veya tek yönlü olarak yönlendirilir. Bir kompozit malzemede; lifler tek yönlü sürekli veya iki yönlü takviyeli olarak düzenlenirse lif doğrultusunda yüksek dayanım ve rijitlik elde edilebilir. Tek yönlü doğrultuda yapılan lif düzenlemesinde yüksek dayanım ve elastik modülü değeri life dik doğrultudaki düzenleme ile karşılaştırıldığında lif eksenine paralel doğrultuda elde edilecektir. İki yönlü doğrultuda ise; yani lifler hem eksene paralel hem de dik yönde takviyelendirilen kompozitte ise iki ortogonal yönde dayanım ve elastik modülü eşit olur. Böyle kompozitler, birbirlerine dik doğrultuda iki eksende simetrik malzeme özelliği gösterir ve "*ortotropik*" olarak adlandırılır. Bu kompozitlerin özellikleri daha karmaşıktır [51].

Genel Hooke Kanunu;

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \tag{2-35}$$

burada σ_i gerilme tensörü, ε_j şekil değiştirme tensörü ve C_{ij} rijitlik tensörüdür. Hooke kanununu matris formunda yazacak olursak;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = [C] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \tag{2-36}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \tag{2-37}$$

şeklinde yazılır. Rijitlik tensörü elemanları ortotropik malzemeler için aşağıdaki eşitlikte görüldüğü gibi 9 bağımsız elemana sahiptir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \tag{2-38}$$

Şekil değiştirmeleri gerilme cinsinden ifade edecek olursak;

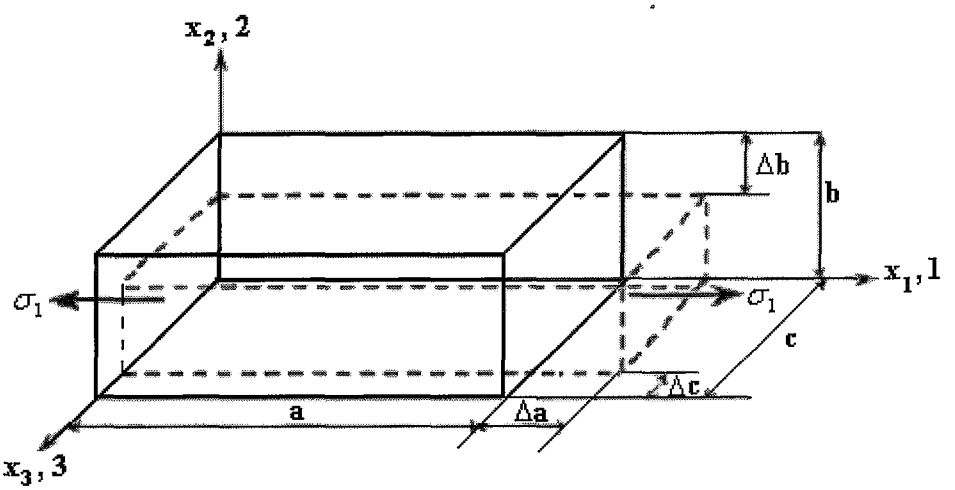
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \tag{2-39}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \tag{2-40}$$

şeklinde yazılır. Burada $[S_{ij}]$ elastiklik tensörüdür. Rijitlik tensörü ve elastiklik tensörü elemanlarını, matematiksel olarak ifade edilebilme özelliklerinden kurtarıp daha açık ve fiziksel anlama sahip mühendislik sabiteleri ile tanımlamak gerekir. Bunun içinde mühendislik sabitelerinin bilinmesi şarttır. Bilinen bir yük veya gerilme yardımı ile gerçekleştirilen basit çekme veya kayma deneyleri ile bir malzemenin mühendislik sabiteleri bulunur. Ayrıca deneyler $[S_{ij}]$ elastiklik matrisinin ve $[C_{ij}]$ rijitlik matrisinin elemanlarının elastisite modülü (E) ve kayma modülü (G) cinsinden tanımlanmasını da sağlar.

Herhangi bir elastik cisme x_1 ekseni doğrultusunda σ_1 çekme gerilmesi uygulandığında, malzeme gerilmenin uygulandığı eksende boyuna elastisite modülüne bağlı olarak uzar. Bu uzama esnasında malzemenin hacmi değişmeyeceğine göre x_2 ve x_3 eksenleri boyunca olan malzeme boyutları kısalır.



Şekil 2-5 Tek eksenli gerilme hali.

Yukarıdaki şekildeki gerilme durumuna özgü gerilme ve şekil değiştirme bağıntıları,

$$V = abc \qquad (V : \text{cismin hacmi}) \tag{2-41}$$

Hacim, V değişmez olduğundan şekil değiştirdikten sonra

$$V = (a + \Delta a)(b - \Delta b)(c - \Delta c) \tag{2-42}$$

olur. Bu durumda, gerilme ve şekil değiştirmeler

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_{12}\varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{13}\varepsilon_1 \end{bmatrix} \tag{2-43}$$

olur. Genel durumda;

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \qquad (i,j=1,2,3)$$

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j$$

Elastik cisim x_1 ekseni yönünde çekiye zorlandığında (i =1);

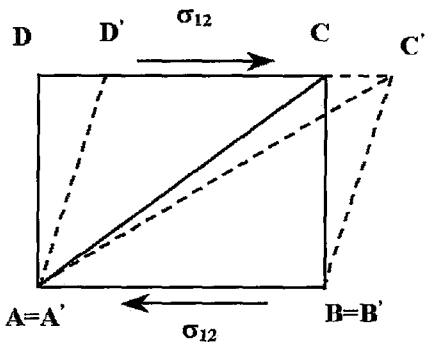
$$S_{11} = \frac{1}{E_1} \quad , \quad S_{21} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \quad , \quad S_{31} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} \tag{2-44}$$

Elastik cisim x_2 ekseni yönünde çekiye zorlandığında (i =2);

$$S_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \quad , \quad S_{22} = \frac{1}{E_2} \quad , \quad S_{32} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} \tag{2-45}$$

Daha sonra cisim x_3 ekseni doğrultusunda çekiye zorlandığında (i =3);

$$S_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_3} \quad , \quad S_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_3} \quad , \quad S_{33} = \frac{1}{E_3} \tag{2-46}$$



Şekil 2-6 Tam kayma gerilmesi hali

Böylece (2-44), (2-45) ve (2-46) eşitliklerine göre elastiklik matrisinin elemanları malzemenin mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilmiş olur. Bilindiği üzere

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (i,j=1,2,3) \tag{2-47}$$

eşitliği yazılabilir.

Eğer elastik cisim yalnızca kayma gerilmesinin etkisinde kalır ise $G_{ij}=x_i$-x_j düzlemindeki kayma modülü olmak üzere Şekil 2-6'da görülenler ortaya çıkar.

$$S_{12} = S_{66} \tag{2-48}$$

$$\left[\gamma_{12} = \frac{\sigma_{12}}{G_{12}}\right] \tag{2-49}$$

$$S_{66} = \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G_{21}} \;,\; S_{44} = \frac{1}{G_{23}} \;,\; S_{55} = \frac{1}{G_{13}} \tag{2-50}$$

(2-44) eşitliğinden (2-50) eşitliğine kadar olan denklemden görüldüğü üzere anizotropik malzemelerde bağımsız matematiksel ifadeye sahip olan rijitlik ve elastiklik matrisleri;

$$\begin{array}{cccc} E_1 & G_1 & \nu_{12} & \nu_{21} \\ E_2 & G_2 & \nu_{13} & \nu_{31} \\ E_3 & G_3 & \nu_{23} & \nu_{32} \end{array} \tag{2-51}$$

olmak üzere 12 adet fiziksel mühendislik sabiteleri ile ifade edilir. Buna göre elastiklik matrisi bu sabiteler cinsinden yazılacak olursa;

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \tag{2-52}$$

Ortotropik bir malzeme için rijitlik matrisi elemanları ise mühendislik sabitleri cinsinden;

$$
\begin{aligned}
C_{11} &= \frac{1-\nu_{23}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} \\
C_{12} &= \frac{\nu_{21}+\nu_{31}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta} = \frac{\nu_{12}+\nu_{32}\nu_{13}}{E_2E_3\Delta} \\
C_{13} &= \frac{\nu_{31}+\nu_{21}\nu_{32}}{E_2E_3\Delta} = \frac{\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23}}{E_2E_3\Delta} \\
C_{22} &= \frac{1-\nu_{13}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta} \\
C_{23} &= \frac{\nu_{32}+\nu_{12}\nu_{31}}{E_1E_3\Delta} = \frac{\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{13}}{E_1E_3\Delta} \\
C_{33} &= \frac{1-\nu_{12}\nu_{21}}{E_1E_2\Delta} \\
C_{44} &= G_{23} \\
C_{55} &= G_{31} \\
C_{66} &= G_{12}
\end{aligned}
\qquad (2\text{-}53)
$$

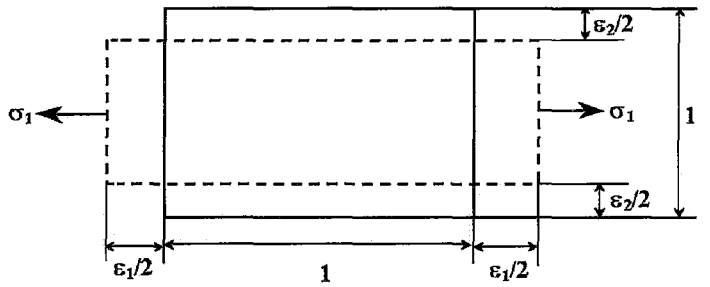
burada $\Delta = \dfrac{1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{31}\nu_{13}-2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1E_2E_3}$ 'dir.

Söz konusu elastik malzemenin E_1, E_2 ve E_3 sırasıyla x_1, x_2 ve x_3 eksenleri doğrultusundaki elastisite modüllerini ve G_{12} , G_{23} ve G_{31} ise aynı eksenin ilgili düzlemindeki kayma modüllerini belirtmektedir.

Poisson oranı, "ν_{ij}" ise elastik malzemenin j doğrultusundaki şekil değiştirmesinin i doğrultusundaki şekil değiştirmeye oranını gösterir. Elastik malzeme her hangi bir σ_i çekme gerilmesi altında i ekseni boyunca ε_i kadar şekil değiştirdiğinde, aynı zamanda j ekseni doğrultusunda da ε_j kadar (kısalma veya çekilme) şekil değiştirmeye maruz kalır. İşte bu şekil değiştirmelerin birbirlerine olan oranları;

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} \qquad (2\text{-}54)$$

"*Poisson oranı*" olarak tanımlanır. O halde tüm düzlemlerde $\nu_{12} = -\dfrac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$; $\nu_{13} = -\dfrac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}$; $\nu_{23} = -\dfrac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}$ olarak ifade edilir. Şekil 2-5'de verilen tek eksenli gerilme hali yandan görünüş olarak çizilirse;



Şekil 2-7 Tek eksenli gerilme (yandan görünüş)

Ortotropik bir malzemede x_1 ve x_2 düzlemine göre simetrinin mevcut olması halinde fiziksel sabiteler;

$$E_1 = E_2,\ E_3$$
$$\nu_{12} = \nu_{21}\ ,\qquad \nu_{13} = \nu_{31}\ ,\qquad \nu_{32} = \nu_{23}$$
$$G_{12} = \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})}\ ,\ G_{23} = G_{13}$$

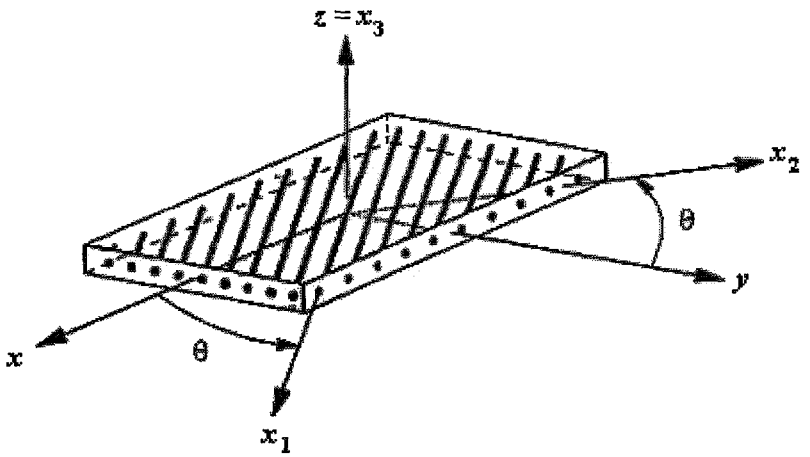
olarak yazılabileceğinden mühendislik sabitleri sadece elastisite modülleri ve Poisson oranlarından olmak üzere beş bağımsız değişkenle ifade edilir. Böyle bir malzeme için katılık veya rijitlik matrislerinin elemanları Q_{ij} şeklinde gösterilirse;

$$\begin{aligned} Q_{ij} &= C_{ij} \qquad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \\ Q_{ii} &= \frac{C_{ii}}{2} \qquad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \\ Q_{66} &= \frac{C_{66}}{2} = \frac{C_{36}}{2C_{33}} \end{aligned} \tag{2-55}$$

elde edilir [46].

2.5.2.2 Keyfi Takviyeli Kompozitler İçin Gerilme ve Şekil Değiştirme Bağıntıları

Bundan önceki bölümlerde ortotropik malzemenin asal koordinat sisteminde gerilme şekil değiştirme bağıntıları tanımlanmıştı. Bu hal özel bir durum olup genelde malzeme asal eksen doğrultusundan farklı doğrultularda yüke maruz kalır. Yani bu eksenler asal gerilme eksenlerinden Şekil 2-8'da olduğu gibi θ açısı kadar dönmüş olan doğrultularda yer alırlar.



Şekil 2-8 Lif takviyeli bir katmanın problem ve malzeme koordinat sistemleri.

Şekil 2-8'de görüldüğü gibi, asal malzeme doğrultuları θ açısı kadar dönmüş *1*, *2* ve *3* eksenleri olan ortotropik kompozit malzemenin üzerine uygulanmakta olan gerilmeler, *x*, *y* ve *z* eksenleri doğrultusunda olduğunda dönüşüm denklemlerinin yazılması gerekir.

Gerilme dönüşümünü elastisite teorisinden faydalanarak irdeleyecek olursak;

$$(\sigma_{ik})_m = \ell_{ij}\,\ell_{km}\,(\sigma_{jm})_p \qquad (i,j,k,l = 1,2,\ldots,6) \tag{2-56}$$

Burada $(\sigma_{ik})_m$ malzeme asal eksenlerinde gerilme tensörü,

$$[\sigma]_m = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{32} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \tag{2-57}$$

$(\sigma_{jm})_p$ problem koordinatlarındaki gerilme tensörü

$$[\sigma]_p = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \tag{2-58}$$

ve ℓ_{ij} de kosinüs doğrultmanları tensörüdür. (2-56) denklemini açarsak;

$$\begin{aligned}
\sigma_{11} &= \sigma_{xx}\ell_{11}^2 + \sigma_{yy}\ell_{12}^2 + \sigma_{zz}\ell_{13}^2 + 2\sigma_{xy}\ell_{11}\ell_{12} + 2\sigma_{xz}\ell_{11}\ell_{13} \\
&\quad + 2\sigma_{yz}\ell_{11}\ell_{13} \\
\sigma_{22} &= \sigma_{xx}\ell_{21}^2 + \sigma_{yy}\ell_{22}^2 + \sigma_{zz}\ell_{23}^2 + 2\sigma_{xy}\ell_{21}\ell_{22} + 2\sigma_{xz}\ell_{21}\ell_{23} \\
&\quad + 2\sigma_{yz}\ell_{22}\ell_{23} \\
\sigma_{33} &= \sigma_{xx}\ell_{31}^2 + \sigma_{yy}\ell_{32}^2 + \sigma_{zz}\ell_{33}^2 + 2\sigma_{xy}\ell_{31}\ell_{32} + 2\sigma_{xz}\ell_{31}\ell_{33} \\
&\quad + 2\sigma_{yz}\ell_{32}\ell_{33}
\end{aligned} \tag{2-59a}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{23} &= (\sigma_{xx}\ell_{21}+\sigma_{yx}\ell_{22}+\sigma_{zx}\ell_{23})\ell_{31}+(\sigma_{xy}\ell_{21}+\sigma_{yy}\ell_{22}+\sigma_{zy}\ell_{23})\ell_{32} \\
&\quad +(\sigma_{xz}\ell_{21}+\sigma_{yz}\ell_{22}+\sigma_{zz}\ell_{23})\ell_{33} \\
\sigma_{31} &= (\sigma_{xx}\ell_{11}+\sigma_{yx}\ell_{12}+\sigma_{zx}\ell_{13})\ell_{31}+(\sigma_{xy}\ell_{11}+\sigma_{yy}\ell_{12}+\sigma_{zy}\ell_{13})\ell_{32} \\
&\quad +(\sigma_{xz}\ell_{11}+\sigma_{yz}\ell_{13}+\sigma_{zz}\ell_{13})\ell_{33} \\
\sigma_{12} &= (\sigma_{xx}\ell_{11}+\sigma_{yx}\ell_{12}+\sigma_{zx}\ell_{13})\ell_{21}+(\sigma_{xy}\ell_{11}+\sigma_{yy}\ell_{12}+\sigma_{zy}\ell_{13})\ell_{22} \\
&\quad +(\sigma_{xz}\ell_{11}+\sigma_{yz}\ell_{12}+\sigma_{zz}\ell_{13})\ell_{23}
\end{aligned} \tag{2-59b}$$

Şekil 2-8'deki duruma göre kosinüs doğrultmanları aşağıdaki gibidir;

$$[\ell] = \begin{bmatrix} \ell_{11} & \ell_{12} & \ell_{13} \\ \ell_{21} & \ell_{22} & \ell_{23} \\ \ell_{31} & \ell_{32} & \ell_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2-60}$$

Denklem (2-59)'da kosinüs doğrultmanlarının yerine (2-60)'daki değerleri yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa;

$$\begin{aligned}
\sigma_{11} &= \sigma_{xx}\cos^2\theta+\sigma_{yy}\sin^2\theta-2\sigma_{xy}\cos\theta\sin\theta \\
\sigma_{22} &= \sigma_{xx}\sin^2\theta+\sigma_{yy}\cos^2\theta+2\sigma_{xy}\sin\theta\cos\theta \\
\sigma_{33} &= \sigma_{zz} \\
\sigma_{23} &= \sigma_{xz}\sin\theta+\sigma_{yz}\cos\theta \\
\sigma_{31} &= \sigma_{xz}\cos\theta \\
\sigma_{12} &= (\sigma_{xx}\cos\theta-\sigma_{xy}\sin\theta)\sin\theta+(\sigma_{xy}\cos\theta-\sigma_{yy}\sin\theta)\cos\theta
\end{aligned} \tag{2-61}$$

(2-61) eşitliğinin dönüşüm matrisini [T] ile gösterip eşitlikten faydalanarak bu matris yazılacak olursa;

$$[T]=\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 0 & 0 & 0 & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 0 & 0 & 0 & 2\sin\theta\cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\theta & 0 \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & 0 & 0 & 0 & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{2-62}$$

şeklinde gösterilebilir. Bundan sonra elemanda oluşan gerilme dönüşümü (2-62) eşitliğindeki [T] matrisinin yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix}_p = [\mathrm{T}] \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}_{\mathrm{m}} \tag{2-63}$$

$$\{\sigma\}_p = [\mathrm{T}]\{\sigma\}_m = [\mathrm{T}][\mathrm{Q}]_m\{\varepsilon\}_m = [\mathrm{T}][\mathrm{Q}]_m[\mathrm{T}]^T\{\varepsilon\}_P \tag{2-64}$$

burada $\{\varepsilon\}_m$ *1, 2* ve *3* eksenlerinde şekil değiştirme matrisi, $\{\varepsilon\}_p$ *x, y* ve *z* yönlerinde şekil değiştirme matrisi, $[\mathrm{Q}]_m$ *1, 2* ve *3* eksenlerinde rijitlik matrisi, $[\mathrm{Q}]_p$ *x, y* ve *z* yönlerinde rijitlik matrisidir. Sonuç olarak *1, 2* ve *3* eksenlerinde Hooke Kanunu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\{\sigma\}_p = [\mathrm{Q}]_p\{\varepsilon\}_P \tag{2-65}$$

(2-64) ve (2-65) eşitliklerinden $[\mathrm{Q}]_p \equiv [\overline{\mathrm{Q}}]$ ve $[\mathrm{Q}]_m \equiv [\overline{\mathrm{Q}}]$ yazılırsa;

$$[\overline{\mathrm{Q}}] = [T][C][T]^T \tag{2-66}$$

(2-65) eşitliğinde (2-66) eşitliğini yerine koyarsak;

$$\{\sigma\}_p = [\overline{\mathrm{Q}}]\ \{\varepsilon\}_P \tag{2-67}$$

(2-67) eşitliği açılacak olursa;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_p = [\overline{\mathrm{Q}}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\gamma_{yz} \\ 2\gamma_{xz} \\ 2\gamma_{xy} \end{Bmatrix}_p \tag{2-68}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_p = \begin{bmatrix} \overline{\mathrm{Q}}_{11} & \overline{\mathrm{Q}}_{12} & \overline{\mathrm{Q}}_{13} & 0 & 0 & \overline{\mathrm{Q}}_{16} \\ \overline{\mathrm{Q}}_{21} & \overline{\mathrm{Q}}_{22} & \overline{\mathrm{Q}}_{23} & 0 & 0 & \overline{\mathrm{Q}}_{26} \\ \overline{\mathrm{Q}}_{31} & \overline{\mathrm{Q}}_{32} & \overline{\mathrm{Q}}_{33} & 0 & 0 & \overline{\mathrm{Q}}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{\mathrm{Q}}_{44} & \overline{\mathrm{Q}}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{\mathrm{Q}}_{45} & \overline{\mathrm{Q}}_{55} & 0 \\ \overline{\mathrm{Q}}_{16} & \overline{\mathrm{Q}}_{26} & \overline{\mathrm{Q}}_{36} & 0 & 0 & \overline{\mathrm{Q}}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\gamma_{yz} \\ 2\gamma_{xz} \\ 2\gamma_{xy} \end{Bmatrix}_p \tag{2-69}$$

$[\overline{\mathrm{Q}}]$ matrisinin elemanlarını θ ve $[Q]$ bileşenleri cinsinden yazılacak olursa;

$$
\begin{aligned}
\overline{Q}_{11} &= Q_{11}\cos^4\theta - 4Q_{16}\cos^3\theta\sin\theta + 2(Q_{12}+2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad - 4Q_{26}\cos\theta\sin^3\theta + Q_{22}\sin^4\theta \\
\overline{Q}_{12} &= Q_{12}\cos^4\theta + 2(Q_{16}-Q_{26})\sin\theta\cos^3\theta + (Q_{11}+Q_{22}-4Q_{66})\cos^2\theta\sin^2\theta \\
&\quad + 2(Q_{26}-Q_{16})\cos\theta\sin^3\theta + Q_{12}\sin^4\theta \\
\overline{Q}_{13} &= Q_{13}\cos^2\theta - 2Q_{36}\sin\theta\cos\theta + Q_{23}\sin^2\theta \\
\overline{Q}_{16} &= Q_{16}\cos^4\theta + (Q_{11}-Q_{12}-2Q_{66})\sin\theta\cos^3\theta + 3(Q_{26}-Q_{16})\cos^2\theta\sin^2\theta \\
&\quad (Q_{12}-Q_{22}+2Q_{66})\sin^3\theta\cos\theta - Q_{26}\sin^4\theta \\
\overline{Q}_{22} &= Q_{22}\cos^4\theta + 4Q_{26}\cos^3\theta\sin\theta + 2(Q_{12}+2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad + 4Q_{16}\cos\theta\sin^3\theta + Q_{11}\sin^4\theta \\
\overline{Q}_{23} &= Q_{23}\cos^2\theta + 2Q_{36}\cos\theta\sin\theta + Q_{13}\sin^2\theta \\
\overline{Q}_{26} &= Q_{26}\cos^4\theta + (Q_{12}-Q_{22}+2Q_{66})\cos^3\theta\sin\theta + 3(Q_{16}-Q_{26})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad + (Q_{11}-Q_{12}-2Q_{66})\cos\theta\sin^3\theta - Q_{16}\sin^4\theta \\
\overline{Q}_{33} &= Q_{33} \\
\overline{Q}_{36} &= (Q_{13}-Q_{23})\cos\theta\sin\theta + Q_{36}(\cos^2\theta-\sin^2\theta) \\
\overline{Q}_{14} &= Q_{14}\cos^3\theta + (Q_{15}-2Q_{46})\cos^2\theta\sin\theta + (Q_{24}-2Q_{56})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad + Q_{25}\sin^3\theta \\
\overline{Q}_{15} &= Q_{15}\cos^3\theta - (Q_{14}+2Q_{56})\cos^2\theta\sin\theta + (Q_{25}+2Q_{46})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad - Q_{24}\sin^3\theta \\
\overline{Q}_{66} &= 2(Q_{16}-Q_{26})\cos^3\theta\sin\theta + (Q_{11}+Q_{22}-2Q_{12}-2Q_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad 2(Q_{26}-Q_{16})\cos\theta\sin^3\theta + Q_{66}(\cos^4\theta+\sin^4\theta) \\
\overline{Q}_{24} &= Q_{24}\cos^3\theta + (Q_{25}+2Q_{46})\cos^2\theta\sin\theta + (Q_{14}+2Q_{56})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad + Q_{15}\sin^3\theta \\
\overline{Q}_{25} &= Q_{25}\cos^3\theta + (2Q_{56}-Q_{24})\cos^2\theta\sin\theta + (Q_{15}-2Q_{46})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad - Q_{14}\sin^3\theta \\
\overline{Q}_{34} &= Q_{34}\cos\theta + Q_{35}\sin\theta \\
\overline{Q}_{35} &= Q_{35}\cos\theta - Q_{34}\sin\theta \\
\overline{Q}_{44} &= Q_{44}\cos^2\theta + Q_{55}\sin^2\theta + 2Q_{45}\sin\theta\cos\theta \\
\overline{Q}_{45} &= Q_{45}(\cos^2\theta-\sin^2\theta) + (Q_{55}-Q_{44})\sin\theta\cos\theta \\
\overline{Q}_{55} &= Q_{55}\cos^2\theta + Q_{44}\sin^2\theta - 2Q_{45}\sin\theta\cos\theta \\
\overline{Q}_{46} &= Q_{46}\cos^3\theta + (Q_{56}+Q_{14}-Q_{24})\cos^2\theta\sin\theta + (Q_{15}-Q_{25}-Q_{46})\sin^2\theta\cos\theta \\
&\quad - Q_{56}\sin^3\theta \\
\overline{Q}_{56} &= Q_{56}\cos^3\theta + (Q_{15}-Q_{25}-Q_{46})\cos^2\theta\sin\theta + (Q_{24}-Q_{14}-Q_{56})\sin^2\theta\cos\theta \\
&\quad + Q_{46}\sin^3\theta
\end{aligned}
\tag{2-70}
$$

$\overline{Q}_{ij}$ matrisi daha önce tanımlanmış olan Q_{ij} rijitlik matrisinin yerine dönüştürülmüş veya bir başka deyişle indirgenmiş rijitlik matrisini göstermektedir. Şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade edebilmek için indirgenmiş $\overline{Q}_{ij}$ matrisine benzer tarzda indirgenmiş $\overline{S}_{ij}$ elastiklik matrisi tanımlamak gerekir.

$$\{\varepsilon\}_p = [R]^T \{\varepsilon\}_m = [R]^T ([S]_m \{\sigma\}_m) = [R]^T [S]_m [R] \{\sigma\}_P \equiv [S]_p \{\sigma\}_P \tag{2-71}$$

burada $[R]$ şekil değiştirme dönüşüm matrisi, $[R]^T$ ise $[R]$ matrisinin transpozesi, $[S]_m$ *1, 2* ve *3* eksenlerinde elastiklik matrisi, $[S]_p$ *x, y* ve *z* yönlerinde elastiklik matrisidir. Sonuç olarak şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade edecek olursak;

$$\{\varepsilon\}_P = [S]_p \{\sigma\}_p$$

$$[S]_p \equiv [\overline{S}] \tag{2-72}$$

$$[S]_m \equiv [\overline{S}]$$

$$\{\varepsilon\}_P = [\overline{S}] \{\sigma\}_p \tag{2-73}$$

(2-73) eşitliği açılacak olursa;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\gamma_{yz} \\ 2\gamma_{xz} \\ 2\gamma_{xy} \end{Bmatrix}_p = [\overline{S}] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_p \tag{2-74}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\gamma_{yz} \\ 2\gamma_{xz} \\ 2\gamma_{xy} \end{Bmatrix}_p = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & \overline{S}_{13} & 0 & 0 & \overline{S}_{16} \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & \overline{S}_{23} & 0 & 0 & \overline{S}_{26} \\ \overline{S}_{31} & \overline{S}_{32} & \overline{S}_{33} & 0 & 0 & \overline{S}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{S}_{44} & \overline{S}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{S}_{45} & \overline{S}_{55} & 0 \\ \overline{S}_{16} & \overline{S}_{26} & \overline{S}_{36} & 0 & 0 & \overline{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_p \tag{2-75}$$

$[\overline{S}]$ matrisinin elemanları θ ve [*S*] bileşenleri cinsinden yazılacak olursa, [52].

$$
\begin{aligned}
\bar{S}_{11} &= S_{11}\cos^4\theta - 2S_{16}\cos^3\theta\sin\theta + (2S_{12}+S_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad - 2S_{26}\cos\theta\sin^3\theta + S_{22}\sin^4\theta \\
\bar{S}_{12} &= S_{12}\cos^4\theta + (S_{16}-S_{26})\sin\theta\cos^3\theta + (S_{11}+S_{22}-S_{66})\cos^2\theta\sin^2\theta \\
&\quad + (S_{26}-S_{16})\cos\theta\sin^3\theta + S_{12}\sin^4\theta \\
\bar{S}_{13} &= S_{13}\cos^2\theta - S_{36}\sin\theta\cos\theta + S_{23}\sin^2\theta \\
\bar{S}_{16} &= S_{16}\cos^4\theta + (2S_{11}-2S_{12}-S_{66})\sin\theta\cos^3\theta + 3(S_{26}-S_{16})\cos^2\theta\sin^2\theta \\
&\quad (2S_{12}-2S_{22}+S_{66})\sin^3\theta\cos\theta - S_{26}\sin^4\theta \\
\bar{S}_{22} &= S_{22}\cos^4\theta + 2S_{26}\cos^3\theta\sin\theta + (2S_{12}+S_{66})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad + 2S_{16}\cos\theta\sin^3\theta + S_{11}\sin^4\theta \\
\bar{S}_{23} &= S_{23}\cos^2\theta + S_{36}\cos\theta\sin\theta + S_{13}\sin^2\theta \\
\bar{S}_{26} &= S_{26}\cos^4\theta + (2S_{12}-2S_{22}+S_{66})\cos^3\theta\sin\theta + 3(S_{16}-S_{26})\sin^2\theta\cos^2\theta \\
&\quad + (2S_{11}-2S_{12}-S_{66})\cos\theta\sin^3\theta - S_{16}\sin^4\theta \\
\bar{S}_{33} &= S_{33} \\
\bar{S}_{36} &= 2(S_{13}-S_{23})\cos\theta\sin\theta + S_{36}(\cos^2\theta-\sin^2\theta) \\
\bar{S}_{14} &= S_{14}\cos^3\theta + (S_{15}-S_{46})\cos^2\theta\sin\theta + (S_{24}-S_{56})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad + S_{25}\sin^3\theta \\
\bar{S}_{15} &= S_{15}\cos^3\theta - (S_{14}+S_{56})\cos^2\theta\sin\theta + (S_{25}+S_{46})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad - S_{24}\sin^3\theta \\
\bar{S}_{24} &= S_{24}\cos^3\theta + (S_{25}+S_{46})\cos^2\theta\sin\theta + (S_{14}+S_{56})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad + S_{15}\sin^3\theta \\
\bar{S}_{25} &= S_{25}\cos^3\theta + (S_{56}-S_{24})\cos^2\theta\sin\theta + (S_{15}-S_{46})\cos\theta\sin^2\theta \\
&\quad - S_{14}\sin^3\theta \\
\bar{S}_{34} &= S_{34}\cos\theta + S_{35}\sin\theta \\
\bar{S}_{35} &= S_{35}\cos\theta - S_{34}\sin\theta \\
\bar{S}_{44} &= S_{44}\cos^2\theta + S_{55}\sin^2\theta + 2S_{45}\sin\theta\cos\theta \\
\bar{S}_{45} &= S_{45}(\cos^2\theta-\sin^2\theta) + (S_{55}-S_{44})\sin\theta\cos\theta \\
\bar{S}_{55} &= S_{55}\cos^2\theta + S_{44}\sin^2\theta - 2S_{45}\sin\theta\cos\theta \\
\bar{S}_{46} &= S_{46}\cos^3\theta + (S_{56}+2S_{14}-2S_{24})\cos^2\theta\sin\theta \\
&\quad + (2S_{15}-2S_{25}-S_{46})\sin^2\theta\cos\theta - S_{56}\sin^3\theta \\
\bar{S}_{56} &= S_{56}\cos^3\theta + (2S_{15}-2S_{25}-S_{46})\cos^2\theta\sin\theta \\
&\quad + (2S_{24}-2S_{14}-S_{56})\sin^2\theta\cos\theta + S_{46}\sin^3\theta \\
\bar{S}_{66} &= 4(S_{16}-S_{26})(\cos^2\theta-\sin^2\theta)\cos\theta\sin\theta \\
&\quad + 4(S_{11}+S_{22}-2S_{12})\sin^2\theta\cos^2\theta + S_{66}(\cos^2\theta-\sin^2\theta)^2
\end{aligned}
\qquad (2\text{-}76)
$$

2.6 Sonlu Elemanlar Formülasyonu

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

$$\prod_p = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon_0\} + \{\varepsilon\}^T \{\sigma_0\} \right\} dV - \int_V \{u\}^T \{F\} dV - \int_S \{u\}^T \{\phi\} dS - \{Q\}^T \{P\} \tag{2-77}$$

burada $\{u\}$ yer değiştirme alanı, $\{\varepsilon\}$ şekil değiştirme alanı, $[D]$ malzeme mekanik özellik matrisi, $\{\varepsilon_0\}$, $\{\sigma_0\}$ başlangıç şekil değiştirme ve gerilme matrisleri, $\{F\}$ cisim kuvvetleri, $\{\phi\}$ yüzey çekilmesi, $\{Q\}$ yapının düğüm serbestlik derecesi ve $\{P\}$ serbestlik derecesine uygulanan yüklerdir. Elemandaki yer değiştirme elemanın düğüm serbestlik derecesinden $\{q\}$ interpolasyon yapılarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\{u\} = [N] \{q\} \tag{2-78}$$

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

$$\{\varepsilon\} = [\partial] \{u\} \tag{2-79}$$

denkleminden;

$$\{\varepsilon\} = [B] \{q\} \tag{2-80}$$

burada

$$[B] = [\partial][N] \tag{2-81}$$

Denklem (2-77)'den;

$$\prod_p = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{numel} \{q\}^T n_n^T [k]_n \{q\}_n - \sum_{n=1}^{numel} \{q\}_n^T \{r_e\}_n - \{Q\}^T \{P\} \tag{2-82}$$

burada eleman rijitlik matrisi;

$$[k] = \int_{V_e} [B]^T [D][B] dV \tag{2-83}$$

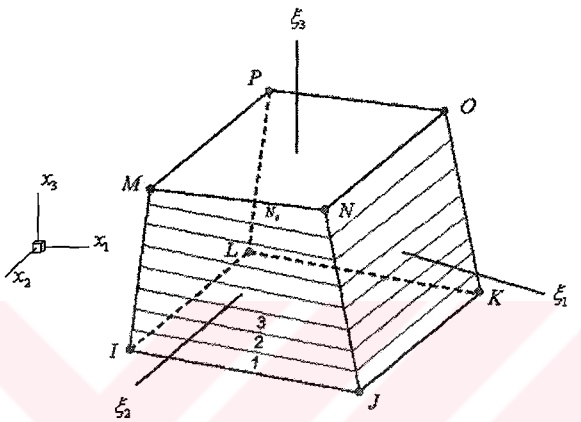
ve eleman yük vektörü;

$$\{r_e\} = \int_{V_e} [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV - \int_{V_e} [B]^T \{\sigma_0\} dV + \int_{V_e} [N]^T \{F\} dV + \int_{S_e} [N]^T \{\phi\} dS \tag{2-84}$$

elde edilir.

2.6.1 Çok Katmanlı 3B İzoparametrik Sekiz-Düğüm Noktalı Sonlu Eleman

Sekiz düğüm noktalı, üç boyutlu katmanlı sonlu eleman Şekil 2-9'da gösterildiği gibi ortak (ξ_1,ξ_2,ξ_3) lokal ve (x_1, x_2, x_3) global koordinat sistemlerine sahiptir. Her bir eleman ξ_3 kalınlık doğrultusunda N_ℓ sayıda katmana sahiptir. Elemanın formülasyonu üç boyutlu elastisite teorisine dayanmaktadır. Eleman geometrisi şu şekilde tariflenir;



Şekil 2-9 3B izoparametrik 8-düğüm noktalı katmanlı sonlu eleman

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{8} N_i \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{Bmatrix}_i \tag{2-85}$$

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

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{8} N_i \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}_i \tag{2-86}$$

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.

2.6.2 Şekil Değiştirme-Yerdeğiştirme İlişkileri

Global yer değiştirmeler cinsinden şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\{\xi\} = [\mathrm{H}]\{\mathrm{E}\} \tag{2-87}$$

burada

$$\{\xi\}=\{\xi_{11}\ \ \xi_{22}\ \ \xi_{33}\ \ \xi_{12}\ \ \xi_{23}\ \ \xi_{31}\}^T$$

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

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

$$[E^{(u_1)}]=\left[\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\ \frac{\partial u_2}{\partial x_2}\ \frac{\partial u_3}{\partial x_3}\right]$$

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

$$\{E\}=[\mathrm{A}]\ \{\mathrm{e}\} \tag{2-88}$$

burada

$$[A]=\left[\ [\mathrm{J}]^{-1}\ \ [\mathrm{J}]^{-1}\ \ [\mathrm{J}]^{-1}\ \right]$$

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

$$[e^{(u_1)}]=\left[\frac{\partial u_1}{\partial \xi_1}\ \frac{\partial u_2}{\partial \xi_2}\ \frac{\partial u_3}{\partial \xi_3}\right]$$

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

$$\{e\}=\{\eta\}\{u_t\} \tag{2-89}$$

burada

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

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

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

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

$\left[u_i^{(u_2)}\right]$ ve $\left[u_i^{(u_3)}\right]$ ifadeleri de benzer şekilde tariflenir. Matris denklem (2-89) parçalanırsa ve en üstteki parça olan $\left\{e^{(u_1)}\right\}$ aşağıdaki gibi yazılır;

$$\left\{e^{(u_1)}\right\} = \left[\eta^*\right] \left\{u_i^{(u_1)}\right\} \tag{2-90}$$

Denklem (2-88) ve (2-90) birleştirilerek aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{E^{(u_1)}\right\} = \left[b^{(u_1)}\right] \left\{\overline{u}\right\} \tag{2-91}$$

burada

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

ve $\left\{\overline{u}\right\} = \left[u\right]^T$

$\left\{E^{(u_2)}\right\}$ ve $\left\{E^{(u_3)}\right\}$ ifadelerde benzer şekilde geliştirilir ve bu ifadelerin üçü de denklem (2-87)'de birleştirilirse şekil değiştirme- yer değiştirme ilişkisi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\left\{\varepsilon\right\} = \left[\mathrm{B}\right]\left\{\overline{u}\right\} \tag{2-92}$$

burada

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

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

2.6.3 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri

Elastik matrisi $\left[D\right]_j$, j'inci katman için yazılacak olursa;

$$\left[D\right]_j = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix}_j \tag{2-93}$$

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

$$[D^*]_j = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}^*}{E_3^*} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}^*}{E_3^*} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}^*}{E_3^*} & -\frac{\nu_{23}^*}{E_3^*} & \frac{1}{E_3^*} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{bmatrix}_j \tag{2-94}$$

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 kalınlığıdır.

2.6.4 Rijitlik Matrisi Formülasyonu

Lokal koordinatlar cinsinden eleman rijitlik matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[K] = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1} [B]^T [D^*]_j [B] \det[J] d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{2-95}$$

burada $[D^*]$, eleman içerisinde ilgilenilen noktadaki değiştirilmiş gerilme-şekil değiştirme matrisidir. Katmanlı bir eleman için denklem (2-95) aşağıdaki gibi verilebilir;

$$[K] = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\sum_{j=1}^{N\ell}\int_{-1}^{1} [B]^T [D^*]_j [B] \det[J] d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{2-96}$$

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

$$\xi_3 = -1 + \frac{1}{t}\left[2\sum_{k=1}^{j} h_k - h_j\left(1 - \xi_{3_j}\right)\right] \tag{2-97}$$

$$d\xi_3 = \frac{h_j}{t} d\xi_j \tag{2-98}$$

Denklem (2-97) ve (2-98), denklem(2-96)'da yerine yazılırsa;

$$[K] = \int_{-1}^{1}\int_{-1}^{1}\sum_{j=1}^{N_t}\int_{-1}^{1}[B]^T\left[D^*\right]_j[B]\det[J]\left(\frac{h_j}{t}\right)d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \tag{2-99}$$

denklemi elde edilir. Eleman rijitliğine katmanın tesirini hesap etmek için, her bir katmanda (2x2x2) Gauss integrasyon planına ihtiyaç vardır [53].

2.7 Kompozit Malzemeler İçin Özel Kırılma Kriterleri

Kompozit yapıların gerçeğe yakın bir hasar prosesi ve hasar meydana gelmeden önce yapının taşıyabileceği en büyük yüklerin tam olarak anlaşılması ve doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Kompozit malzemeleri verimli tasarlamak ve avantajlarını kullanmak için, doğru bağlantı hasar tahminleri yapmak gerekmektedir. Bunun için, pratik uygulamalara uygun olan ve güvenilir bir kırılma kriteri büyük bir öneme sahiptir. Bir kompozit tabaka ya da yapının içinde katmanın başlangıç hasarı yaklaşık bir kırılma kriteri ile tahmin edilir. LTP kompozitler için tek katmanda hasar tahmini için değişik kırılma kriterleri mevcuttur. Bu kırılma kriterleri dört çeşittir;

1. Limit teoriler
2. Polinom teorileri
3. Şekil değiştirme enerji teorileri
4. Doğrudan mod belirleme teorileri

Limit teorileri her bir gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin değeri ile son uygun bir değeri karşılaştırır, örneğin en büyük gerilme teorisi ve en büyük şekil değiştirme teorisi. Polinom teorileri hasar yüzeyi tanımlamak için bir gerilme polinomu kullanır, örneğin Tsai-Wu ve Hoffman kırılma kriteri. Şekil değiştirme enerji teorileri hasarı belirlemek için lineer olmayan enerji esaslı bir kriter kullanmayı dener, (Tsai-Hill kırılma kriteri). Son olarak doğrudan mod belirleme teorileri hasarın her bir modunu tanımlamak için genellikle gerilme polinomları ile ifade edilir ve ayrı ayrı eşitlikler kullanır, (Hashin kırılma kriteri) [54].

2.7.1 En Büyük Gerilme Teorisi

En büyük gerilme kriteri, limit kırılma teorileri kategorisinin en önemli üyesidir. Düzlem gerilme hali için, en büyük gerilme kriteri ortotropik bir malzeme için aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\frac{\sigma_1}{X_t} \le 1 \quad \text{veya} \quad \frac{\sigma_1}{X_c} \le 1$$
$$\frac{\sigma_2}{Y_t} \le 1 \quad \text{veya} \quad \frac{\sigma_2}{Y_c} \le 1 \qquad (2\text{-}100)$$
$$\frac{\tau_{12}}{S} \le 1$$

burada X_t, Y_t ve X_c, Y_c çekme ve basmada katmanın boyuna ve enine mukavemetleri, S ise kayma mukavemetidir.

2.7.2 En Büyük Şekil Değiştirme Teorisi

Bu teori en büyük gerilme kriterine oldukça benzerdir. Yalnızca bu teoride sınır değerler olarak şekil değiştirme değerleri alınır.

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{X_t}} \le 1 \quad \text{veya} \quad \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{X_c}} \le 1$$
$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{Y_t}} \le 1 \quad \text{veya} \quad \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_{Y_c}} \le 1 \qquad (2\text{-}101)$$
$$\frac{\gamma_{12}}{S_\varepsilon} \le 1$$

burada $\varepsilon_{X_t}, \varepsilon_{X_c}$ *ve* $\varepsilon_{Y_t}, \varepsilon_{Y_c}$ çekme ve basmada katmanın boyuna ve enine en büyük şekil değiştirmeler, S_ε ise en büyük kayma şekil değiştirmesidir.

2.7.3 Tsai-Wu Kriteri

Kompozit malzemeler için en genel polinom kırılma kriteri Tsai tarafından önerilen tensör polinom kriteridir. Bütün diğer polinom kriterleri bu kriterden türetilmiştir. İndis notasyonunda aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$F_i\sigma_i + F_{ij}\sigma_i\sigma_j \ge 1 \qquad i,j = 1,2,...6 \qquad (2\text{-}102)$$

burada F_i ve F_{ij} mukavemet tensörleridir. İfade açılacak olursa,

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^{\,2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + F_{11}\sigma_1^{\,2} + F_{22}\sigma_2^{\,2} + F_{33}\sigma_3^{\,2} + F_{44}\sigma_4^{\,2} + F_{55}\sigma_5^{\,2} + F_{66}\sigma_6^{\,2} \le 1 \quad (2\text{-}103)$$

Tsai-Wu tarafından bulunan mukavemet değerleri;

$$F_{11} = \frac{1}{X_T|X_C|}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_T|Y_C|}$$

$$F_{33} = \frac{1}{Z_T|Z_C|}$$

$$F_1 = \frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C}$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C}$$

$$F_3 = \frac{1}{Z_T} - \frac{1}{Z_C}$$

$$F_{44} = \frac{1}{R^2} \quad (2\text{-}104)$$

$$F_{55} = \frac{1}{T^2}$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2}$$

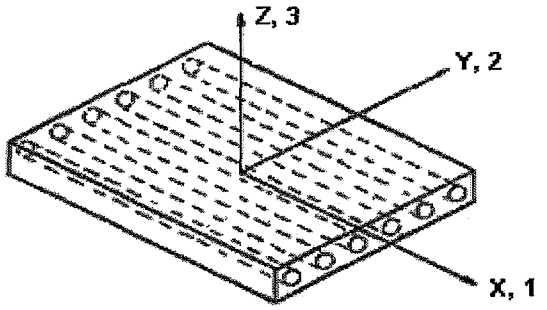
$$F_{12} = -\frac{1}{2\sqrt{X_T X_C Y_T Y_C}}$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2\sqrt{X_T X_C Z_T Z_C}}$$

$$F_{23} = -\frac{1}{2\sqrt{Y_T Y_C Z_T Z_C}}$$

$$F_i = F_{ij} = 0$$

burada $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ normal gerilmeler, $\sigma_4,\sigma_5,\sigma_6$ kayma gerilmeleri; X_T , Y_T , Z_T laminanın *1,2,3* doğrultularındaki çekme mukavemetleri; X_C , Y_C , Z_C laminanın *1,2,3* doğrultularındaki basma mukavemetleri; ve *R, T, S* de 23,13,12 düzlemlerindeki kayma mukavemetleridir. Lamina için referans koordinat sistemi Şekil 2-10'da verilmiştir.



Şekil 2-10. Referans koordinat sistemi

2.7.4 Hoffman Kriteri

Bu kriter aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır;

$$\frac{1}{2}(S_x+S_y-S_z)(\sigma_2-\sigma_3)^2+\frac{1}{2}(S_x+S_z-S_y)(\sigma_3-\sigma_1)^2 + \frac{1}{2}(S_y+S_z-S_x)(\sigma_1-\sigma_2)^2+\left(\frac{1}{X_T}-\frac{1}{X_C}\right)\sigma_1+\left(\frac{1}{Y_T}-\frac{1}{Y_C}\right)\sigma_2 -\left(\frac{1}{Z_T}-\frac{1}{Z_C}\right)\sigma_3+\left(\frac{\sigma_4}{R}\right)^2+\left(\frac{\sigma_5}{S}\right)^2+\left(\frac{\sigma_6}{T}\right)^2\le 1 \quad (2\text{-}105)$$

burada $S_x=\frac{1}{X_T|X_C|}$, $S_y=\frac{1}{Y_T|Y_C|}$, $S_z=\frac{1}{Z_T|Z_C|}$'dir.

2.7.5 Tsai-Hill Kriteri

Bu kriter

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2+\left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2+\left(\frac{\sigma_3}{Z}\right)^2-\left(\frac{1}{X^2}+\frac{1}{Y^2}-\frac{1}{Z^2}\right)\sigma_1\sigma_2 -\left(\frac{1}{Y^2}+\frac{1}{Z^2}-\frac{1}{X^2}\right)\sigma_2\sigma_3-\left(\frac{1}{X^2}+\frac{1}{Z^2}-\frac{1}{Y^2}\right)\sigma_1\sigma_3 +\left(\frac{\sigma_4}{R}\right)^2+\left(\frac{\sigma_5}{S}\right)^2+\left(\frac{\sigma_6}{T}\right)^2\le 1 \quad (2\text{-}106)$$

olarak tanımlanır. Burada X, Y, Z değerleri $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ gerilme değerlerinin işaretinin pozitif veya negatif olma durumuna göre X_T , Y_T , Z_T veya X_C , Y_C , Z_C şeklinde değiştirilir.

2.7.6 Hashin Kriteri

Hashin kriteri; hasarı modlara ayırır, her birini kendi içinde ve basma-çekme durumlarına göre ayrı ayrı inceler. Böylece Hashin kriteri kompozit malzemede hasarın; matristen mi, liften mi yoksa katmanların birbirinden ayrılmasından mı olduğunu ortaya koyar.

I. Lif kırılması

$$\frac{\sigma_1}{Xt} \le 1 \qquad \text{(Çekme)} \tag{2-107}$$

$$-\frac{\sigma_1}{Xc} \le 1 \qquad \text{(Basma)} \tag{2-108}$$

II. Matris çatlağı

$$\frac{\sigma_2+\sigma_3}{R^2}+\frac{(\sigma_4^2+\sigma_5^2+\sigma_6^2-\sigma_2\sigma_3)}{T^2} \le 1 \qquad \text{(Çekme)} \tag{2-109}$$

$$\frac{1}{\mathrm{Yc}}\left[\left(\frac{\mathrm{Yc}}{2\mathrm{T}}\right)^2-1\right](\sigma_2+\sigma_3)+\frac{(\sigma_2+\sigma_3)^2}{4\mathrm{T}^2} + \frac{(\sigma_4^2+\sigma_5^2+\sigma_6^2-\sigma_2\sigma_3)}{\mathrm{T}^2} \le 1 \qquad \text{(Basma)} \tag{2-110}$$

III. Lif-matris Ayrılması

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_6}{S}\right)^2+\left(\frac{\sigma_5}{T}\right)^2} \le 1 \qquad \text{(Çekme)} \tag{2-111}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{Xc}\right)^2+\left(\frac{\sigma_6}{S}\right)^2+\left(\frac{\sigma_5}{T}\right)^2} \le 1 \qquad \text{(Basma)} \tag{2-112}$$

IV. Delaminasyon

$$\left(\frac{\sigma_3}{Zt}\right)^2+\frac{\sigma_4^2+\sigma_5^2}{R^2} \le 1 \tag{2-113}$$

burada $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ normal gerilmeler, $\sigma_4,\sigma_5,\sigma_6$ kayma gerilmeleri; X_T , Y_T , Z_T laminanın *1, 2, 3* doğrultularındaki çekme mukavemetleri; X_C, Y_C, Z_C laminanın *1, 2, 3* doğrultularındaki basma mukavemetleri ve *R, T, S* de 23, 13, 12 düzlemlerindeki kayma mukavemetleridir [49].

BÖLÜM 3

HASAR ANALİZİ

3.1 Giriş

Tabakalı kompozit yapılar uygulanan bir gerilme sistemi altında matris çatlaklarına, lif-matris ayrışmasına, lif kırılmasına ve tabakalar arası bozulmalara maruz kalabilir. Tabaka içerisinde kalıcı yapı bütünlüğünün bozulmasına sebep olan bu etkiler ***hasar*** olarak adlandırılır. Lif kırılması, uygulanan yükün lifin en büyük uzunlamasına mukavemetini aşması ve aynı şekilde matris çatlağı da yükün matris malzemesinin mukavemetini aşması durumunda meydana gelir. Tabakalar arası bozulma (*delaminasyon*) oldukça karmaşık bir olaydır ve bir tabakaya normal bir yüklemenin uygulanması sonucu oluşan soyulma veya açılmadan, tek bir katmanın kaymasından veya yırtılmasından meydana gelir. Bu hasarlar malzemenin mukavemet ve rijitliğinde azalmalara sebep olur. Başka bir ifade ile, yapının yük taşıma kapasitesi ve servis ömrü azalır. Bir yapı veya bileşen fonksiyonlarını yerine getiremezse başarısız olmuş demektir. Kompozit yapının katmanlama konfigürasyonuna bağlı olarak katmanın başarısızlığı az önce bahsettiğimiz hasarların hep birlikte veya ayrı ayrı oluşmaları sonucu ortaya çıkar [55].

Son zamanlarda, değişik hasar modlarının başlangıcı ve gelişimini anlama konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Fakat bu çalışmalar sadece basit geometri ve yükleme kapasiteleri ile sınırlıdır. Bugünkü analitik teknikler karmaşık yükleme durumlarına maruz kalan bir kompozit yapıda oluşan değişik hasar modlarının etkilerini ve tüm parametrelerin tesirinin dikkate alınmasına imkan vermemektedir. Örneğin ısıl yüklemeden ve nem etkisinden oluşan gerilmeleri hesaba katmak bile modeli karmaşık bir hale sokmaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal tekniklere başvurmak gerekmekte ve ayrıca

doğru bir şekilde kompozit yapının hasar davranışını tahmin edebilecek uygun bir kırılma kriterine ihtiyaç duyulmaktadır.

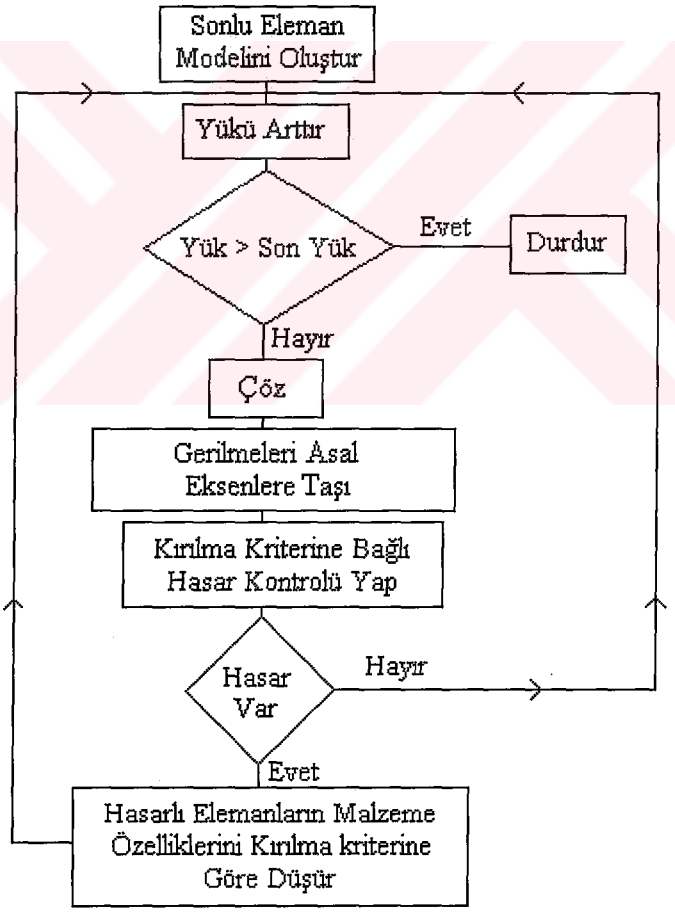
Kırılma kriteri, ilerleyen hasar (*progressive failure*) veya ilk hasar katmanı oluştuktan sonra hasarın gelişimini belirlemekte kullanılabilir. İlerleyen hasar analizi, meso-scale gibi değişik teknikler kullanarak kompozit yapının mukavemetinin kademeli olarak azaltılmasına dayanır. Kompozit malzemeler ilk hasar oluştuktan sonra mukavemetinin önemli kısmını halâ korur. Bu nedenle, kompozit yapıların hem ilk hasar katmanını tespit etmek hem de sonraki hasar gelişiminin analizini yapmak tasarımcıya oluşabilecek hasarlar ile ilgili bilgiler verir.

Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü tabakalı kompozit tek bindirme bağlantılarının değişik yükleme durumlarında bindirme bölgesi civarında ilk hasar oluşumu ve hasar gelişimi incelenmiştir. Kompozit bindirme bağlantılarının bağlantı özelliklerini belirlemek için, malzemelerin statik yük altındaki mukavemet özelliklerini ortaya çıkarmak için uygulanan, mühendislik için önemli bir mekanik deney olan çekme ve eğme deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar teorik olarak sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizler ile karşılaştırılmıştır.

Hasarı belirlemek için, kompozitlerin mukavemet sınırını tespit etmek için kullanılan Tsai-Wu ve Hashin kırılma kriterleri dikkate alınmıştır. Bu iki kırılma kriteri günümüzde kompozitlerin hasar analizlerinde sıkça kullanılan kriterlerdir. Tsai-Wu kırılma kriteri kompozit malzemedeki hasarı tanımlarken kuvadratik formda bir polinom kullanarak hasarı makroskobik seviyede inceler (Bknz. Bölüm 2.7.3). Hashin kriteri ise; hasarı modlara ayırır, her birini kendi içinde basma-çekme ve gerilme-şekil değiştirme durumlarına göre ayrı ayrı inceler (Bknz. Bölüm 2.7.6). Bu nedenle Hashin kriteri kompozit malzemede hasarın; matristen mi, liften mi yoksa katmanların birbirinden ayrılmasından mı olduğunu kolaylıkla anlamamızı sağlar.

Teorik analizlerde hasar oluşumu ve gelişimini incelemek için Şekil 3-1'de verilen akış diyagramındaki işlem sırası kullanılmıştır. Model oluşturma aşamasında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının ilk olarak kompozit plakaları oluşturularak her bir katmanın mekanik özellikleri, lif açı değerleri atanmakta ve daha sonra yapıştırıcı modellenmektedir. Yükleme aşamasında ise, bağlantının yükleme

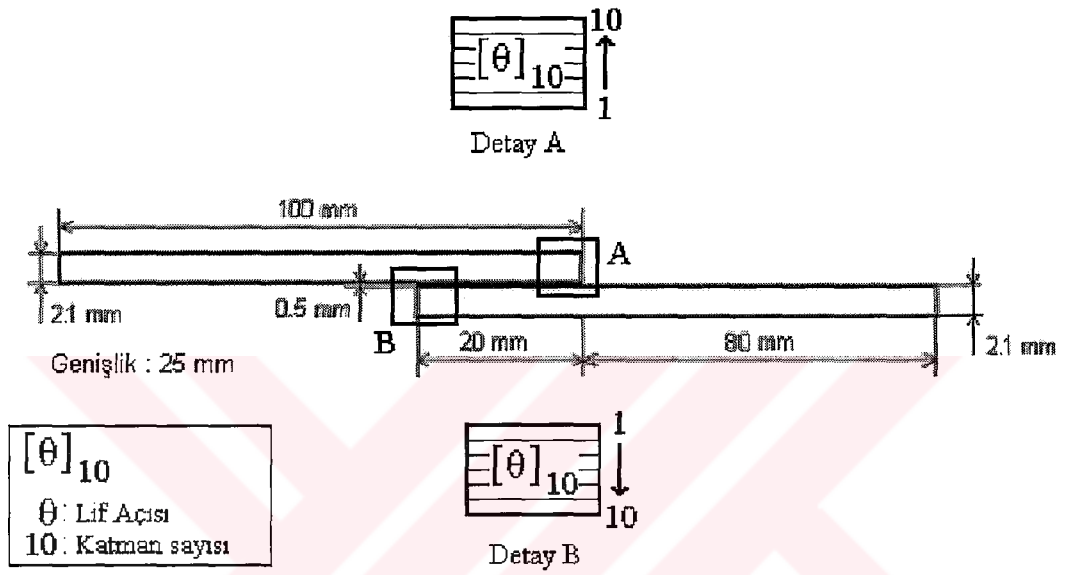
durumuna göre sınır şartları ve başlangıç şartları tariflenmekte ve ilerleyen adımlarda yük kademeli arttırılarak yukarıdaki şartlar tekrar tariflenmektedir. Çözüm aşamasında problem çözülmekte ve bir sonraki aşamada ise; gerilmeler, kompozit plakaların lif açı değerine göre asal eksenlere taşınmaktadır. Asal eksene taşınan gerilmeler temel alınarak kırılma kriterine bağlı hasar kontrolü aşamasında sonlu elemanın ilgili tabakasında Tsai-Wu veya Hashin kriter değerinin 1'i aşıp aşmadığına bakılmaktadır ve kriter değeri 1'i aştığında hasar var kabul edilip bu sonlu elemanın ilgili katmanının mekanik özellikleri kademeli düşürülmektedir. Hasar kontrolü yapıldıktan sonra yükleme aşamasına dönülmekte ve bağlantıya uygulanan yük arttırılarak işlemler tekrarlanmaktadır. Bu işlemler yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısının her iki plakasının her bir sonlu elemanın her bir katmanı için tekrarlanmaktadır.



Şekil 3-1 Akış Diyagramı

3.2 Bağlantı Geometrisi Ve Sonlu Eleman Modeli

Tek bindirme bağlantısı bir epoksi yapıştırıcı tabakası ve iki de tek yönlü 10 katmandan oluşan kompozit plakadan ibarettir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş karbon lif takviyeli kompozit bindirme bağlantısının boyutları Şekil 3-2'de ve malzeme özellikleri Tablo 1 'de görülmektedir.

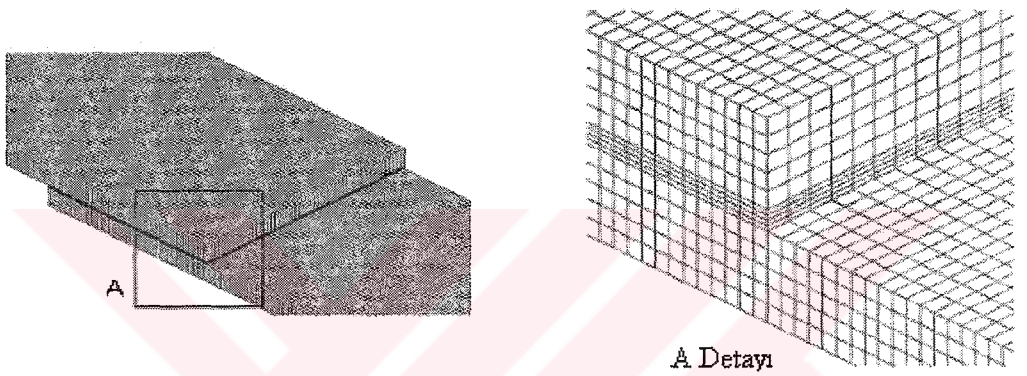


Şekil 3-2 Bindirme bağlantısı geometrisi ve lif açısı değişimi

Tablo 1. AS4 kompozit yapışan, 3501-6 epoksi reçine ve AS4 /3501-6 katmanın malzeme özellikleri

Özellik	Karbon lif (AS4)	Epoksi (3501-6)	Lamina (AS4/3501-6)
Boyuna elastik modülü (E_{11}) (GPa)	222.9	4.347	142.0
Enine elastik modülü (E_{22} ve E_{33}) (GPa)	16.1	4.347	10.3
Kayma modülü (G_{12} ve G_{13}) (GPa)	91.4	1.598	7.2
Kayma modülü (G_{23}) (GPa)	5.9	1.598	3.8
Poisson oranı (ν_{12} ve ν_{13})	0.22	0.360	0.27
Poisson oranı (ν_{23})	0.33	0.360	0.36
Boyuna çekme mukavemeti (X_t)(MPa)	3723		2280
Boyuna basma mukavemeti (X_c)(MPa)	3351		1440
Enine çekme mukavemeti (Y_t)(MPa)			57
Enine basma mukavemeti (Y_c)(MPa)			228
Kayma mukavemeti (S)(MPa)			71

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş karbon lif takviyeli kompozit bindirme bağlantısının gerilme analizlerinde, kompozit plakaları modellemek için 3 boyutlu 8 düğüm noktalı izoparametrik katmanlı yapısal katı eleman kullanıldı. Bu sonlu elemanın her bir düğüm noktasında x, y ve z doğrultularında 3 serbestlik derecesi mevcuttur. Yapıştırıcıyı modellemek için ise, 3 boyutlu 8 düğüm noktalı yapısal katı eleman kullanıldı ve bu elemanın da her bir düğüm noktasında x, y ve z doğrultularında 3 serbestlik derecesi mevcuttur. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş karbon lif takviyeli kompozit bindirme bağlantısının sonlu eleman modeli Şekil 3-3' de gösterilmiştir.



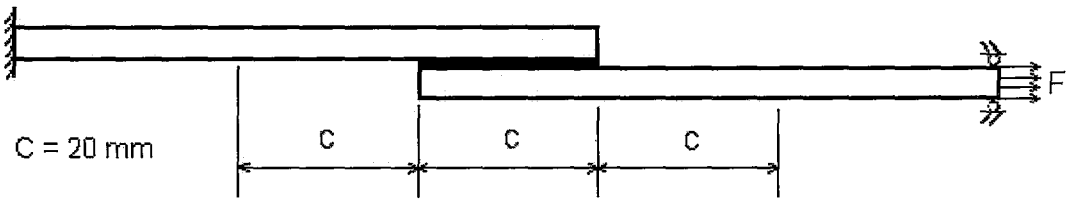
Şekil 3-3 Bindirme Bağlantısının Sonlu Eleman Modeli

3.3 Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantılarında Tsai-Wu Kırılma Kriterine Göre Hasar Oluşumu ve Gelişiminin Teorik İncelenmesi

Tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarında kompozit plakalarda oluşan hasarı makroskobik seviyede incelerken kuvadratik formda bir polinoma dayanan Tsai-Wu kırılma kriterini ele alalım. Tsai-Wu kırılma kriteri ile Şekil 3-1'de verilen akış diyagramındaki işlem sırası birleştirilerek tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarında farklı lif açıları ile çekme ve eğme yükleri altında hasar oluşumu ve gelişimi incelenmiştir.

3.3.1 Çekme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları

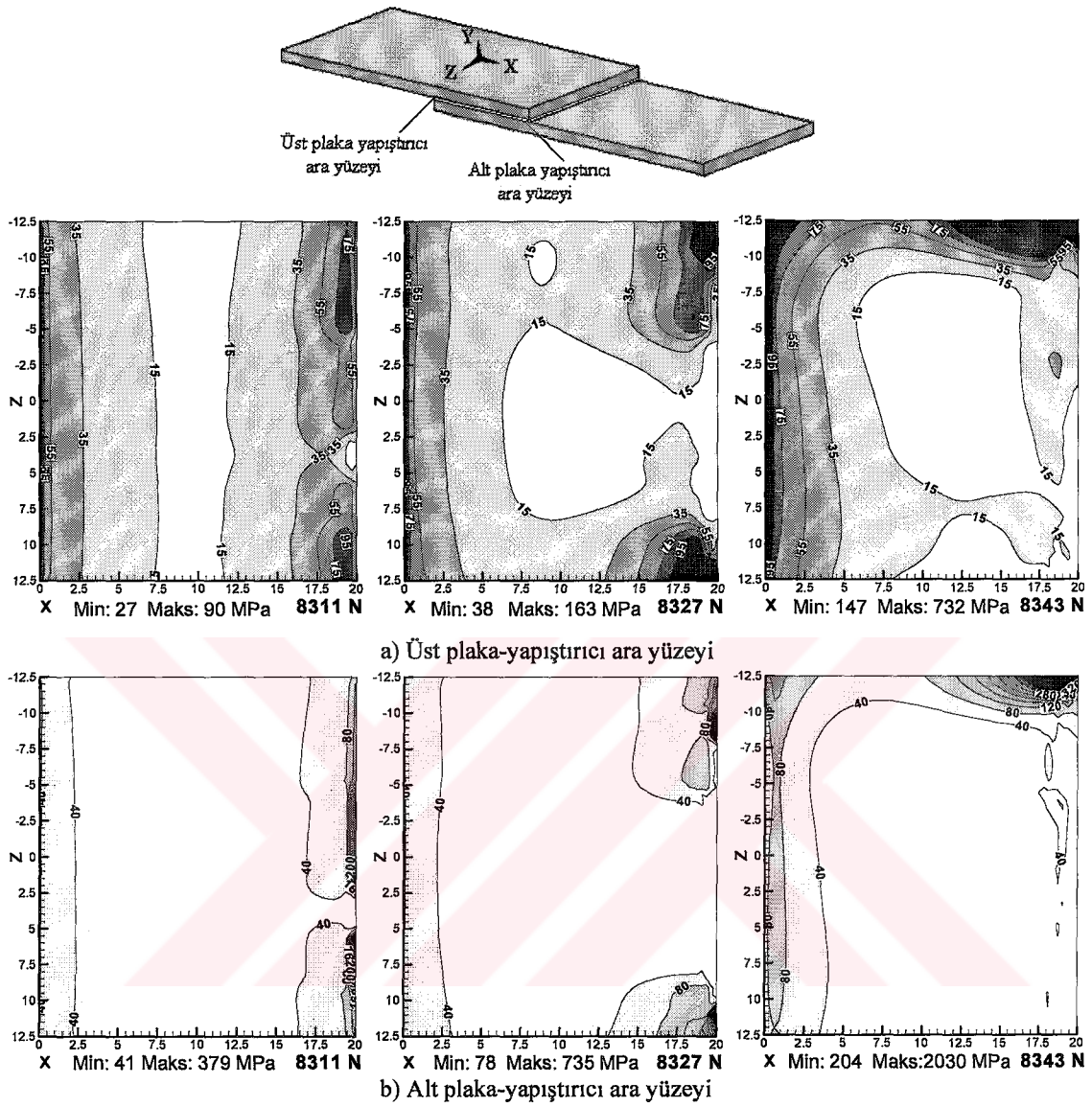
Çekme yüküne maruz tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının yükleme ve sınır şartları Şekil 3-4' de verilmiştir. Bağlantının üst plakasının sol ucundaki tüm düğüm noktalarının hareketi yatay ve düşey yönlerde engellenirken, alt plakanın sağ ucuna tekabül eden tüm düğüm noktalarına düşey yönündeki hareketine izin verilmeksizin yatay yönde eksenel çekme kuvveti uygulandı.



Şekil 3-4 Çekme yükü altında bindirme bağlantısı

Tek yönlü kompozit bindirme bağlantısında hasar analizi 0, 15, 30, 45, 60 ve 90° lif açısına sahip bindirme bağlantıları için gerçekleştirildi ve sonuçlar karşılaştırıldı. Temsili olarak 0, 45 ve 90° lif açılı bindirme bağlantılarına ait yapıştırıcı eş değer gerilmeleri ve hasar oluşumları Şekil 3.5, 3.6 ve 3.7'de verilmiştir. 0, 45, 90° açılı bindirme bağlantılarına ait yapıştırıcının üst ve alt plakaya temas eden katmanlarındaki von-Mises gerilmeleri görülmektedir. Alt plakanın sağ ucuna uygulanan çekme kuvveti kademeli arttırılırken gerilme yığılmaları yapıştırıcı tabakasının sol ve sağ serbest uçlarında ortaya çıkmakta ve yayılmaktadır. Özellikle üst plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sol serbest ucuna ve alt plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sağ serbest ucuna tekabül eden yapıştırıcı bölgelerinde von-Mises gerilmeler en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Bu nedenle muhtemel yapıştırıcı yük taşıma kabiliyetini bu bölgelerde kaybetmektedir. Dolayısıyla bindirme bağlantısı da bu bölgelerden zayıflamaya başlamaktadır ve kompozit plakalarda bu bölgelere tekabül eden yerlerde hasar başlangıcı gözlenmektedir (Şekil 3.8-10). 0° tek yönlü kompozit bindirme bağlantısındaki plakaların en yüksek yüke dayanım sergilemesi nedeniyle, en yüksek yapıştırıcı eş değer gerilmeleri bu bağlantıda ortaya çıkmaktadır. En düşük yapıştırıcı gerilemeleri de 45° 'lik bindirme bağlantısında görülmektedir. Çünkü 45° 'lik plakalar 0° 'lik plakalardan daha az yük taşımaktadır.

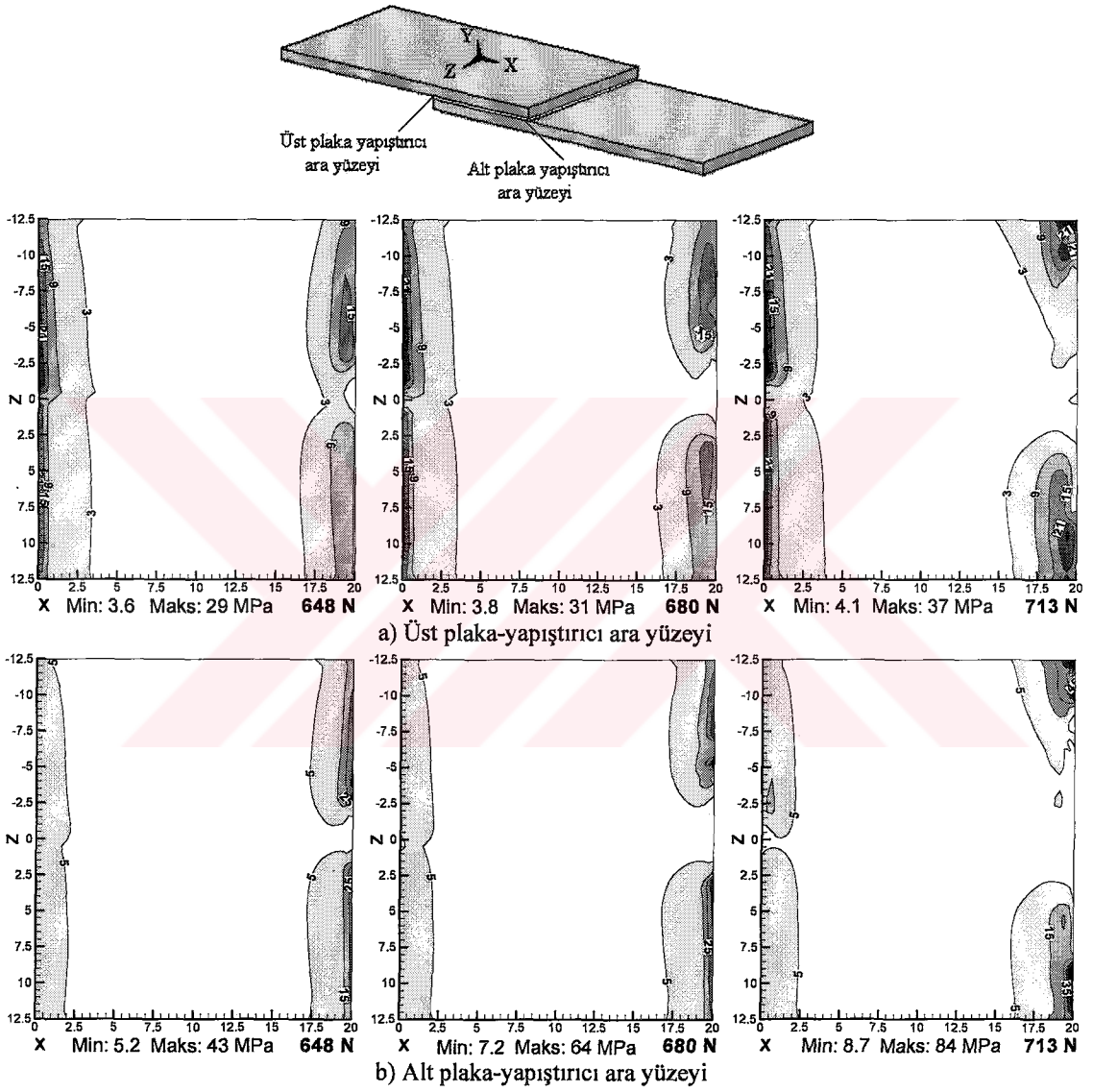
Tipik epoksi yapıştırıcının 25 ila 30 MPa 'a dayanabileceği göz önüne alınırsa, bu eş değer gerilme seviyelerinde yapıştırıcı aşırı yük taşıyamaz ve bindirme bağlantısının yapıştırıcısında bölgesel hasarlar oluşur ve yapıştırıcı bu bölgede zayıflar. Yapıştırıcı elastik kabul edildiği için oluşan eş değer gerilme seviyeleri dayanım sınırını aşmaktadır. Bu nedenle şekil değiştirmelerin irdelenmesi daha uygundur. Bu çalışmada amaç, kompozit yapışanlarda hasar oluşumu ve gelişimini incelemektir.



Şekil 3-5 0° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları

Çekme yükü altında 0° yönlü 10 katmanlı plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısına ait Şekil 3-8'deki hasar oluşum ve gelişimi incelenirse, ilk hasarın 8278 N da alt plakanın 1 ve 2 numaralı yapıştırıcıya yakın olan katmanlarında başladığını görmekteyiz. Şekilde parantez içindeki rakamlar katman numarasını, koyu renkli rakamlarda Newton biriminde yük değerini göstermektedir. Hasar bölgeleri, alt plaka da yapıştırıcı-plaka ara yüzeyine yakın, üst plaka da yapıştırıcı-plaka ara yüzeyine tekabül eden kısımdır. Hasar 1 ve 2 numaralı katmanlarda yayılırken, alt plakada 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı katmanlarda sırasıyla 8294, 8311, 8327, 8327 ve 8327 N yük değerlerinde

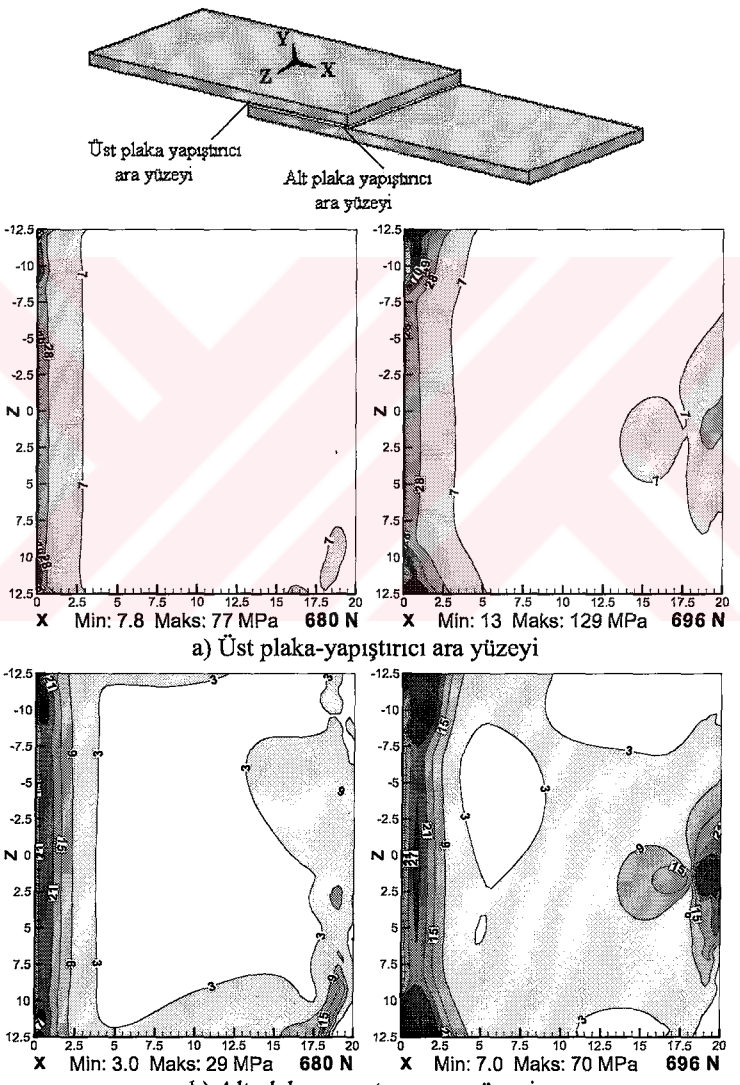
ilk hasarlar başlamaktadır. Alt plakada hasar, yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o hat boyunca yanlara doğru ilerlemektedir. Yük alt plakaya uygulandığı için yük alt plakadan yapıştırıcı uçlarından üst plakaya aktarılmaktadır, dolayısıyla alt plaka etkilenmektedir ve ilk hasar ilk alt plakada ortaya çıkmaktadır.



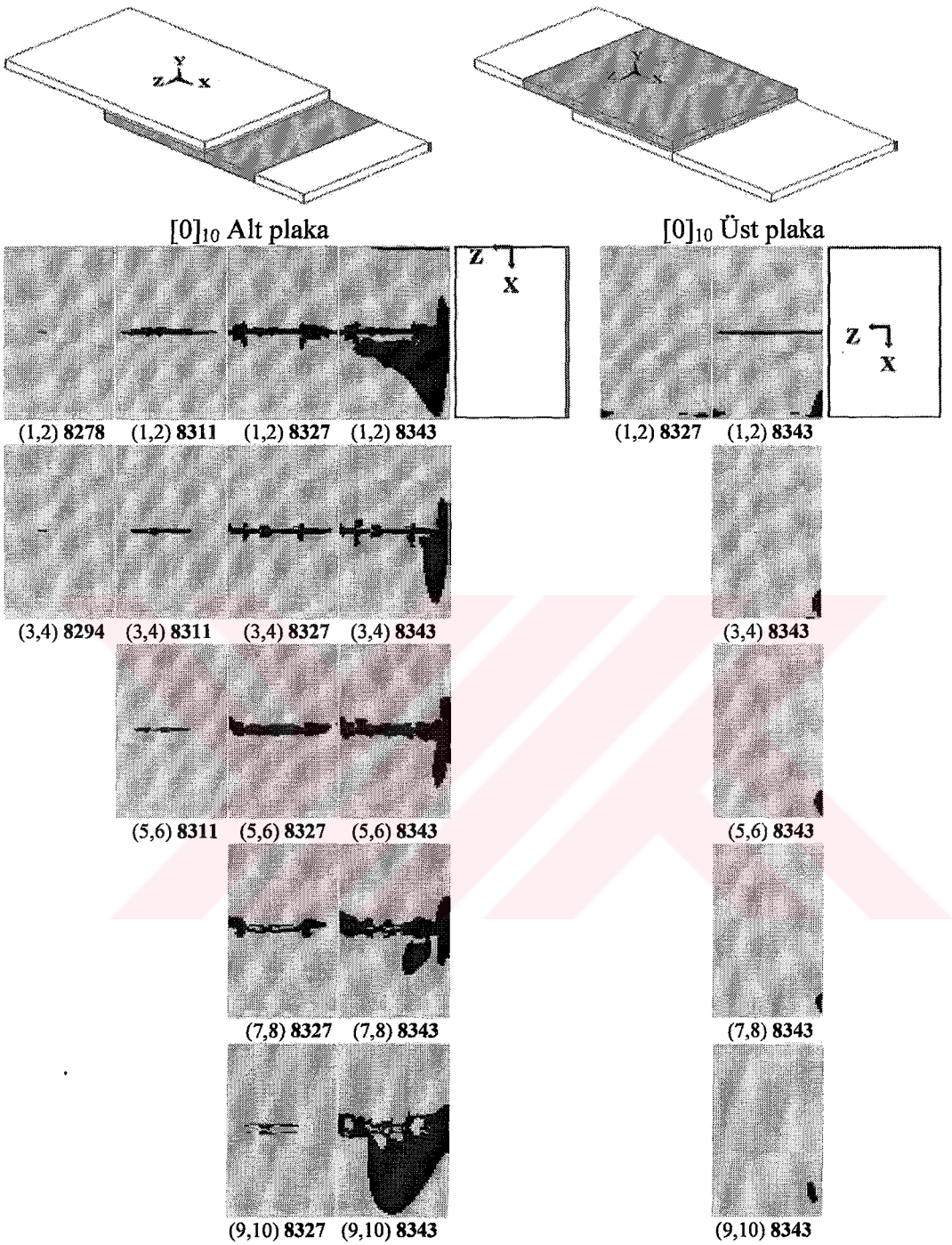
Şekil 3-6 45° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları

Alt plakada hasar bölgesi belirgin yayılmış iken, üst plakada ilk hasar 8327 N da yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 numaralı katmanlarda plakanın serbest kenarlarının sağ ve sol köşelerinde başlamaktadır ve takip eden yük adımlarında uçtaki hasar yayılmakta ve yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden dar bölgede hasar oluşmaktadır. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

ve 10 numaralı katmanlarda ise 8343 N da hasar plakanın sağ ucunda oluşmaktadır. Alt plakada yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgede hasar çok fazla ilerlemiş ve yayılmış olduğu için yükü taşıyamamaktadır ve komşusu olan üst plakanın uç bölgesine yük aktarılmaktadır. Bu nedenle üst plakada hasar, uç kısımlarda başlamaktadır ve gerilme yığılmaları yapıştırıcı serbest uçlarında olduğu içinde yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgede devam etmektedir ve 8343 N da da bağlantı yük taşıma kabiliyetini kaybetmektedir.



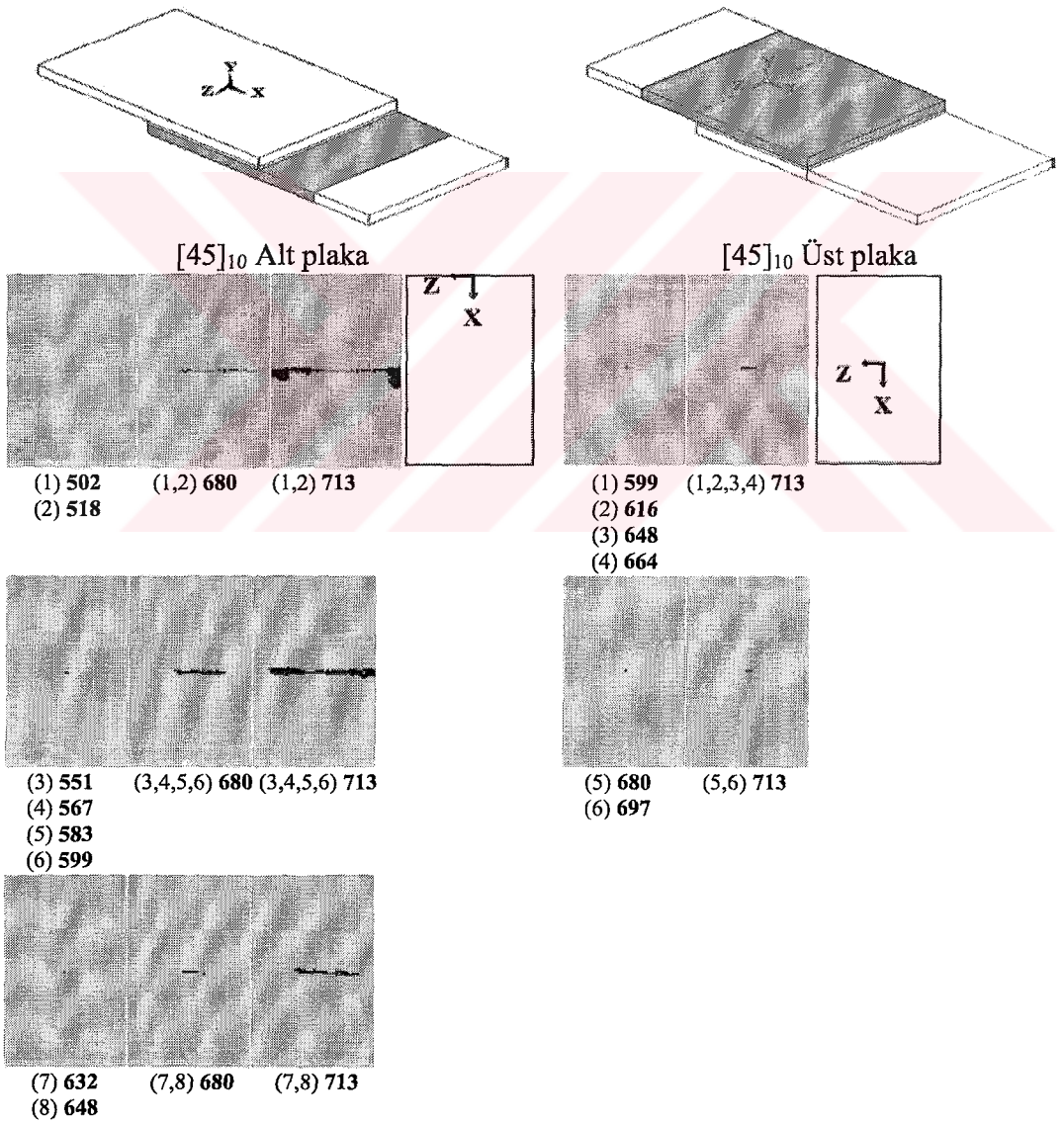
Şekil 3-7 90° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları



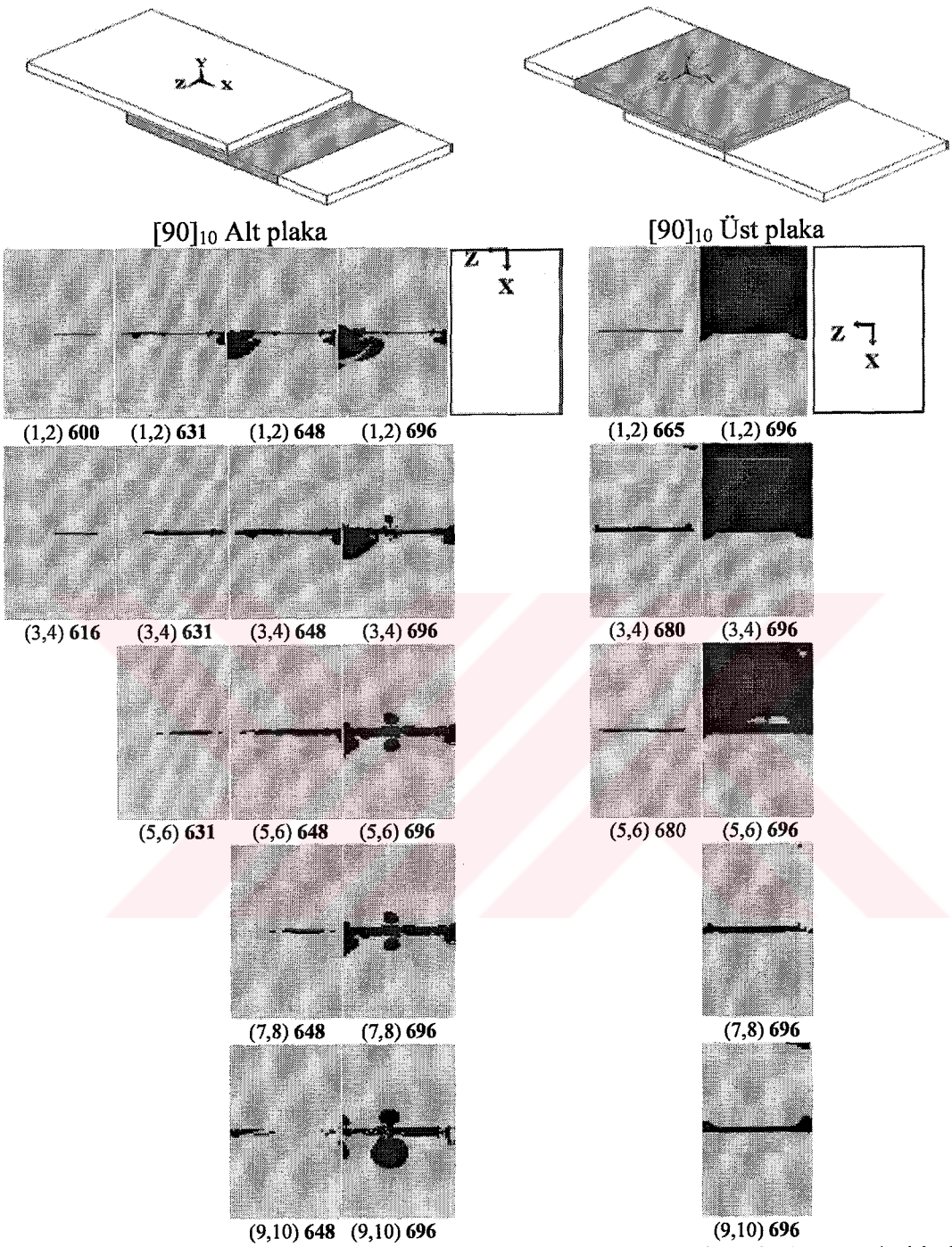
Şekil 3-8 Çekme yükü altında 0° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan bindirme bağlantısında, ilk hasar 502 N da alt plakanın yapıştırıcıya en yakın olan 1 numaralı katmanında başlamaktadır. (Şekil 3-9) Daha sonra hasar, 518 N da katman 2'de oluşmakta ve bu katmanlarda yayılırken, alt plakada 3, 4, 5, 6, 7, ve 8 numaralı katmanlarda sırasıyla 551, 567, 583, 599, 632 ve 648 N

yük değerlerinde ilk hasarlar başlamaktadır. Alt plaka 9 ve 10 numaralı katmanlarda hasar görülmemiştir. 45° yönlü plakalarda da alt plakada hasar, yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o hat boyunca ilerlemektedir. Bunun nedeni; bağlantı zayıflamasının ve gerilme yığılmalarının yapıştırıcı serbest uçlarında ortaya çıkmasıdır. Üst plakada ise, ilk hasar 599 N da yapıştırıcıya yakın olan 1. katmanda plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamaktadır. 2, 3, 4, 5, ve 6 numaralı katmanlarda ise sırasıyla 616, 648, 664, 680, 697 N da hasar plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında oluşmaktadır. Hasar üst plakada fazla yayılmadan bağlantı 713 N da yük kabiliyetini taşıyamadığı için kopmaktadır.



Şekil 3-9 Çekme yükü altında 45° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

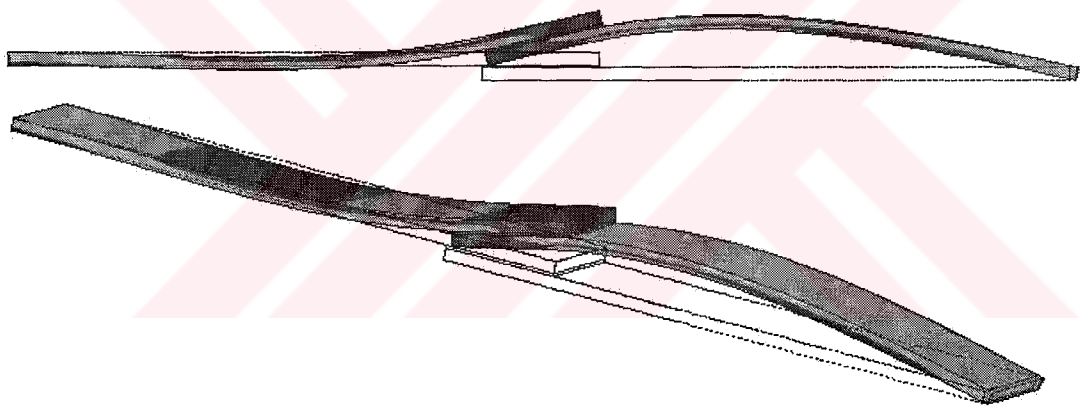


Şekil 3-10 Çekme yükü altında 90° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

90° yönlü plakalardan oluşan bindirme bağlantısını incelediğimizde, ilk hasar 600 N da alt plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında başlamaktadır (Şekil 3-10). Daha sonra, alt plakada (3,4), (5,6), (7,8) ve (9,10) numaralı katmanlarda sırasıyla 616, 631, 648 ve 648 N yük değerlerinde ilk hasarlar oluşmaktadır. 90° yönlü plakalarda da alt plakada hasar,

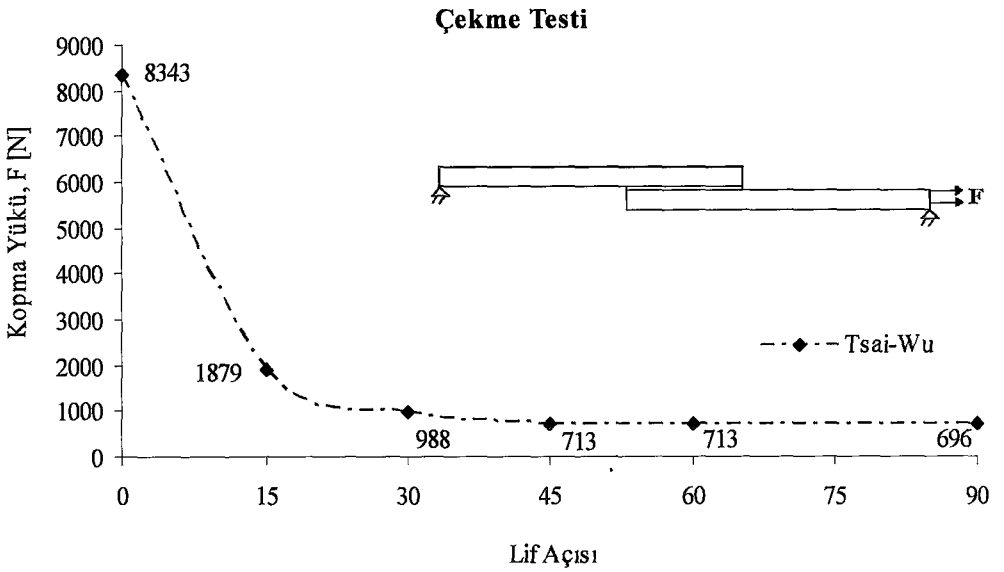
yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o hat boyunca ilerlemektedir. Üst plakada ise, ilk hasar 665 N da yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 nolu katmanlarda plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamaktadır. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı katmanlarda ise 680 ve 696 N da hasar oluşmaktadır. Üst plakada hasar, 0 ve 45° 'lik plakalardan oluşan bindirme bağlantılarından farklı olarak daha geniştir ve aniden daha geniş bir bölgeye yayılmaktadır. Bunun nedeni, 90° 'lik plakalardan oluşan bindirme bağlantılarının 0 ve 45° 'lik bindirme bağlantılarına göre daha düşük mukavemete sahip olmalarıdır.

Üst plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sol ucuna ve alt plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sağ ucuna tekabül eden yapıştırıcı bölgelerinde eş değer gerilmeler en yüksek seviyelere ulaşması nedeniyle yapıştırıcı yük taşıma kabiliyetini bu bölgelerde kaybetmekte ve dolayısıyla bindirme bağlantısı bu bölgelerden zayıflamaya başlamaktadır.

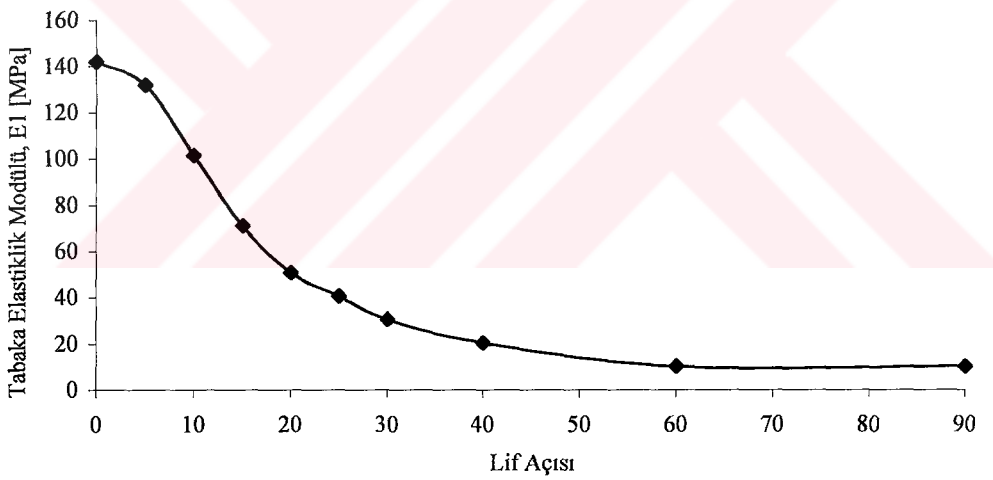


Şekil 3-11 Çekme yükü altındaki tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantısının deforme olmuş ve deforme olmamış geometrileri

Şekil 3-11'de deforme olmuş ve deforme olmamış bağlantı geometrileri gösterilmektedir. Yük ekseniyle deforme olmuş geometrinin simetri ekseni çakışmadığı için bağlantıda dönme meydana gelmektedir. Ayrıca alt plakanın alt yüzeyi ve üst plakanın üst yüzeyi basma gerilmesine maruz olup, alt plakanın üst yüzeyi ve üst plakanın alt yüzeyi çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bindirme sağ serbest ucunda yapıştırıcı-alt plaka ara yüzeyi ve sol serbest ucunda ise yapıştırıcı-üst plaka ara yüzeyi boyunca yük iletiminin olması nedeniyle hasar, kompozit yapışanların bu ara yüzeylere tekabül eden kısımlarında başlamaktadır. Yükün eksantrikliği nedeniyle bindirme serbest uçlarında artan momentin tesiri daha etkin olmaktadır.



Şekil 3-12 Çekme durumunda bindirme bağlantılarının açıya göre kopma yükü değişimi



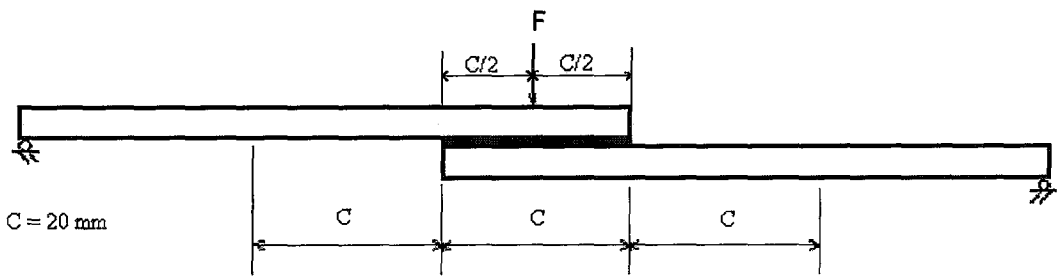
Şekil 3-13 Lif açısına göre E_1 elastiklik modülünün değişimi

Bu çalışmada; 0, 45, 90° lik açılara sahip plakalı bindirme bağlantılarının analizlerine ilaveten 0, 15, 30, 60° lik açılara sahip kompozit bindirme bağlantılarının da analizleri yapıldı ve hasarlarının gelişimi incelendi. Hasar oluşum ve gelişimi 0, 45 ve 90° lik plakaların deformasyon mekanizmasına benzer olduğu için sonuçlar verilmemiştir. Ancak tüm açı değerlerine göre son kopma yüklerinin irdelenmesi gerekmektedir. Şekil 3-12 lif açısının büyümesinin dayanımı düşürdüğünü göstermektedir. Kullanılan karbon kompozit malzemenin E_1 elastiklik matrisinin lif açısına göre değişiminin (Şekil 3-13) bindirme

bağlantılarının kopma yüklerinin lif açısına göre değişimi ile aynı karaktere sahip olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının çekme yüküne dayanımı bindirme bağlantısındaki kompozit plakaların yönelim açısının değişimi ile doğrudan ilişkilidir ve lifler uygulanan çekme yük eksenine paralel iken en yüksek dayanımı göstermektedir. Ayrıca lifler çekme yüküne dik konuma geldikçe dayanım düşmektedir ve en düşük dayanım lifler çekme yük eksenine dik konumda olduğunda ortaya çıkmaktadır.

3.3.2 Üç Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantısı

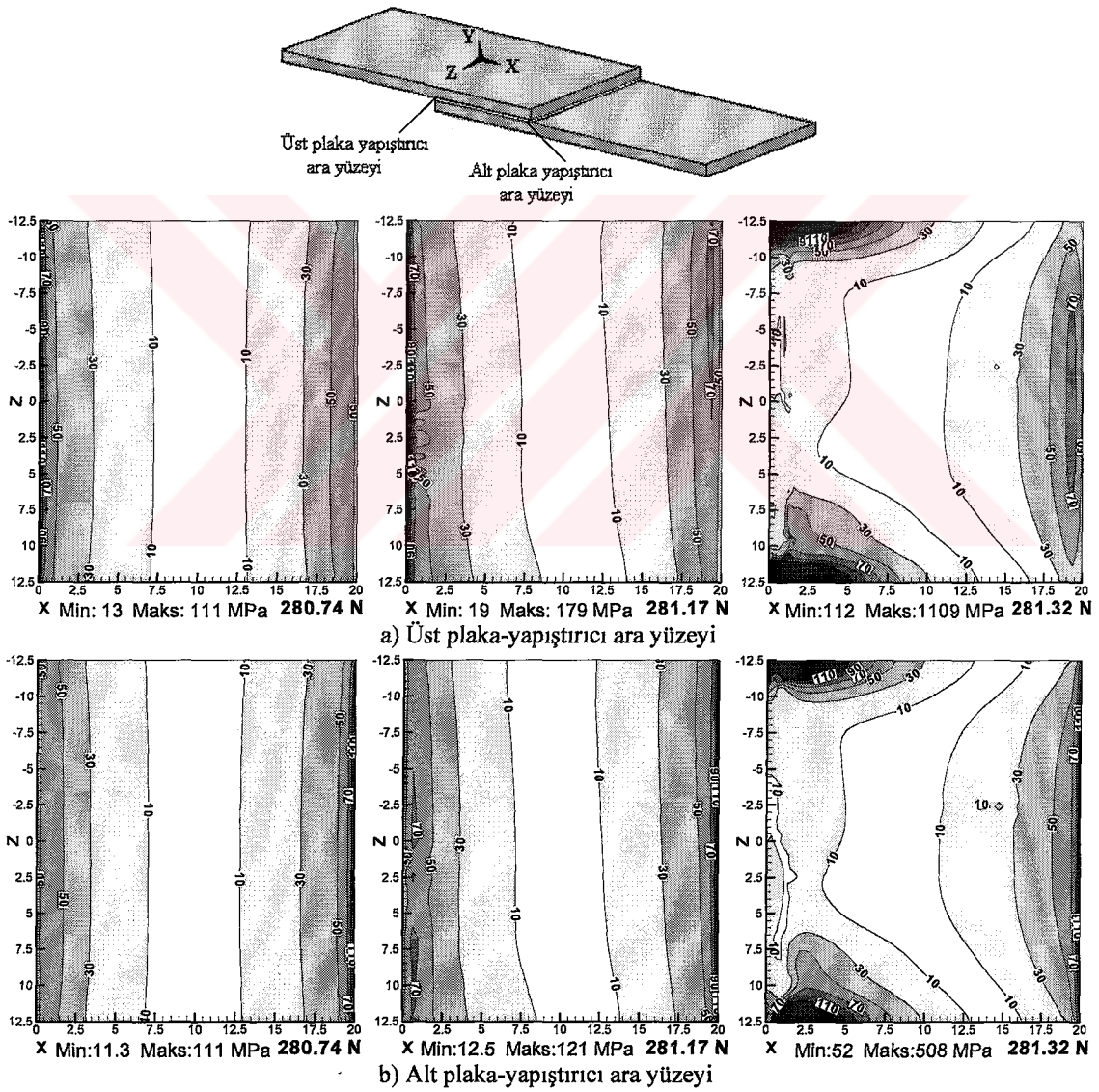
Bindirme bağlantılarının çekme yükü altındaki davranışları kadar eğme yüküne karşı gerilme ve deformasyon davranışlarını da bilmek uygulamada hayati önem arz etmektedir. Üç nokta eğme yüküne maruz tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının (Şekil 3-14) üst plakasının sol alt köşesindeki düğüm noktalarının hareketi yatay ve düşey yönlerde önlenirken, alt plakanın sağ alt köşesindeki tüm düğüm noktalarının da düşey yöndeki hareketi sınırlanmıştır. İlaveten bindirme bölgesinin ortasında düşey yönde bir kuvvet kademeli uygulanarak bağlantı eğilmeye çalışılmıştır. Uygulanan eğme kuvveti arttırılırken, çekme durumundaki gibi yapıştırıcı tabakasının üst plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sol ucuna ve alt plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sağ ucuna tekabül eden yapıştırıcı bölgelerinde eş değer gerilme en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. (Şekil 3.15-17).



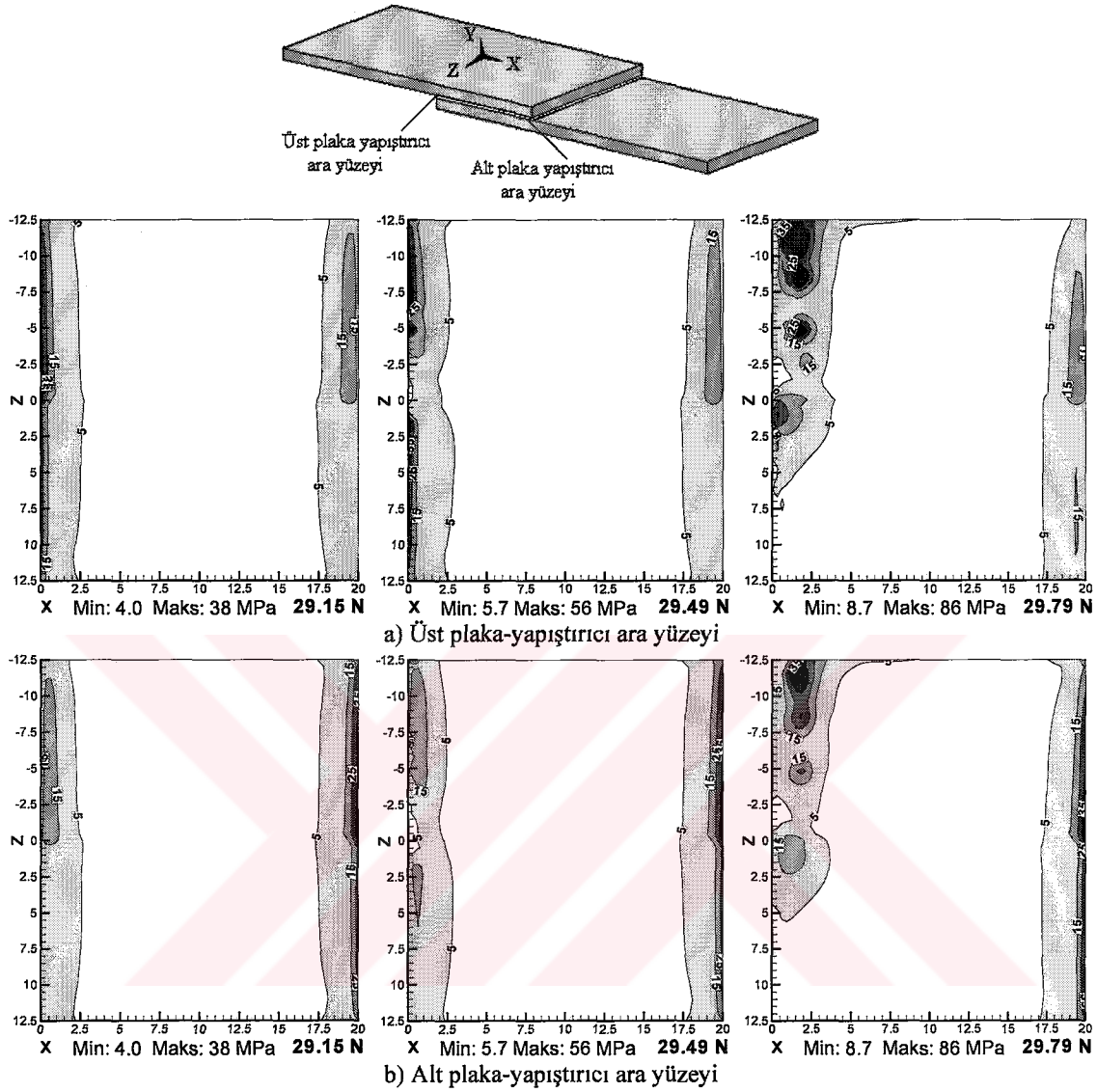
Şekil 3-14 Üç nokta eğme yükü altında bindirme bağlantısı

Şekil 3-18 üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü kompozit bindirme bağlantısına ait hasar oluşum ve gelişimini göstermektedir. İlk hasar 281.06 N da üst plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında başlamaktadır. Hasar, 1 ve 2 numaralı katmanlarda ilerlerken, üst plakada 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı katmanların tümünde 281.17 N da ilk hasarlar başlamaktadır ve hasarlar genelde yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o

hat boyunca ilerlemektedir. Üst plakada hasar iyice ilerlerken alt plakada, ilk hasar 281.27 N da 1 ve 6 nolu katmanlar arasında tüm katmanlarda plakanın uç noktasında sağ ve sol köşelerde başlamaktadır. Üst plakada hasarın iyice yayıldığı yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden kısma denk gelen alt plaka bölgesinin yükü taşıyamadığı için hasara uğradığı anlaşılmaktadır. Daha sonraki yük adımında uçtaki hasar ilerlemekle birlikte yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden kısımda da hasar oluşmaktadır. 7, 8, 9 ve 10 numaralı katmanlarda ise kopma yükü olan 281.32 N da hasar plakanın ucunda az miktarda hasar oluşmaktadır.



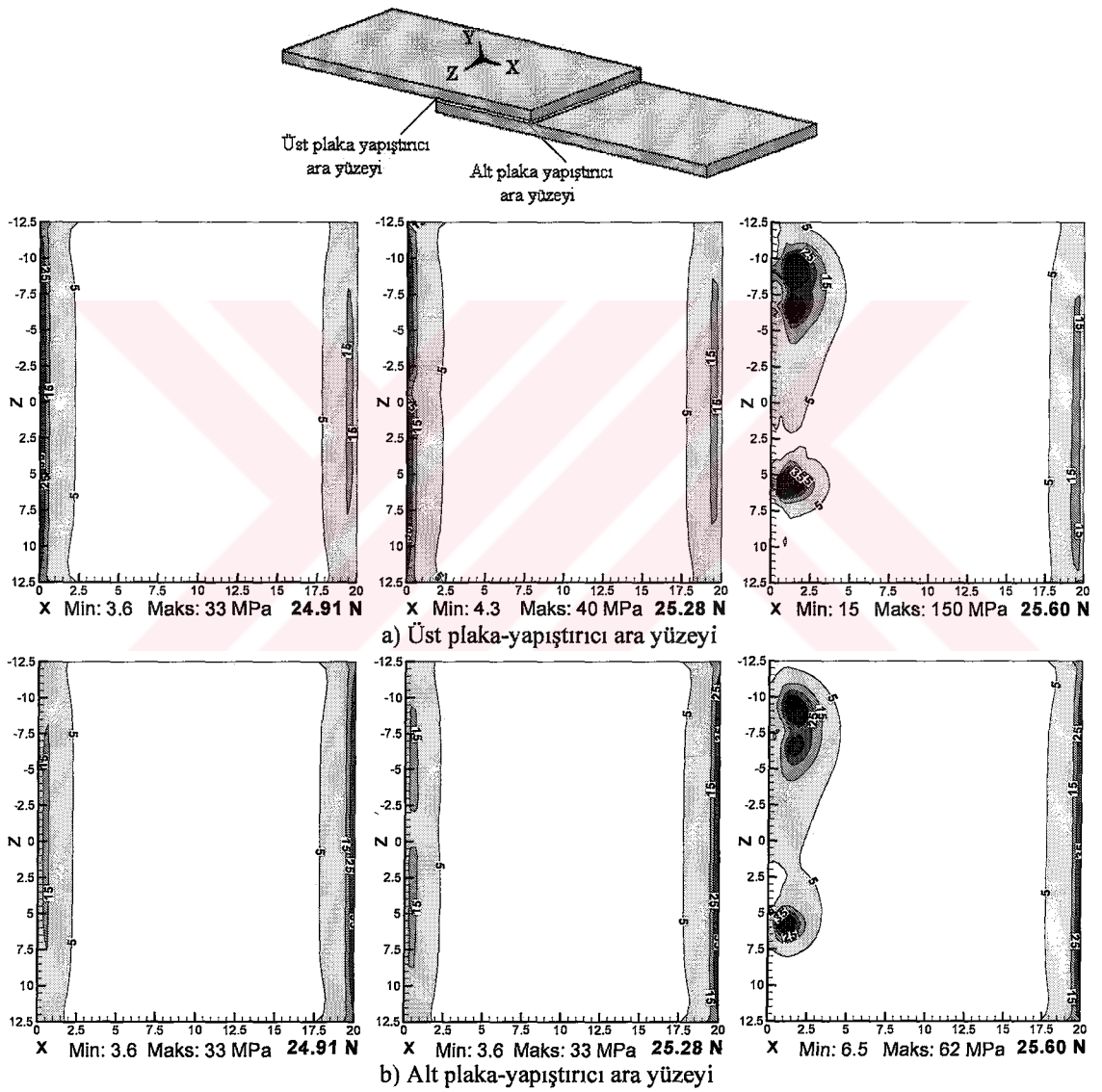
Şekil 3-15 0° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları



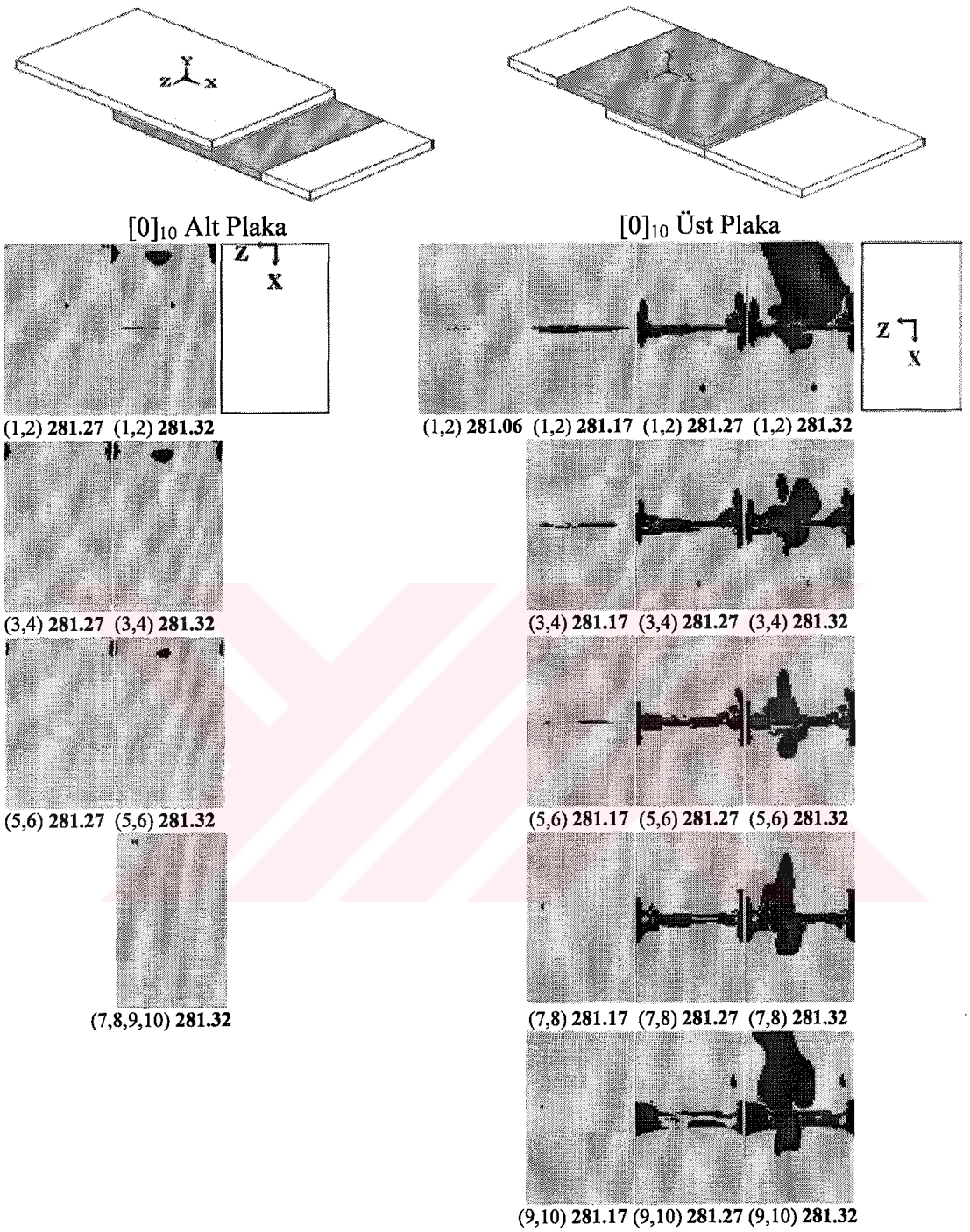
Şekil 3-16 45° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları

45° yönlü kompozit bindirme bağlantısına ait hasar oluşum ve gelişimi Şekil 3-19'da gösterilmiştir. Hasarın sadece üst plaka olduğu ve ilk hasarın 29.15 N da 1 ve 2 numaralı katmanlarda başladığı aşikardır. Hasar, (3,4) nolu katmanlarda 29.20 N, 5'de 29.36 N, 6'da 29.42 N, (7,8)'de 29.57 N, (9,10) nolu katmanlarda da 29.68 N da hasarlar oluşmaktadır. 3.17-3.19 nolu şekiller gerilme yığılmalarının yapıştırıcı serbest uçlarında ortaya çıkması nedeniyle hasarlar yine yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o hat boyunca ilerlemekte olduğunu göstermektedir.

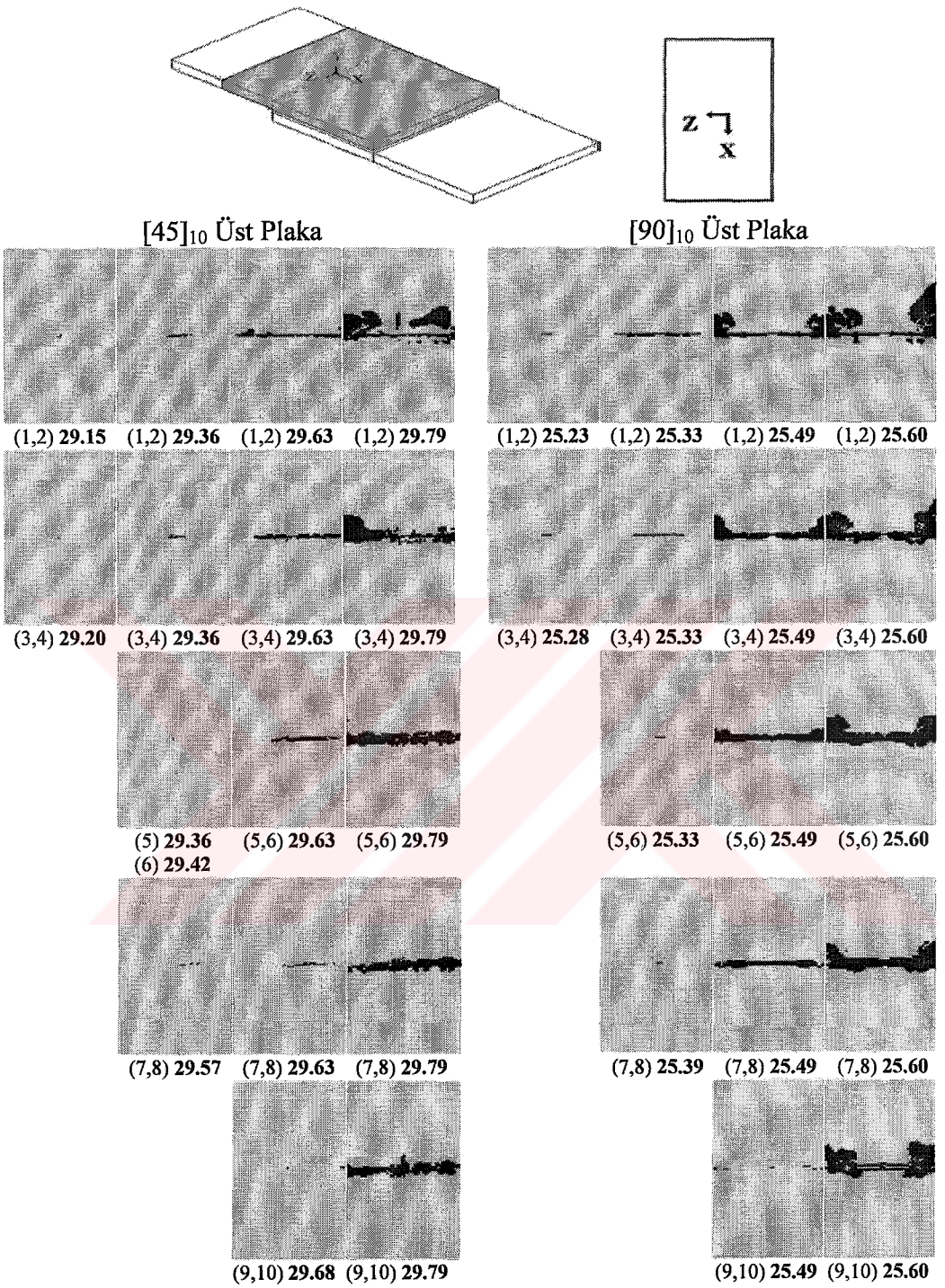
Şekil 3-19'da 90° yönlü kompozit bindirme bağlantısına ait hasar oluşum ve gelişimi görülmektedir. Hasarın 45° 'lik kompozit bindirme bağlantılarındaki gibi sadece üst plaka da olduğu ve ilk hasarın 25.23 N da 1 ve 2. katmanlarda başladığı görülmektedir. Ayrıca (3,4) nolu katmanlarda 25.28 N, (5,6)'da 25.33 N, (7,8)'de 29.39 N, (9,10)'da da 29.49 N da hasarlar yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o hat boyunca ilerlemektedir.



Şekil 3-17 90° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları



Şekil 3-18 Üç nokta eğme yükü altında 0° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

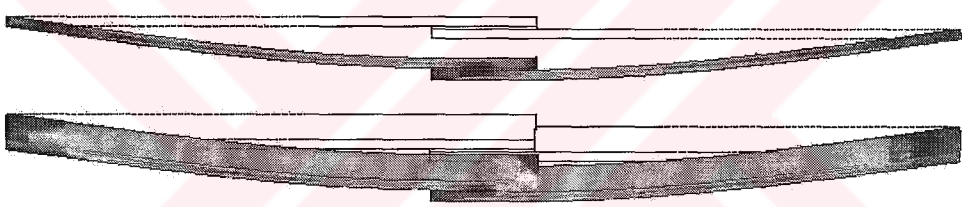


Şekil 3-19 Üç nokta eğme yükü altında 45 ve 90° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

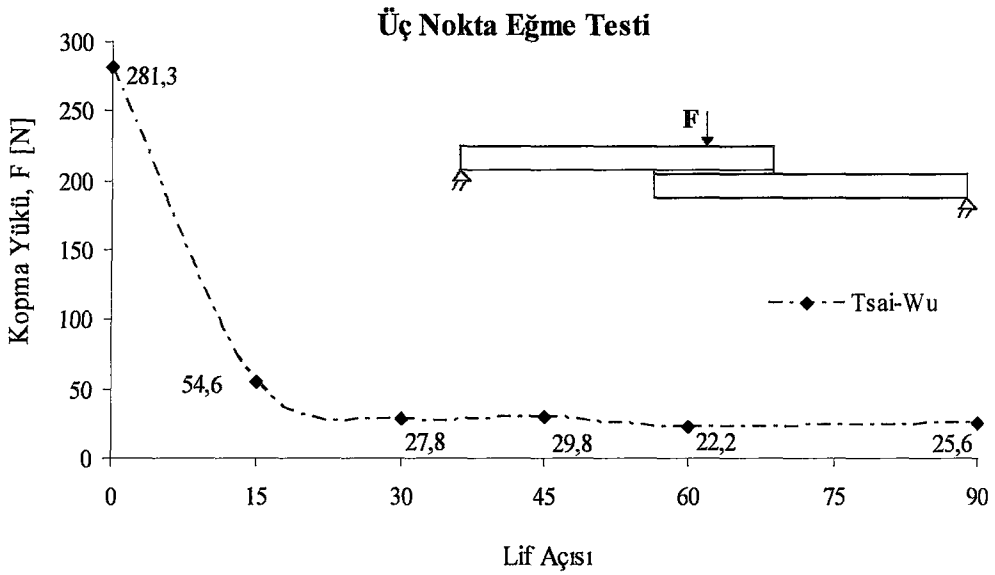
Yapıştırıcı tabakasının sol ucu çekme gerilmelerine maruz iken sağ ucu basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Crocombe [56] epoksi yapıştırıcıların basma halinde dayanımının çekme halindeki dayanımının 3 ila 3.6 katı olduğunu tespit etmiştir. Bağlantı

geometrisinin yüke göre simetri göstermesi nedeniyle bağlantının sol ve sağ tarafında ortaya çıkan gerilme ve şekil değiştirme dağılımları simetriktir. Ancak yapıştırıcı tabakasının sol ucunun çekme halinde sağ ucunun da basma halinde olması nedeniyle sol uç sağ uca göre 3 ila 3.6 kat daha zayıftır. Bu nedenle, kompozit tek bindirme bağlantılarının üç nokta eğme analizinde daha önce bahsedildiği gibi hasarlar üst plakada başlamakta ve yayılmaktadır.

Şekil 3-20'de kompozit tek bindirme bağlantısının üç nokta eğme yükü altındaki deforme olmuş ve olmamış geometrileri gösterilmektedir. Sınır şartları nedeniyle üst ve alt plakanın, alt yüzeyi çekmeye maruz iken üst yüzeyi de basma etkisindedir. Bindirme bölgesinde ise yapıştırıcı tabakasının sağ serbest uç basma etkisinde iken sol serbest ucu çekme etkisindedir. Bağlantının her iki serbest ucunun düşey yöndeki hareketi sınırlandırıldığı için bindirme bölgesi çekmeye maruzdur.



Şekil 3-20 Kompozit tek bindirme bağlantısının üç nokta eğme yükü altındaki deforme olmuş ve olmamış geometrisi

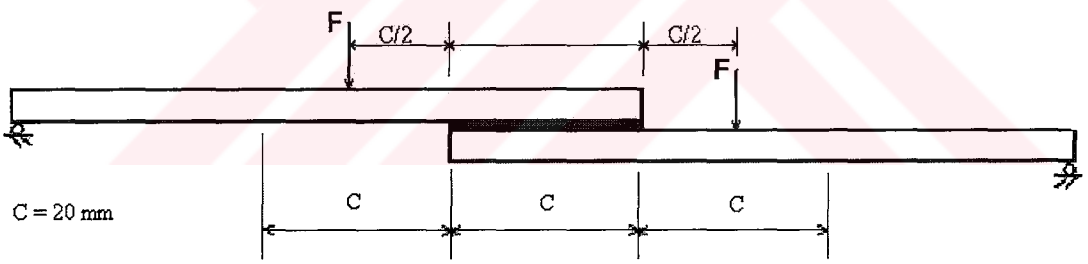


Şekil 3-21 Üç nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi

Şekil 3-21'de üç nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi grafiği verilmiştir. Bu grafiğin Şekil 3-13'de verilmiş olan E_1 elastiklik matrisinin lif açısına göre değişim grafiği ile benzer olduğunu ve lif açısı büyüdükçe dayanımın azaldığı açıktır. Sonuç olarak, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının üç nokta eğme yüküne dayanımı bindirme bağlantısında ki kompozit plakaların yönelim açısının değişimi ile doğrudan ilişkilidir ve lifler uygulanan yüke paralelken en yüksek dayanımı göstermektedir.

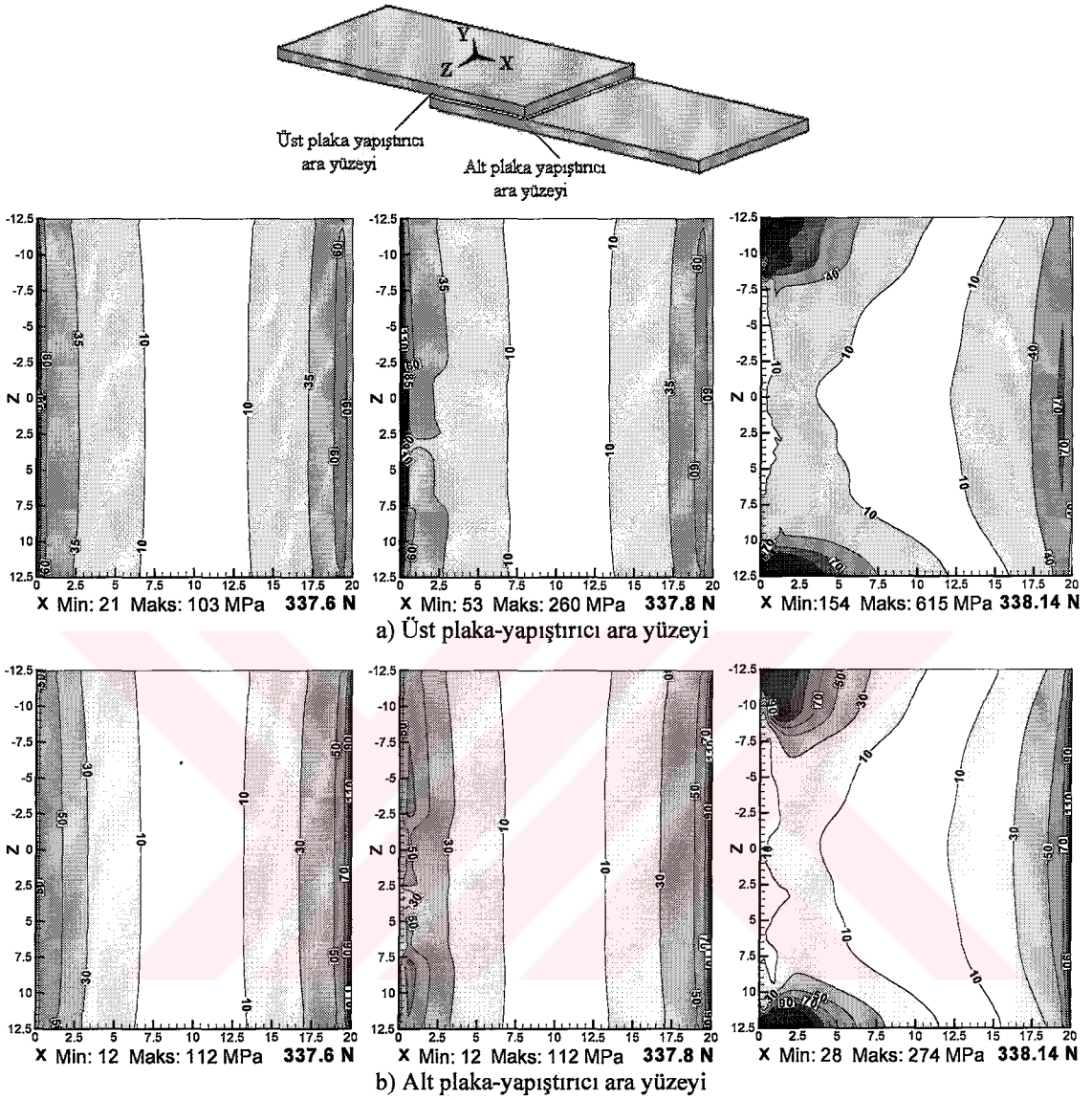
3.3.3 Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantısı

Dört nokta eğme yüküne maruz tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının yükleme ve sınır şartları Şekil 3-22' de verilmiştir. Bağlantının üst plakasının sol ucunun altındaki tüm düğüm noktalarının hareketi yatay ve düşey yönlerde engellenirken, ilaveten alt plakanın sağ alt ucuna tekabül eden tüm düğüm noktalarının düşey yöndeki hareketi engellenmektedir. Aynı zamanda bindirme bölgesinden bindirme boyunun yarısı kadar sağ ve solda düşey yönde kuvvetler uygulanmıştır.



Şekil 3-22 Dört nokta eğme yükü altında bindirme bağlantısı

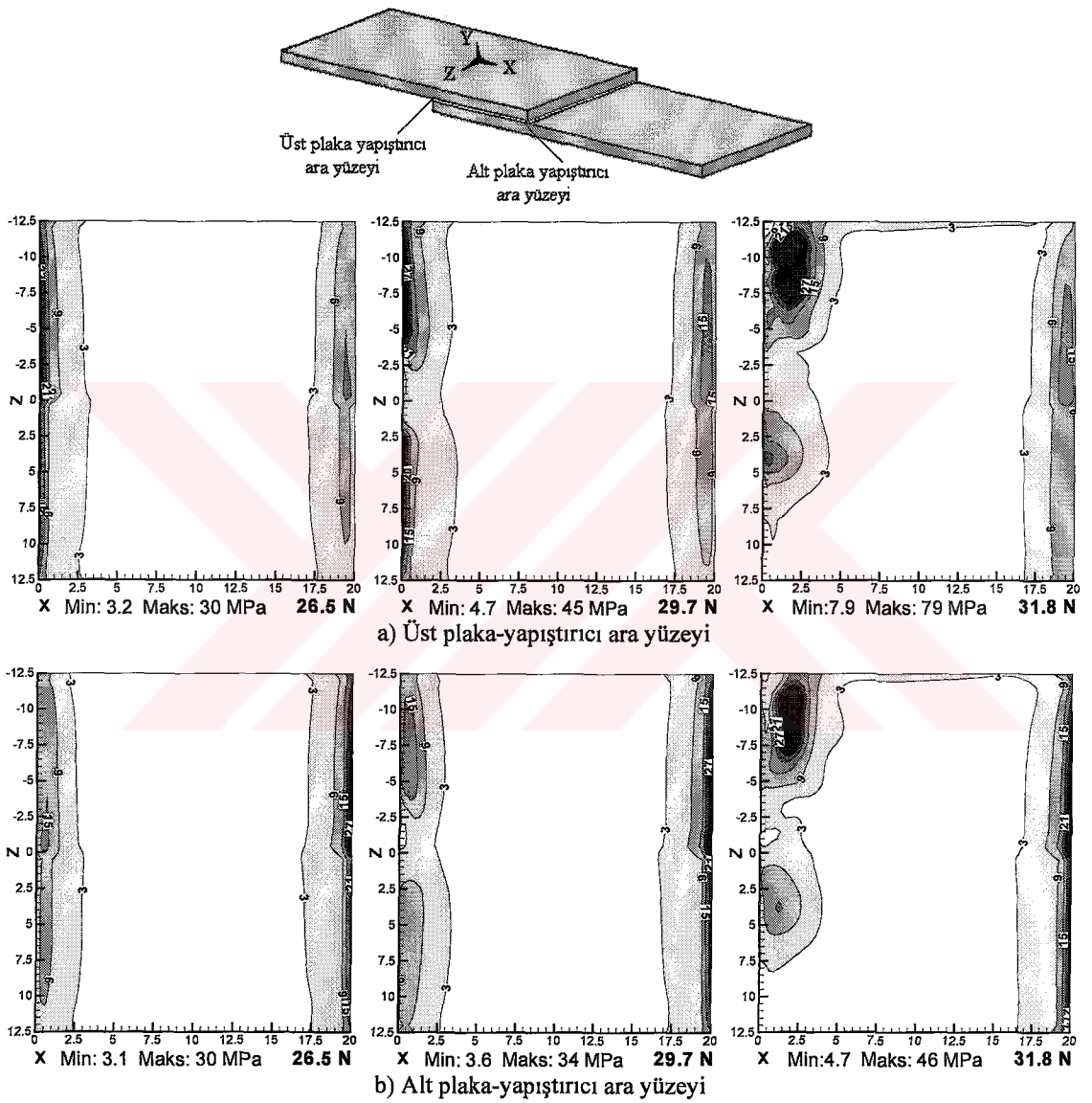
Uygulanan eğme kuvvetleri arttırılırken, yapıştırıcı tabakasının üst plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sol serbest ucundaki ve alt plaka-yapıştırıcı ara yüzeyinin sağ serbest ucundaki tekabül eden yapıştırıcı bölgelerinde gerilme yığılmaları oluşmakta ve eş değer gerilmeler en yüksek seviyelere ulaşmaktadır (Şekil 3.23-25).



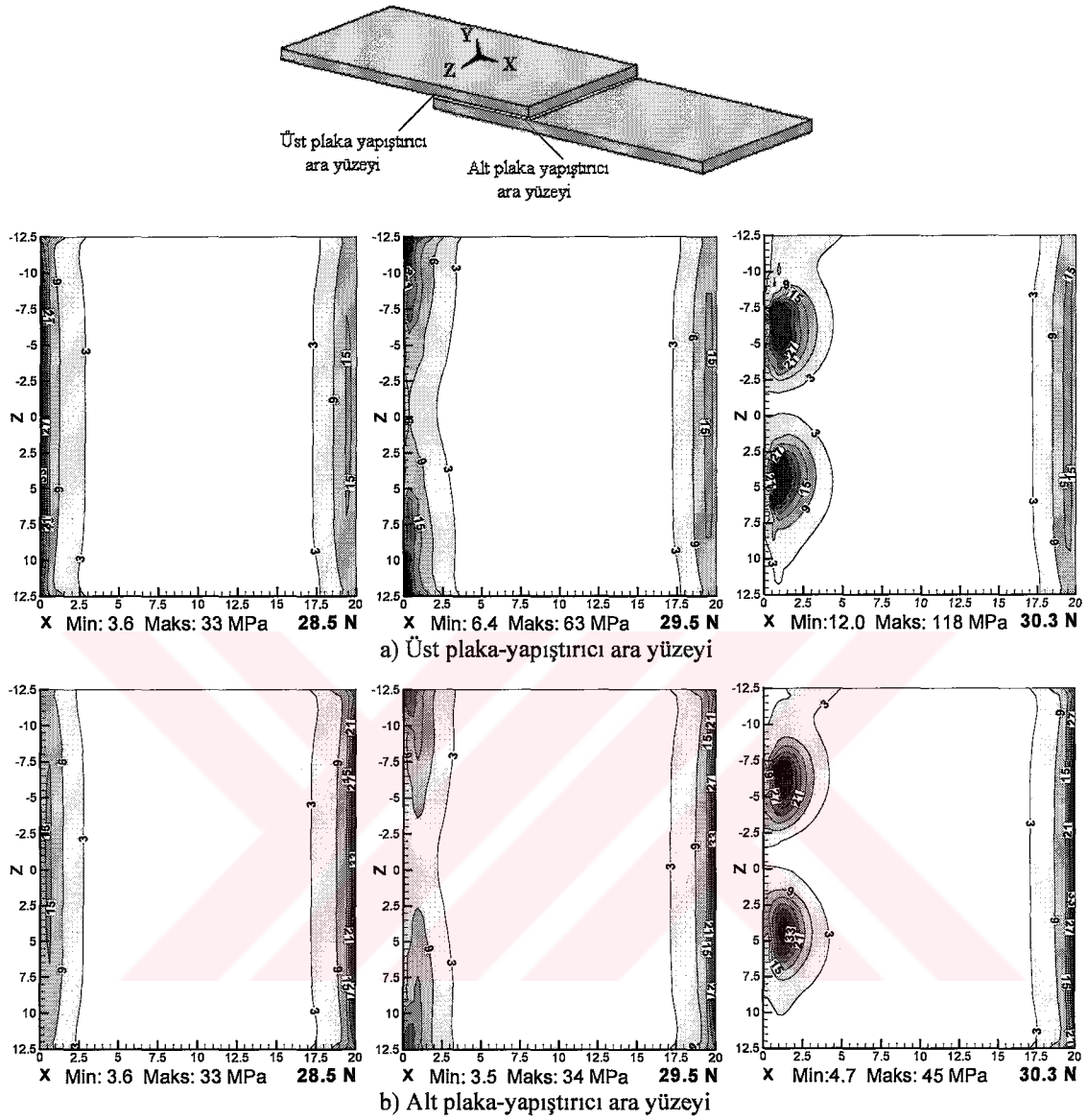
Şekil 3-23 0° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları

Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü kompozit bindirme bağlantısına ait hasar oluşum ve gelişimi Şekil 3-26'da gösterilmiştir. İlk hasar 337.61 N da üst plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında başlamaktadır. Hasar, 1 ve 2 numaralı katmanlarda ilerlerken, üst plakada (3,4,5,6) numaralı katmanlarda 337.82 N da ilk hasarlar başlarken (7,8) numaralı katmanlarda 337.93 N da, (9,10) numaralı katmanlarda ise 338.03 N da başlamaktadır. Hasarlar yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden bölgenin ortasında başlayıp o hat boyunca ilerlemektedir. Üst plakada hasar iyice ilerlerken alt plakada, ilk hasar 337.93 N da 1 ve 2 numaralı katmanlarda daha sonra (3,4,5,6) nolu katmanlarda 338.03 N da ve

(9,10) nolu katmanlarda ise 338.14 N da plakanın uç noktasında sağ ve sol köşelerde başlamakta ve 338.14 N da bağlantı kopmaktadır. Üst plakada hasar yapıştırıcının serbest ucuna tekabül eden kısımda iyice yayıldığı için yükü taşıyamamakta ve alt plakada o bölgeye tekabül eden kısım hasara uğramaktadır.

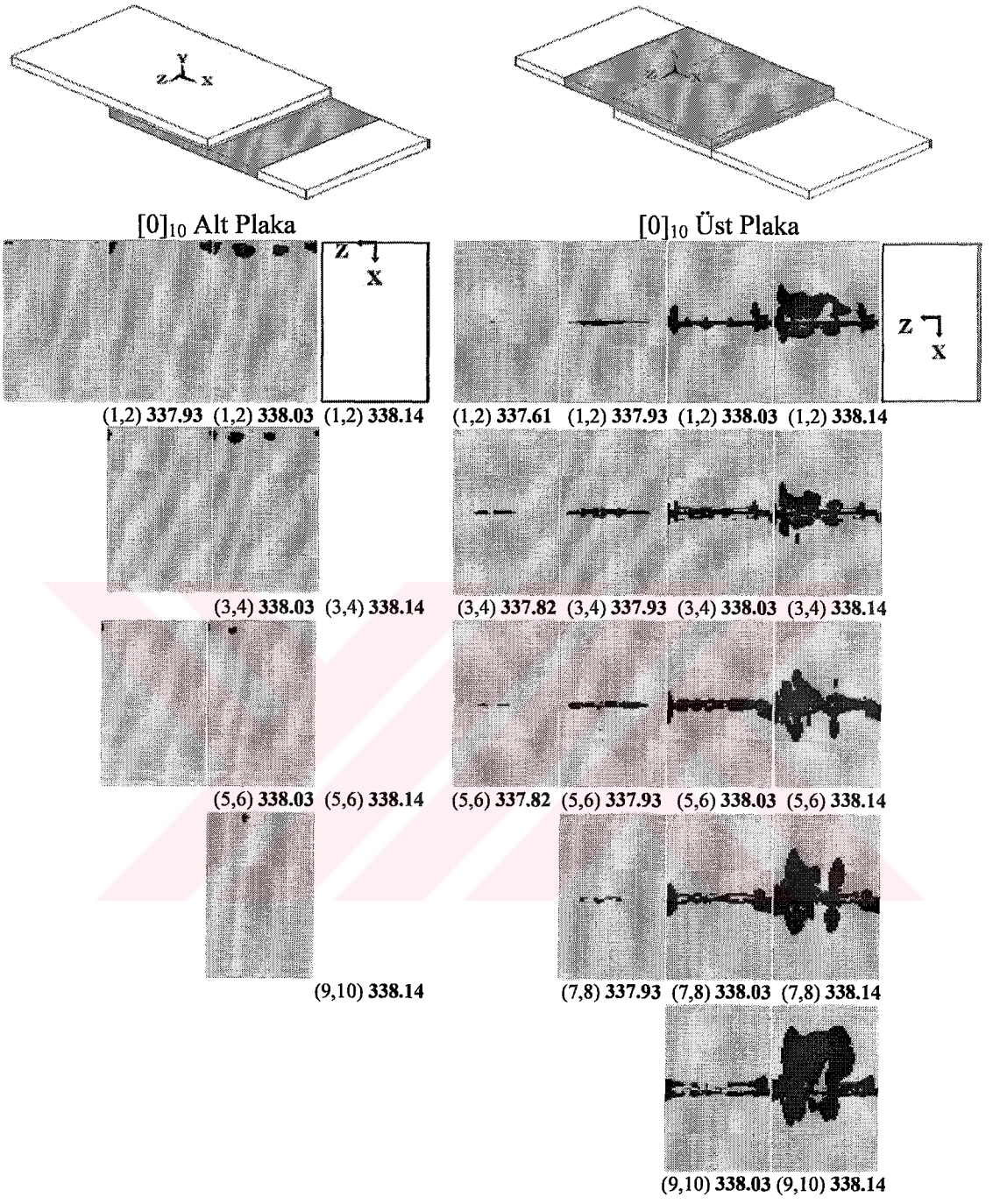


Şekil 3-24 45° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları



Şekil 3-25 90° lik kompozit bindirme bağlantısında yapıştırıcının von-Mises gerilme dağılımları

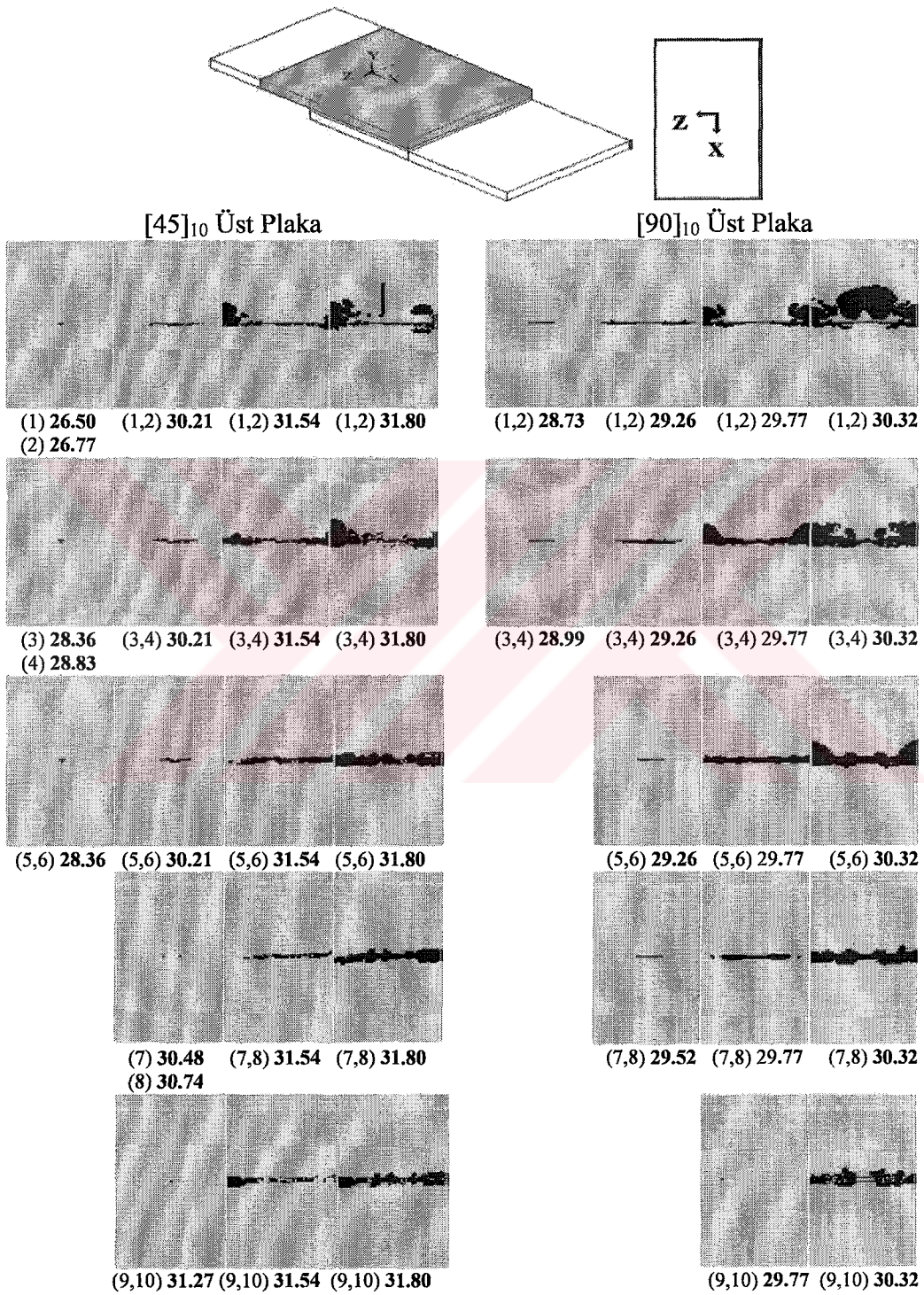
Şekil 3-27'de 45° yönlü kompozit bindirme bağlantısına ait hasar oluşum ve gelişimi görülmektedir. Hasarın sadece üst plakada olduğunu ve ilk hasarın 26.50 N da 1 ve 26.77 N da 2 numaralı katmanda başladığını görmekteyiz. Hasar, 3, 4, (5,6), 7, 8 ve (9,10) nolu katmanlarda sırasıyla 28.36, 28.83, 28.36, 30.48 ve 31.27 N da Şekil 3.23-25'de görüldüğü gibi gerilme yığılmalarının oluştuğu yapıştırıcı serbest uçlarında, ortada başlayıp o hat boyunca ilerlemektedir.



Şekil 3-26 Dört nokta eğme yükü altında 0° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

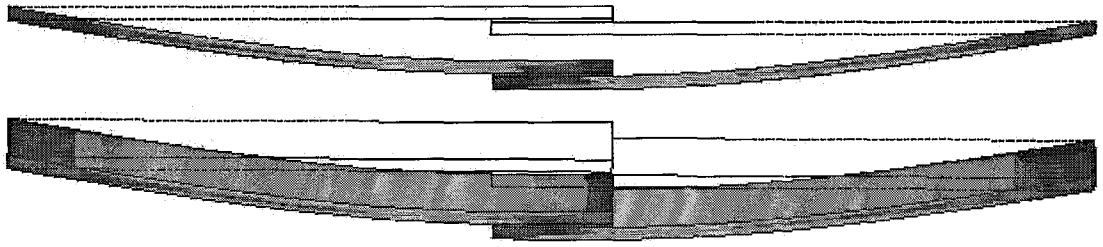
90° yönlü kompozit bindirme bağlantısında ise, hasar 45°'deki gibi sadece üst plakada oluşmuştur. Şöyle ki, ilk hasar 28.73 N da 1 ve 2 numaralı katmanlarında başlamıştır (Şekil 3-27). Hasar, (3,4) nolu katmanlarda 28.99 N, (5,6)'da 29.26 N, (7,8)'de 29.52 N, (9,10)'da

da 29.77 N da hasarlar gerilme yığılmalarının olduğu yapıştırıcı serbest uçlarında oluşmaktadır.

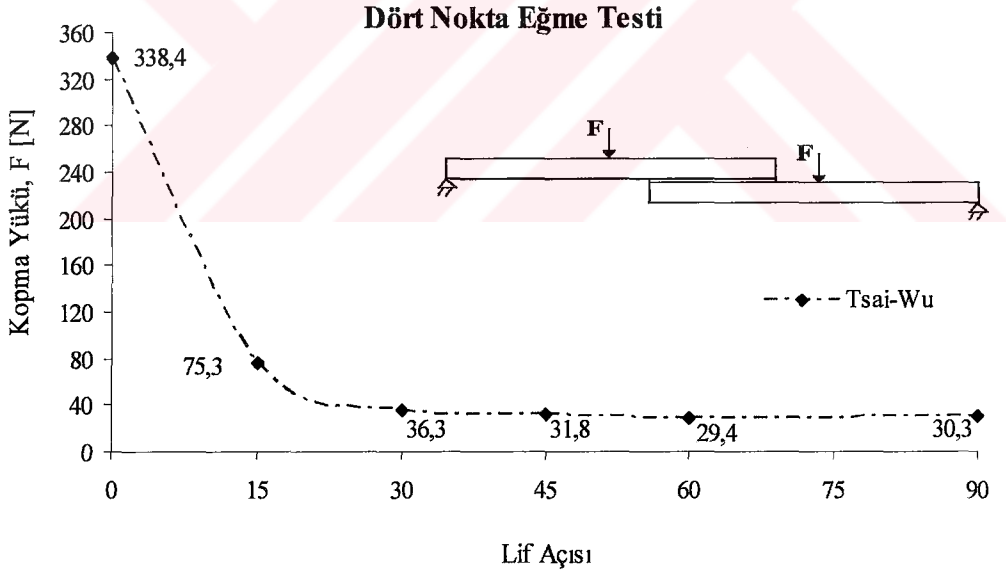


Şekil 3-27 Dört nokta eğme yükü altında 45 ve 90° lik yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantısında Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Şekil 3-28'de kompozit tek bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altındaki deforme olmuş ve olmamış hali verilmiştir. Sınır şartları nedeniyle üst ve alt plakanın, alt yüzeyi çekmeye maruz iken üst yüzeyi de basma etkisindedir. Bindirme bölgesinde ise yapıştırıcı tabakasının sağ serbest uç basma etkisinde iken sol serbest ucu çekme etkisindedir. Bağlantının her iki serbest ucunun düşey yöndeki hareketi sınırlandırıldığı için bindirme bölgesi çekmeye maruzdur.



Şekil 3-28 Kompozit tek bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altındaki deforme olmuş ve olmamış geometrileri

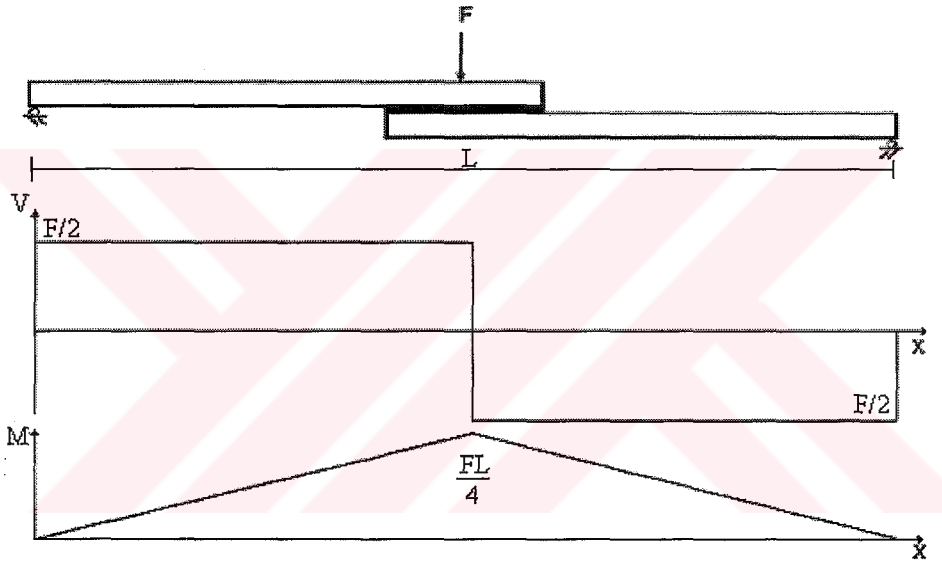


Şekil 3-29 Dört nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi

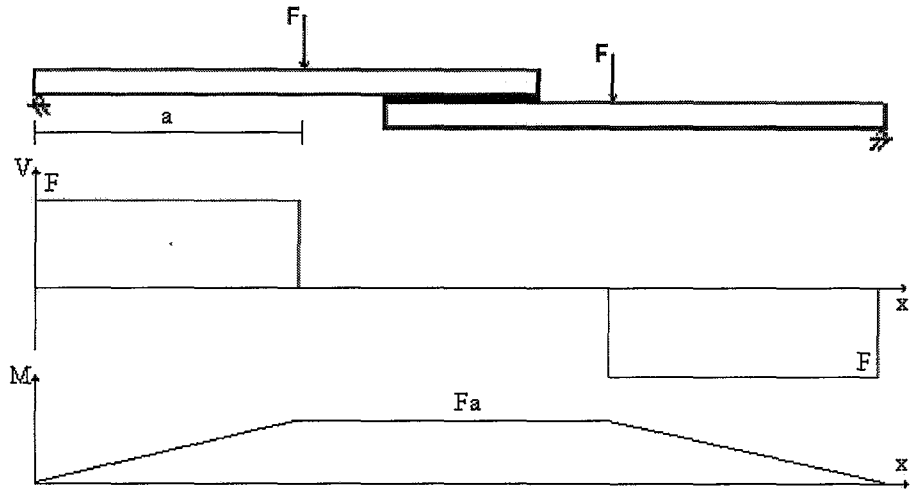
Şekil 3-29'da dört nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi grafiği verilmiştir. Şekil 3-13'de verilmiş olan E_1 elastiklik matrisinin lif açısına göre değişimi ile benzerdir ve lif açısı büyüdükçe dayanımın düştüğü aşikardır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının dört nokta eğme yüküne

dayanımı bindirme bağlantısında ki kompozit plakalarında lif yönelim açısının değişimi ile doğrudan ilişkilidir ve lifler uygulanan yüke paralelken en yüksek dayanımı göstermektedir.

Şekil 3.30-31'de gösterildiği gibi üç nokta eğilme durumunda yapışma bölgesinde moment lineer olarak artar iken, dört nokta eğilme durumunda moment sabittir. Bu nedenle, üç nokta eğilme durumunda kesme kuvveti tesiri mevcut olup kayma gerilmeleri belirgin iken dört nokta eğilme durumunda kesme kuvveti sıfır olduğu için kayma gerilmeleri de ihmal edilir seviyelerdedir. Bu nedenle, üç nokta eğme testinde hasarın başlaması dört nokta eğme testine göre daha düşük yük değerlerinde olmaktadır.



Şekil 3-30 Üç nokta eğilme için basit kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları



Şekil 3-31 Dört nokta eğilme için basit kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramları

BÖLÜM 4

HASHIN HASAR KRİTERİ İLE HASAR TAHMİNİ

4.1 Giriş

Hasar, mikro seviyede lifte, matriste ve lif-matris ara yüzeyinde meydana gelirken makro seviyede yapının dayanım bakımından zayıflaması olarak değerlendirilir. İlk hasar daima mikro seviyede başlar ve yavaş yavaş genel kusurlar veya hasar modlarına dönüşür. Amaç kompozit yapının hasar davranışını tahmin etmek olduğunda mikro seviyede mevcut kusurlar ilave zorluklar oluşturur. Bu nedenle tabakalı kompozit yapıların hasar analizinde katman seviyesinde hasara odaklanmak daha uygundur.

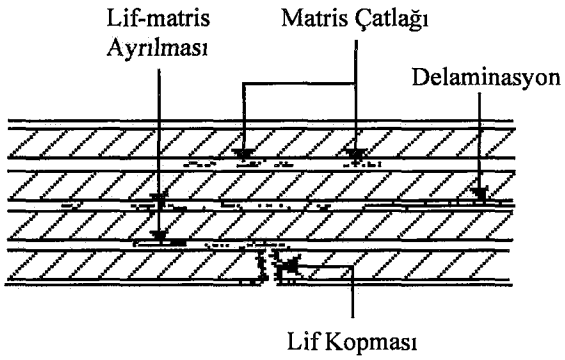
Önceki bölümde Tsai-Wu kırılma kriterine göre yapılan hasar analizi bu bölümde Hashin kırılma kriterine göre yapılacaktır. Hasarın ilaveten Hashin kriterine göre tekrarlanması Hashin kriterinin hasarı modlara ayırması ve her birini kendi içinde ve basma-çekme durumlarına göre ayrı ayrı incelemesidir. Önceki bölümde Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği hasar modlarında, kompozit yapışanların hasarının matristen veya liften geliştiği açık değildi. Hashin kriteri, kompozit yapışanlarda hasarın matriste mi, lifte mi yoksa katmanların birbirinden ayrılması tarzında mı olduğunu görmemize imkan sağlayacaktır.

4.2 Hasar Modları

Lif takviyeli polimerik kompozitler, anizotropik ve heterojen yapılarından dolayı dört değişik önemli hasar modunun ortaya çıkmasına müsaittirler. Bu modların tabakalı bir kompozit üzerindeki modeli Şekil 4-1'de görüldüğü gibidir.

i. Matris modu (Em) : Matris takviye elemanı olan liflerin mukavemetinden daha az mukavemete sahip olduğu için, matris çatlakları yerel hasarların en

önemlilerindendir. Matris kırılmaları, tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lifin eksenine paralel düzlemlerde oluşur. Bunun nedeni basma ve kayma gerilmeleridir.



Şekil 4-1 Muhtemel hasar modlarının gösterimi

ii. Lif-matris ayrılması modu (Es) : Lifi saran matris ve lif arasındaki bağ koparak matris liften ayrılır. Bu ayrışma ile matris tarafından life sağlanan destek ortadan kalkar ve zayıflama başlayarak kopma kaçınılmaz olur. Matrisin çatlaması ve lif-matris ayrılması hasar modları eş zamanlı veya az bir yük farkı ile meydana gelir.

iii. Delaminasyon modu (Ed) : Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı lif oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir kırılmadır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı lif yönlenmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyuşmazlık ne kadar büyük olursa, ki 0/90° en kötü lif doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, yığılma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir. Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris kırılması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Fakat bu bölge her zaman tam olarak ara yüzey bölgesi olmamakla beraber her iki tarafta da bir miktar gelişebilir.

iv. Lif Kopma Modu (Ef) : Hasar modlarından bir diğeri olan lif kopması, genellikle matris kırılması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelir. Lif kopmasına

neden olan en önemli iki faktör; yüksek yerel gerilmeler ve kesme kuvvetleri etkileri ile yüksek eğme gerilmeleridir.

Bu hasar modları için analizlerde Hashin kriteri için, kullanılan malzemenin mekanik özelliklerini düşürme modeli aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2. Malzeme özelliklerinin hasar moduna göre düşürülmesi (E_x , E_y , E_z , G_{12} , G_{13} ve G_{23} 'ün birimleri Pa'dır.)

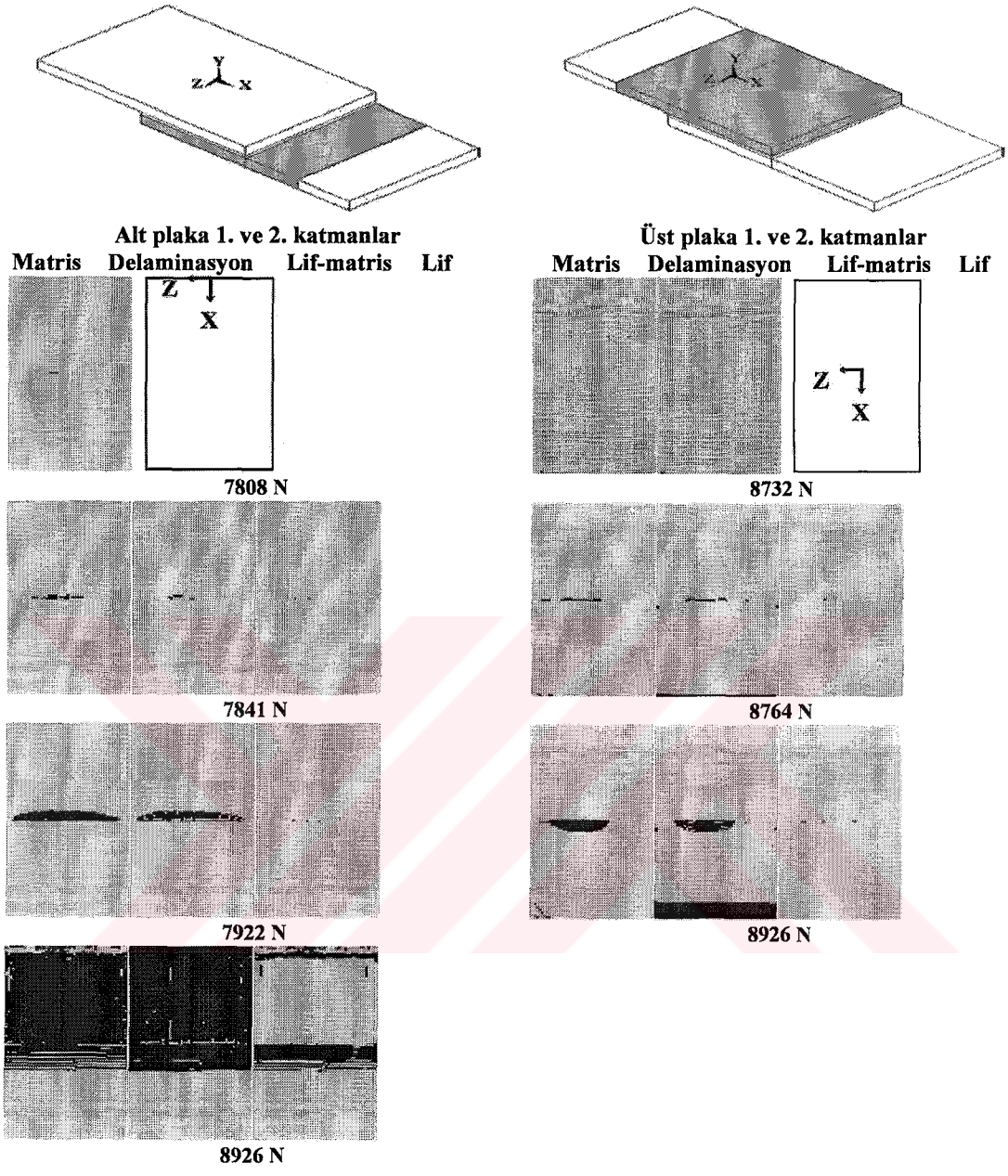
Matris (Em)	Delaminasyon (Ed)	Lif-matris (Es)	Lif (Ef)
$E_y = 10.3$	$E_z = 10.3$	$\upsilon_{12} = 10^{-8}$	$E_x = 142$
$E_z = 10.3$	$\upsilon_{12} = 10^{-8}$	$\upsilon_{13} = 10^{-8}$	$E_y = 10.3$
$\upsilon_{12} = 10^{-8}$	$\upsilon_{13} = 10^{-8}$	$G_{12} = E_x/2(1+\upsilon_{12})$	$E_z = 10.3$
$\upsilon_{13} = 10^{-8}$	$G_{12} = E_x/2(1+\upsilon_{12})$	$G_{13} = G_{12}/5000$	$\upsilon_{12} = 10^{-8}$
$G_{12} = E_x/2(1+\upsilon_{12})$	$G_{13} = G_{12}/5000$	$G_{23} = G_{13}$	$\upsilon_{13} = 10^{-8}$
$G_{13} = G_{12}/5000$	$G_{23} = G_{13}$		$\upsilon_{23} = 10^{-8}$
$G_{23} = G_{13}$			$G_{12} = E_x/2(1+\upsilon_{12})$
			$G_{13} = E_z/2(1+\upsilon_{13})$
			$G_{23} = E_y/2(1+\upsilon_{23})$

4.3 Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantılarında Hashin Kırılma Kriterine Bağlı Hasar Oluşum ve Gelişiminin Teorik İncelenmesi

Tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarında oluşan hasarı belirlemek için, ilk olarak Bölüm 3'de kompozit malzemelerdeki hasarı makroskobik seviyede incelerken kuvadratik formda bir polinoma dayanan Tsai-Wu kırılma kriteri kullanılmıştı. Bu bölümde ise Hashin kırılma kriteri ile Şekil 3-1'de verilen akış diyagramındaki işlem sırası birleştirilerek tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarında değişik açılar ile çekme ve eğilme yükleri altında hasar oluşumu ve gelişimi incelenmiştir.

4.3.1 Çekme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları

Çekme yüküne maruz tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının yükleme ve sınır şartları Şekil 3-4 de verildiği gibi bu kırılma kriterinde de aynen uygulanmıştır. Tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarının Hashin kriterine göre hasar analizinde de değişik altı açı değerine sahip bindirme bağlantıları ayrı ayrı incelendi ve sonuçlar karşılaştırıldı. Temsili olarak 0, 45, 90° açılı bindirme bağlantılarına ait hasar oluşumları irdelendi.

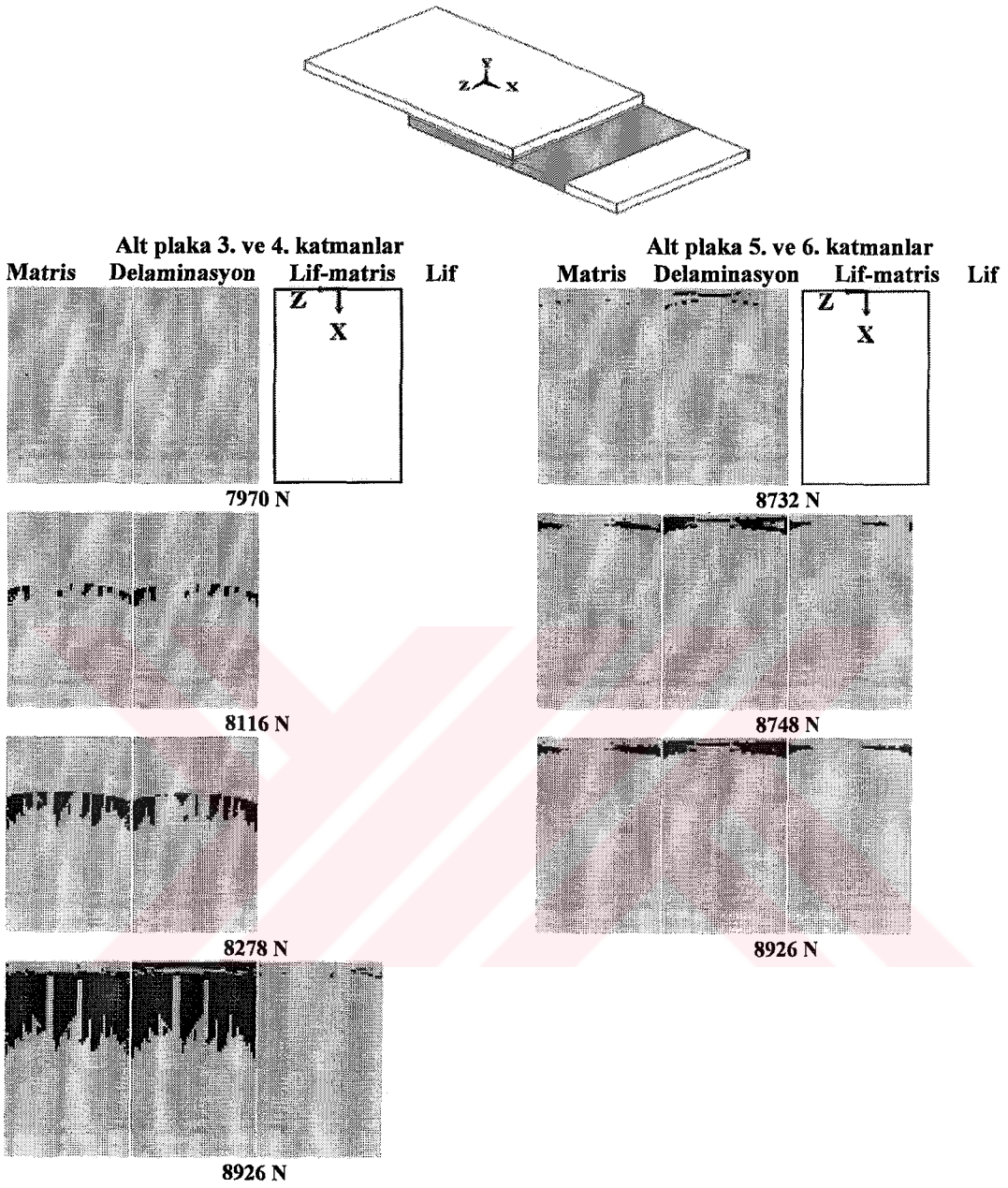


Şekil 4-2 Çekme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 1 ve 2. katmanı ile üst plakanın 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Çekme yüküne maruz 0° lik kompozit bindirme bağlantısında, uygulanan yük tesiri ile yapıştırıcı serbest uçlarında gerilme yığılmalarının oluştuğu daha önceki bölümde ifade edilmişti. Oluşan bu gerilme yığılmalarından kompozit yapışanların nasıl etkilendiğini ortaya koyabilmek için kompozitlerin kırılma kriterlerinden Tsai-Wu kriterinin tahmin ettiği hasarları birde Hashin kırılma kriteri ile tahmin etmeye çalıştığımızda görüyoruz ki, ilk hasar 7808 N da alt plakanın yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 numaralı

katmanlarında matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmının ortasında başlamaktadır (Şekil 4-2). Tsai-Wu kırılma kriterinin 0° lik bindirme bağlantısı için tahmin ettiği hasarlar ile karşılaştırıldığında, alt plakada aynı katmanlarda ve aynı bölgede yani kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başladığı görülmektedir (Şekil 3-8). Aralarındaki tek fark, Hashin Kriteri hasarı 7808 N da bulurken Tsai-Wu kriteri 8278 N da tahmin etmiştir. Hashin kriteri Tsai-Wu'ya göre hasarı daha erken tahmin etmiştir. Fakat alt plakada bu katmanların son kopma yüküne baktığımızda Tsai-Wu kriteri katmanların 8343 N da koptuğunu tahmin ederken Hashin kriteri 8926 N da tahmin etmektedir. Sonuçta Hashin kriteri ilk hasarı erken tahmin etmesine rağmen nihai kopmanın daha büyük yüklerde olacağını söylemektedir. Alt plakanın 1. ve 2. katmanlarında hasar yayılırken, üst plakanın 1. ve 2. katmanlarında da hasarlar oluşmaktadır (Şekil 4-2). Üst plakada ilk olarak matris ve delaminasyon hasar modlarında plakanın uçlarında hasar meydana gelmektedir. Sebebi alt plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısım üst plakada uç kısma tekabül etmektedir ve alt plakada bu bölge hasardan dolayı iyice zayıfladığı için yükü taşımak üst plakaya kalmıştır. Üst plaka 1. ve 2. katmanlarında uçta hasar ilerlerken aynı zamanda yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda da hasar meydana gelmektedir ve 8926 N da matris ve delaminasyon hasar modları ile lif-matris ayrılması hasar modlarında katmanlar kopmaktadır.

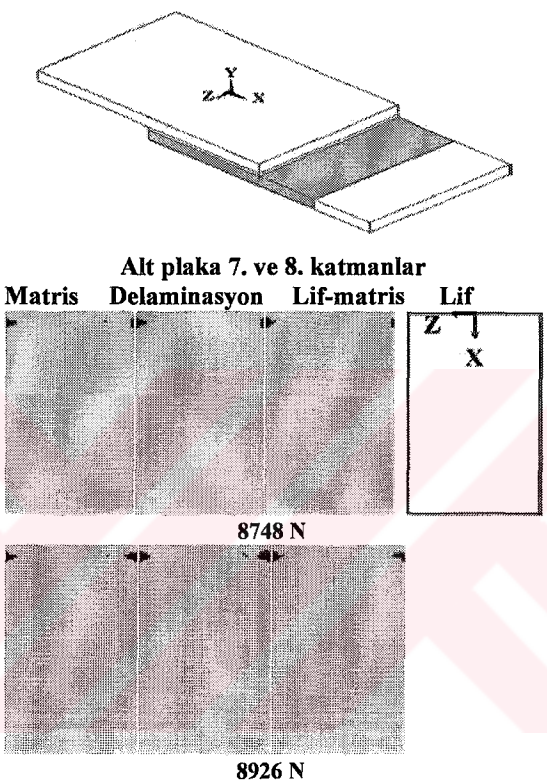
Şekil 4-3 e baktığımızda alt plakada 3 ve 4. katmanlarda yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısmın ortasında matris ve delaminasyon modlarında hasar 7970 N da başlamakta ve yük arttıkça bindirme bölgesinin diğer ucuna kadar ilerlemektedir. 8926 N da lif-matris ayrılması hasar modu da ortaya çıkarak matris, delaminasyom ve lif-matris ayrılması hasar modlarında 3 ve 4. katmanlar kopmaktadır. Alt plakada 5, 6, 7 ve 8. katmanların hasarlarını incelediğimizde (Şekil 4-4) hasarın matris ve delaminasyon hasar modlarında plakanın uç kısmında oluştuğunu ve bu bölgede yayıldığını görmekteyiz. Bu katmanlardaki hasar 3 ve 4. katmanlardaki hasarın devamı şeklindedir.



Şekil 4-3 Çekme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 3, 4, 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

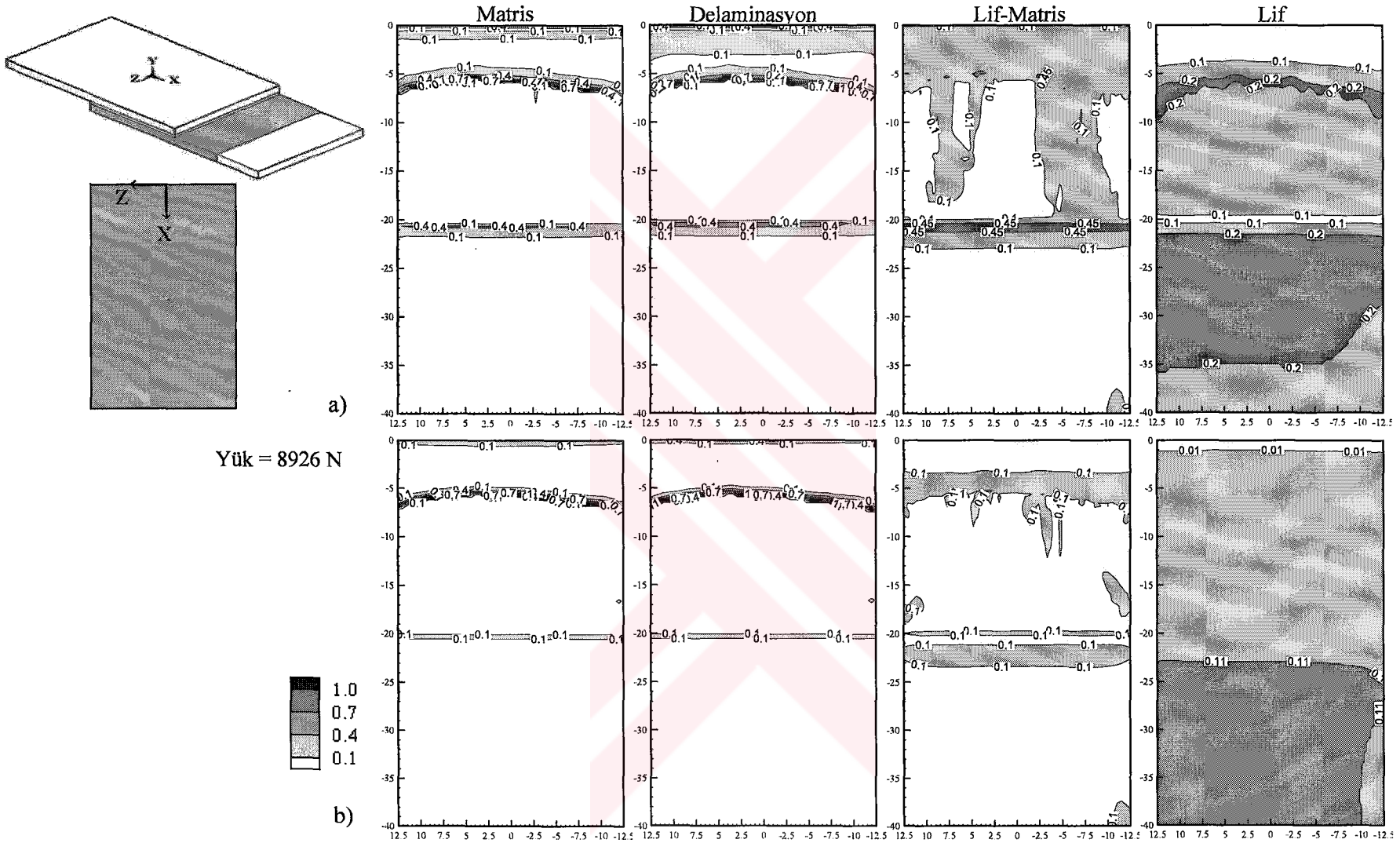
Sonuç olarak; Hashin kriterinin hasar tahminine göre, 0° lik kompozit bindirme bağlantısında çekme yükü altında hasar önce matriste alt plakanın 1 ve 2. katmanlarında meydana gelir. Daha sonra yük artışıyla birlikte delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modları ortaya çıkarak bu katmanların yakınındaki 3 ve 4. katmanlara hasar sıçrar ve yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan bindirme bölgesinin içine doğru ilerleyerek uç kısma kadar ulaşır. Yapıştırıcıya yakın olan 1, 2, 3 ve 4. katmanlarda

yapıştırıcı serbest ucundan başlayan hasar 5, 6, 7 ve 8. katmanlarda plakanın ucunda ortaya çıkmakta ve yükü taşıyan lif kopana kadar bağlantı görevini yerine getirmektedir. Aynı zamanda üst plakanın 1 ve 2. katmanlarında da bindirme bölgesi ucunda ve yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda hasar ortaya çıkarak bindirme bağlantısı 8926 N da tamamen kopmaktadır.

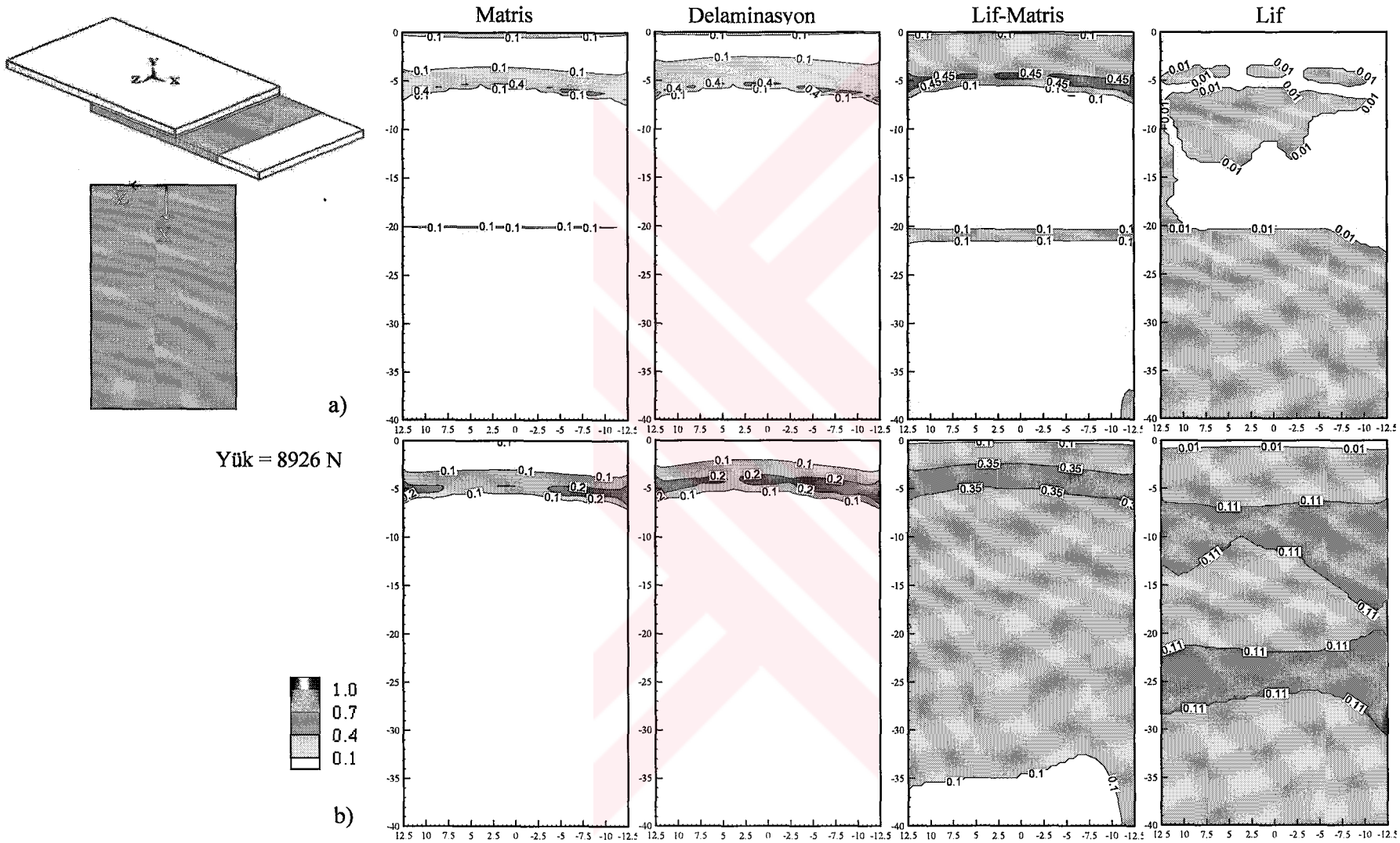


Şekil 4-4 Çekme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

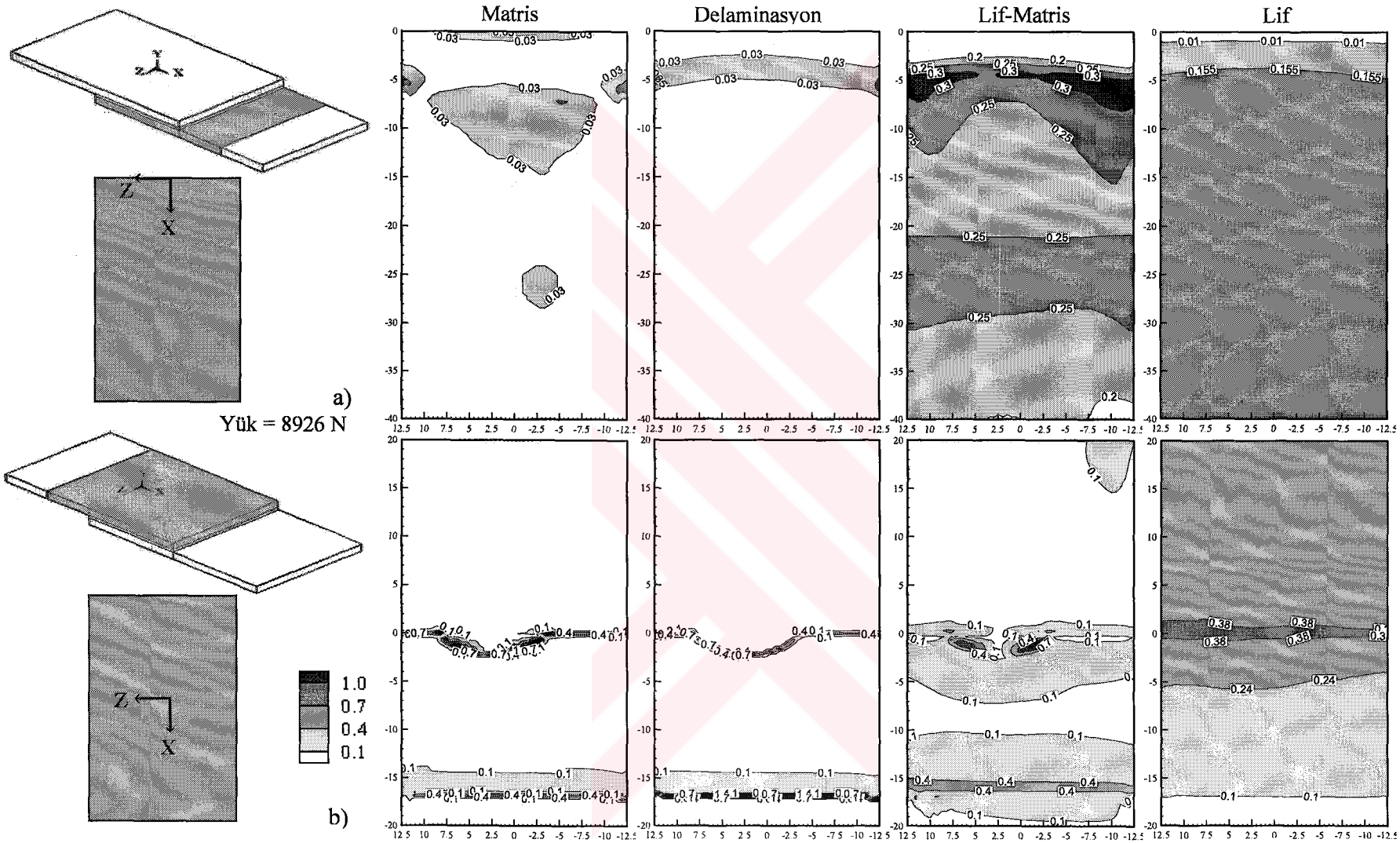
Şekil 4.5-7 'de 0° lik kompozit bindirme bağlantısının çekme yükü altında 8926 N da hasar olan katmanlarında Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımı verilmiştir. Bu şekillerde 1'den büyük değerlere sahip elemanların olduğu yerler hasarlı bölgelerdir. Hasarlı bölgelerin mekanik özellikleri çok küçüktür. Bu nedenle bu elemanlar yükü taşıyamayacağı için hasarlı bölgelerin yakınında 1'e yakın değerlere sahip elemanlara yük aktarılmaktadır. Şekil 4.5-7'deki şekillerde görülen hasar bölgeleri Şekil 4.2-4'deki hasar yayılımlarının ilerleyeceği bölgeleri işaret etmektedir. Hasarlı elamanların mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı bu elemanlara ait Hashin hasar indeks değerleri küçük çıkmaktadır.



Şekil 4-5 Çekme durumunda 0° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-6 Çekme durumunda 0° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



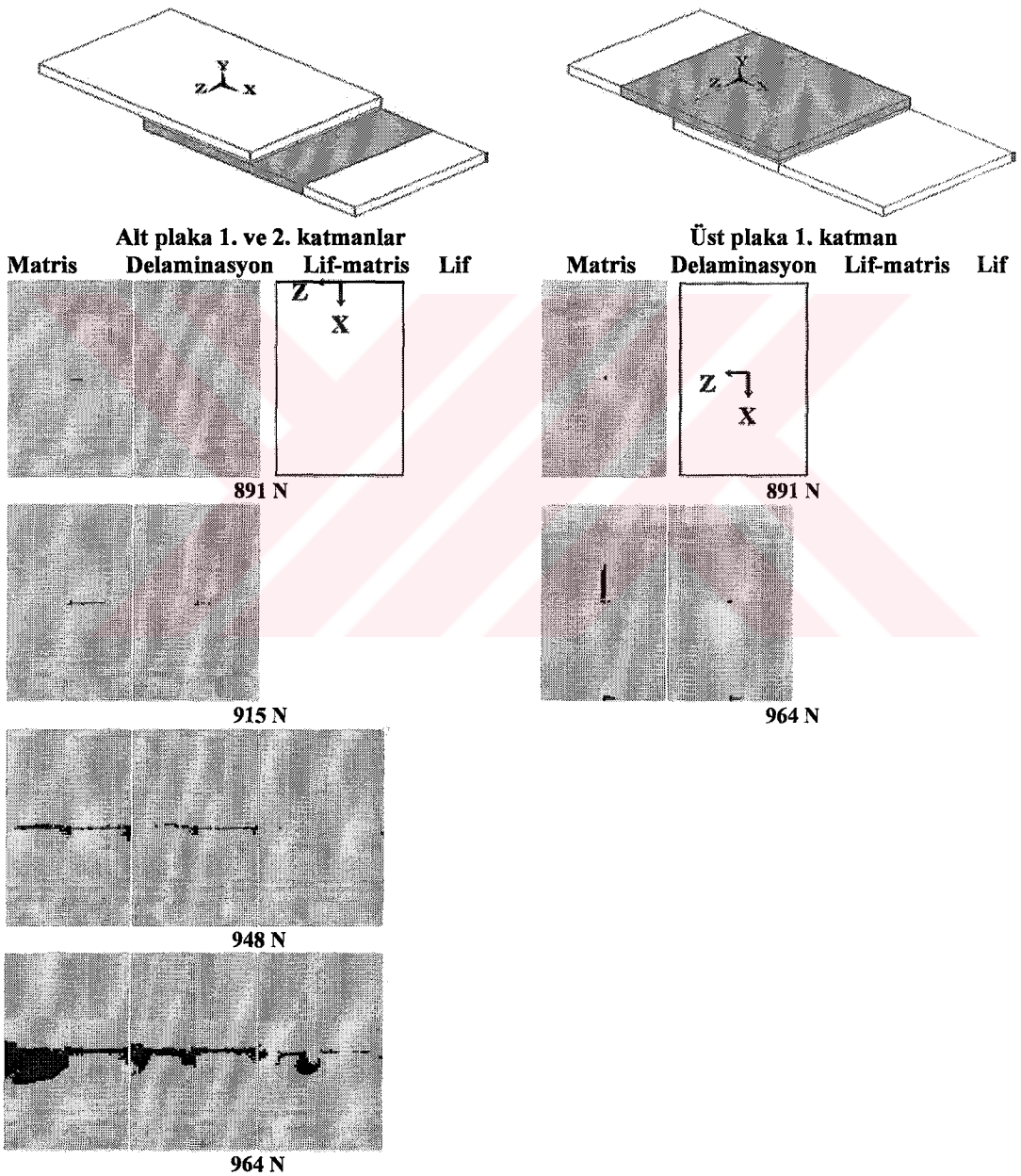
Şekil 4-7 Çekme durumunda 0° lik a) alt plakanın 9 ve 10. b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri

Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan bindirme bağlantısında, ilk hasar 891 N da alt plakanın 1 ve 2 numaralı (yapıştırıcıya yakın olan) katmanlarında matris ve delaminasyon hasar modlarında kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmının ortasında başlamaktadır (Şekil 4-8). Bölüm 3'de verilen 45° lik bindirme bağlantısı için Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasarlar ile karşılaştırıldığında, yine alt plakada yapıştırıcıya yakın olan 1. ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başladığı görülmektedir (Şekil 3-9). Aralarındaki fark hasarın yük seviyesinde olmasıdır yani Hashin Kriteri 891 N da hasarı bulurken Tsai-Wu kriteri 502 N da bulmaktadır. Alt plakanın 1. ve 2. katmanlarında, hasar matris ve delaminasyon modlarında kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında ilerlerken 915 N da lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır ve 964 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında tamamen bu katmanlar kopar.

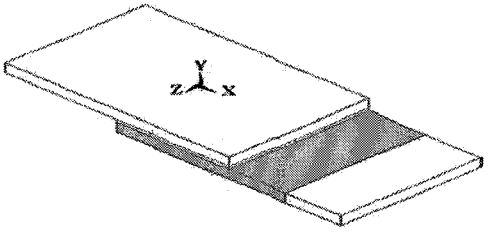
Alt plakada 1. ve 2. katmanlarda hasar ilerlerken, 899 N da 3. ve 4., 923 N da 5. ve 6., 931 N da 7. ve 8., 948 N da 9. ve 10. katmanlarda matris ve delaminasyon modlarında yapıştırıcı serbest ucu bölgesinin ortasında hasar başlamakta ve Tsai-Wu kırılma kriterinde olduğu gibi bu hat boyunca ilerlemektedir ve sonra da lif-matris ayrılması hasar modu ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.9-11). Tsai-Wu kırılma kriterinden farkı hasarın daha fazla bölgeye yayılmış olmasıdır. Hashin kriterinin, çok modlu olarak hasarı tahmin etmesinden uyguladığımız sonlu eleman modelinde daha doğru sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Ayrıca ilk hasar oluşum yüklerine bakıldığında, hasarın yapıştırıcıya yakın olan elemanlarda önce başlayıp yük arttıkça diğer katmanlara doğru ilerlediği görülmektedir. Üst plakada hasar, 1. ve 2. katmanlarda matris ve delaminasyon modlarında oluşmakta ve diğer katmanlarda hasar görülmemektedir. Tsai-Wu kırılma kriterindeki gibi Hashin kriterinde de 45° yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme yükü altında üst plakada kayda değer hasar olmadan alt plaka kopmaktadır (Şekil 4-8 ve 4-9).

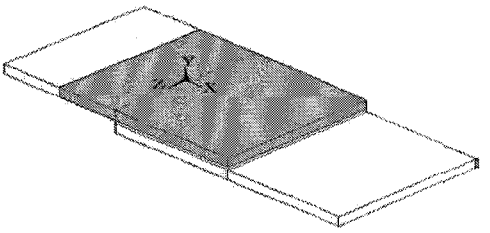
Kısaca, yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmaları yapıştırıcıya yakın olan katmanlara çabuk tesir ederek ilk hasarların alt ve üst plakalarda bu katmanlarda yapıştırıcı serbest uçlarına tekabül eden bölgelerde başlamasını ve serbest uca denk gelen kısım boyunca yayılmasına neden olmaktadır. Plakalarda yapıştırıcıya yakın olan

1. ve 2. katmanlarda hasar iyice yayıldıktan sonra yük arttıkça hasar kademe kademe diğer katmanlara geçmekte ve yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden bölgede yayılmaktadır. Daha sonrada plakaların serbest uçlardaki bölgelerinde yayılmış olan hasar yükün, diğer katmanın uç kısımlarına aktarılmasına ve bu bölgelerde hasarların oluşmasına sebep olur. Sonunda da plakalar artık yükü taşıyamaz ve yapıştırıcı serbest ucuna gelen bölgelerden katmanlar kopmaktadır.



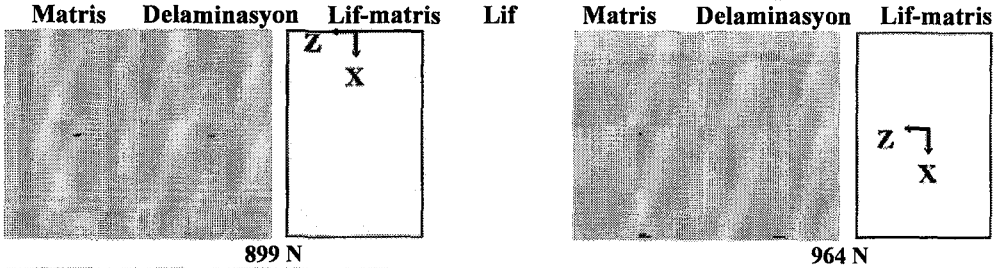
Şekil 4-8 Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 1 ve 2. katmanı ile üst plakanın 1. katmanında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



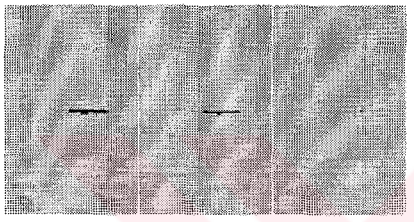


Alt plaka 3. ve 4. katmanlar

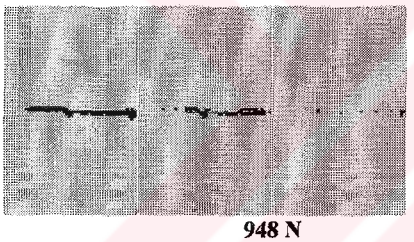
Üst plaka 2. katman



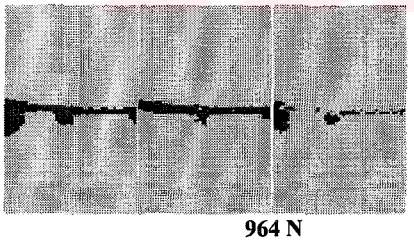
899 N **964 N**



923 N



948 N

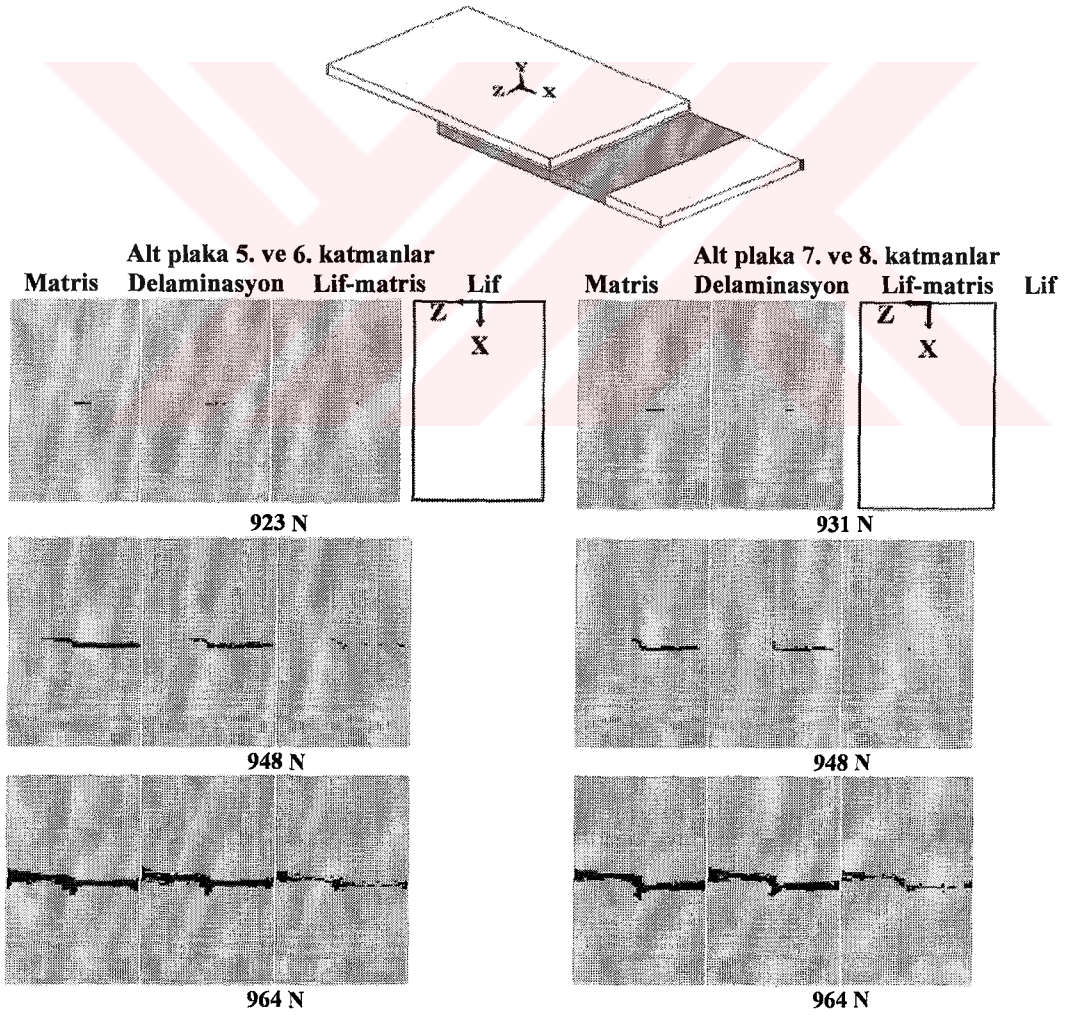


964 N

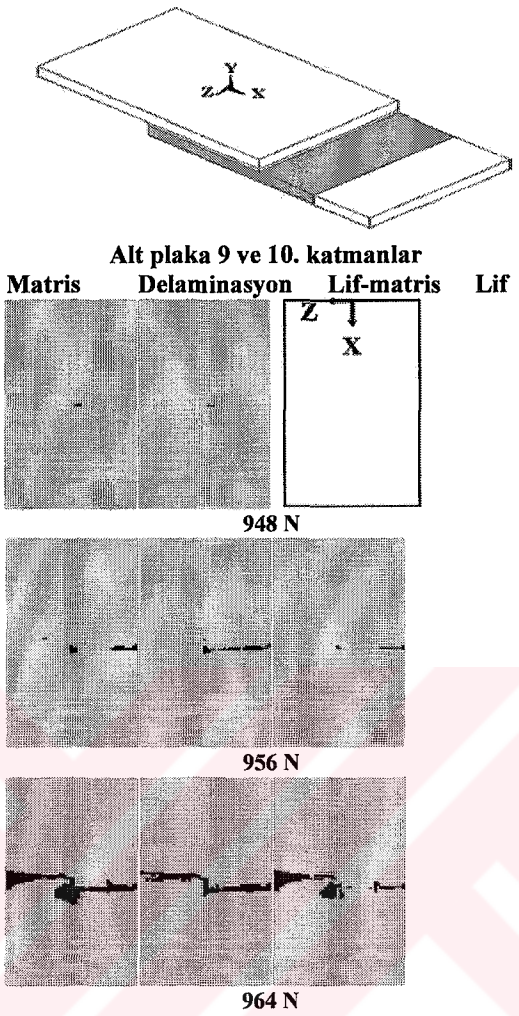
Şekil 4-9. Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 3 ve 4. katmanları ile üst plakanın 2. katmanında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Şekil 4-12, 4-13 ve 4-14'de 45° lik kompozit bindirme bağlantısının çekme yükü altında 964 N da hasar olan bütün katmanlarda Hashin indeks değerlerinin dağılımı görülmektedir. Bu şekillerde 1'den büyük indeks değerlerine sahip elemanların olduğu yerler hasarlı bölgelerdir ve siyah renkle gösterilmişlerdir. Şekillere baktığımızda, matris hasar modunun diğer hasar modlarına göre daha geniş alana yayılmış olduğunu görmekteyiz. Delaminasyon hasar modu matris moduna benzer tarzda ilerlemektedir ve

matris ile delaminasyon hasar modları lif-matris ayrılması hasar moduna göre daha geniş bölgeye yayılmıştır. Ayrıca üç moduda ayrı ayrı ele aldığımızda hepsinde de yapıştırıcıya yakın olan katmanlardan dışa doğru gittikçe hasar yayılımının azaldığını görmekteyiz. Bu durum yapıştırıcıya yakın olan katmanların yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmalarından daha çok etkilendiğini göstermektedir. Bu şekillerde görülen hasarlı bölgelerin malzeme özellikleri oldukça düşük değerlere sahiptir. Bu nedenle buradaki elemanlar yükü taşıyamayacağı için hasarlı bölgelerin yakınında 1'e yakın değerlere sahip elemanlara doğru yük aktarılmaktadır. Yük arttıkça da bu elemanlardan hasar hızla yayılmaktadır. 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında lifte herhangi bir hasar olmadığı için lif kopması hasar moduna ait Hashin indeks değerleri de 1'den çok küçüktür.

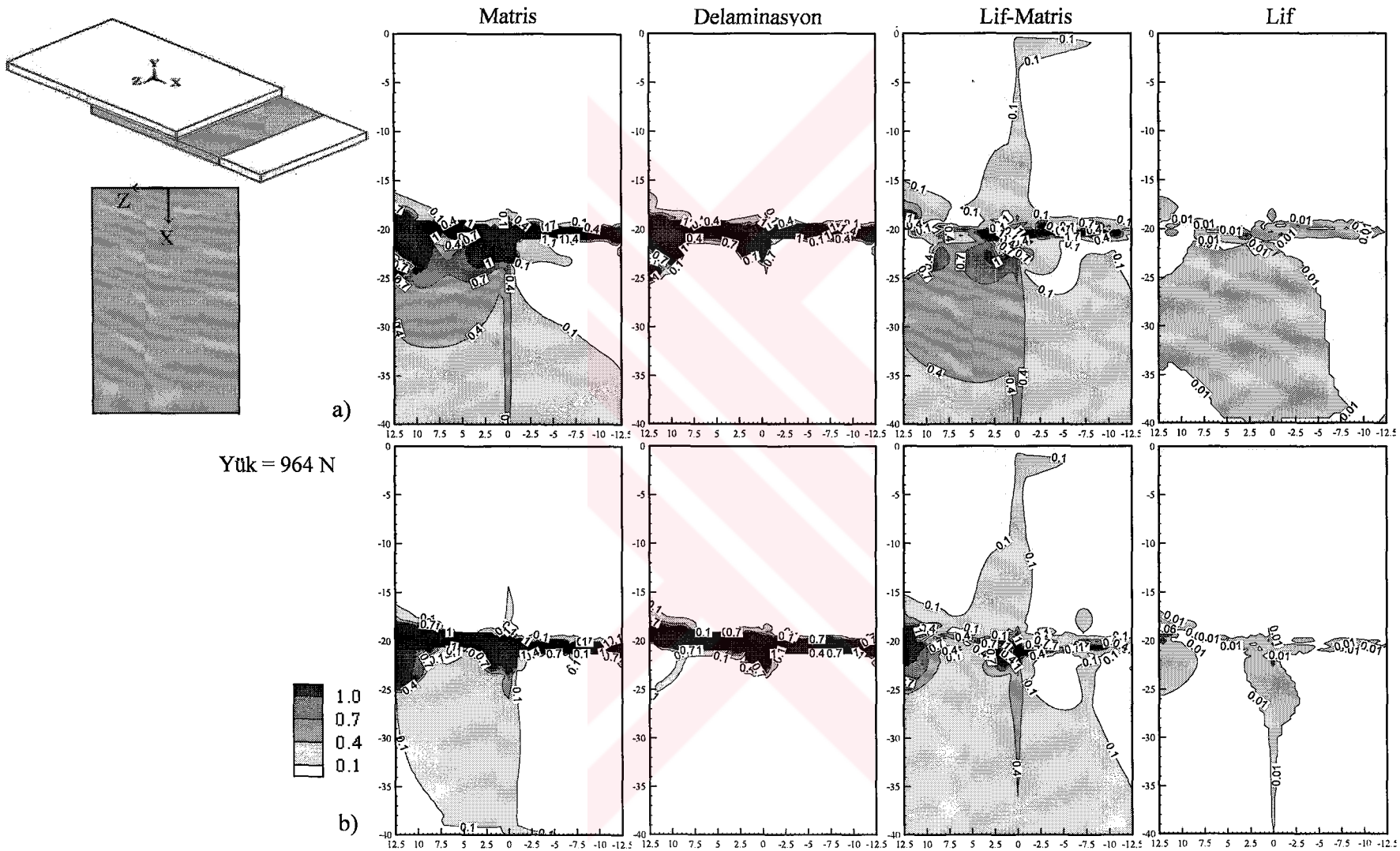


Şekil 4-10. Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 5, 6, 7, ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

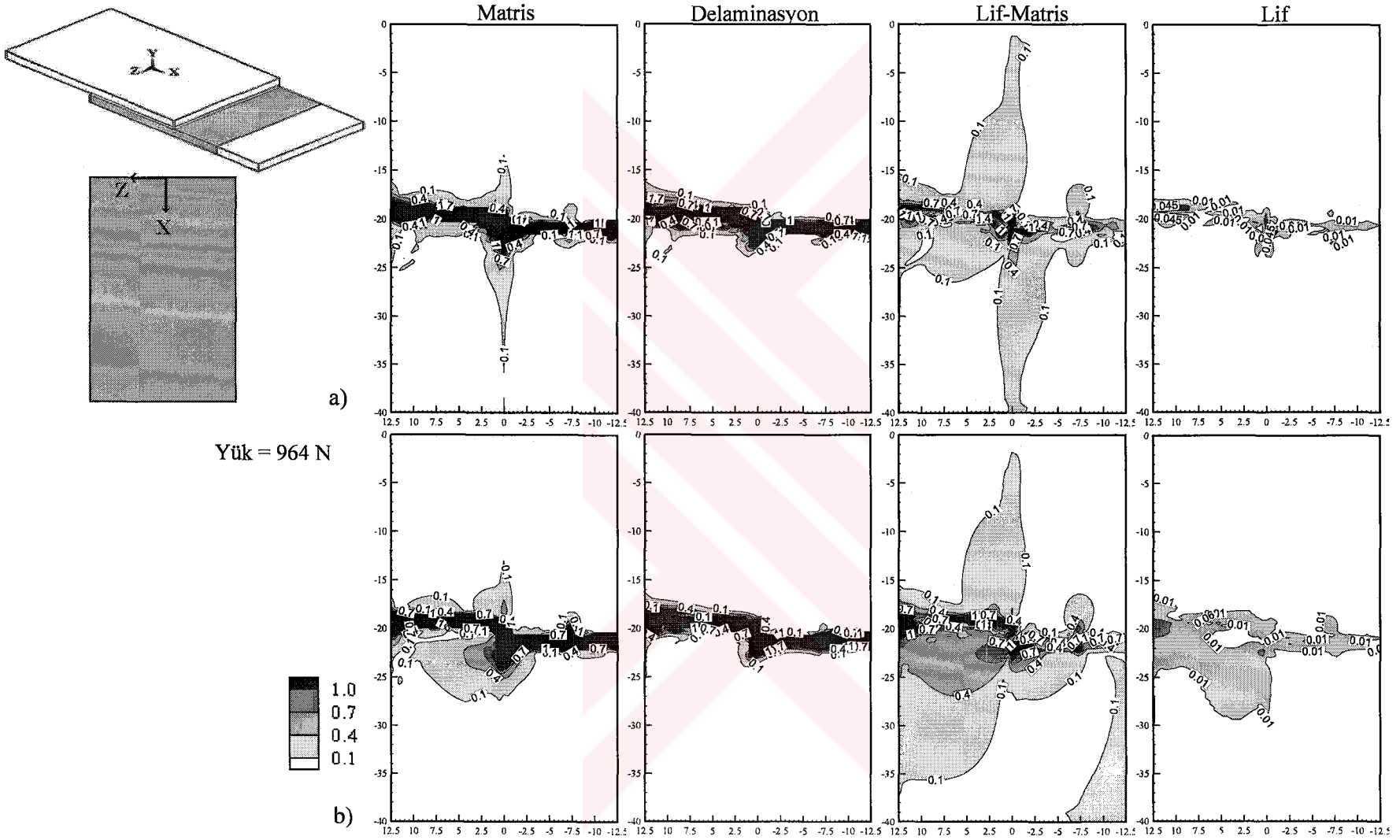


Şekil 4-11 Çekme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

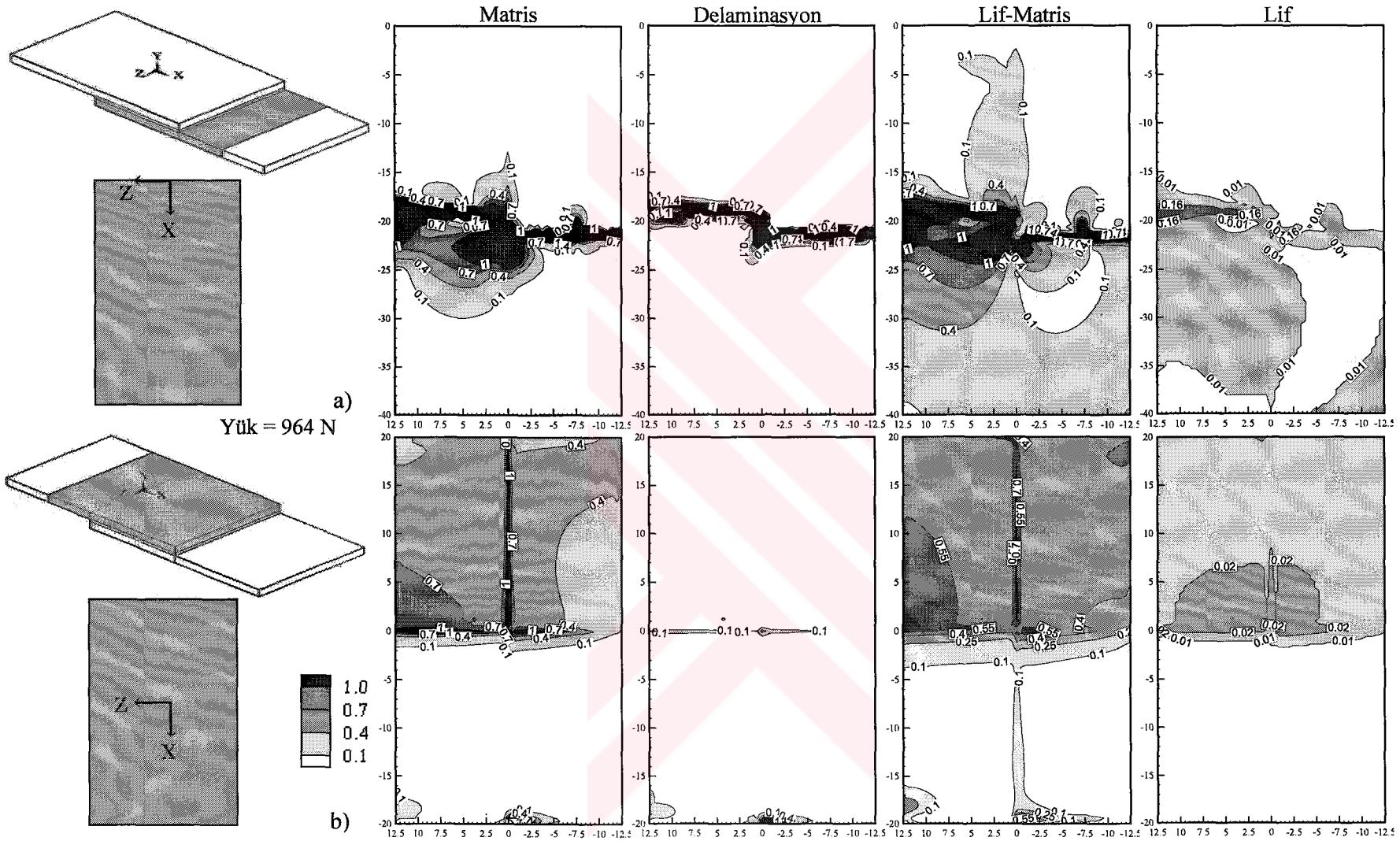
Hashin kriterinin hasarı daha yüksek yüklerde tahmin ettiği için bu kriterin tahmin ettiği hasarlar Tsai-Wu kriteri tarafından tahmin edilen hasarlardan daha geniş bölgeye yayılmıştır. Çekme yüküne maruz 0 ile 45° lik kompozit bindirme bağlantılarından, 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hasarı genel olarak bindirme bölgesinde yayılırken 45° lik kompozit bindirme bağlantısında hasar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda yayılmıştır. 0° lik kompozit bindirme bağlantısı çekme yüküne daha dayanıklı olduğu için yapıştırıcı uygulanan çekme yükünden daha fazla etkilenmektedir ve yapıştırıcı hızlı bir şekilde zayıflamaktadır. Yapıştırıcının zayıflamasından dolayı da bindirme bölgesinde plakaya yük aktarılmaktadır ve böylece bindirme bölgesinde plakanın hasarları daha fazla yayılmaktadır.



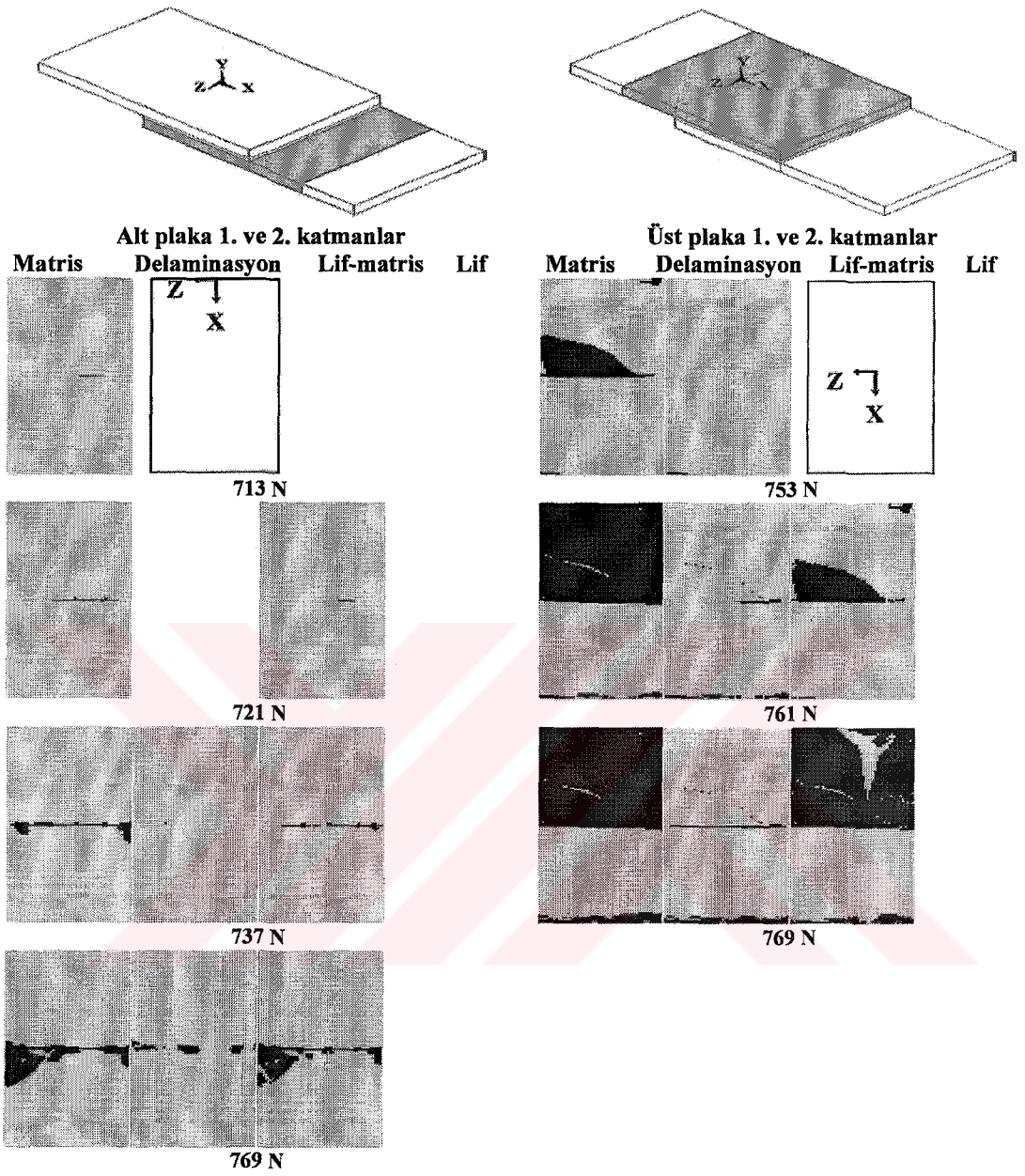
Şekil 4-12 Çekme durumunda 45° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-13 Çekme durumunda 45° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



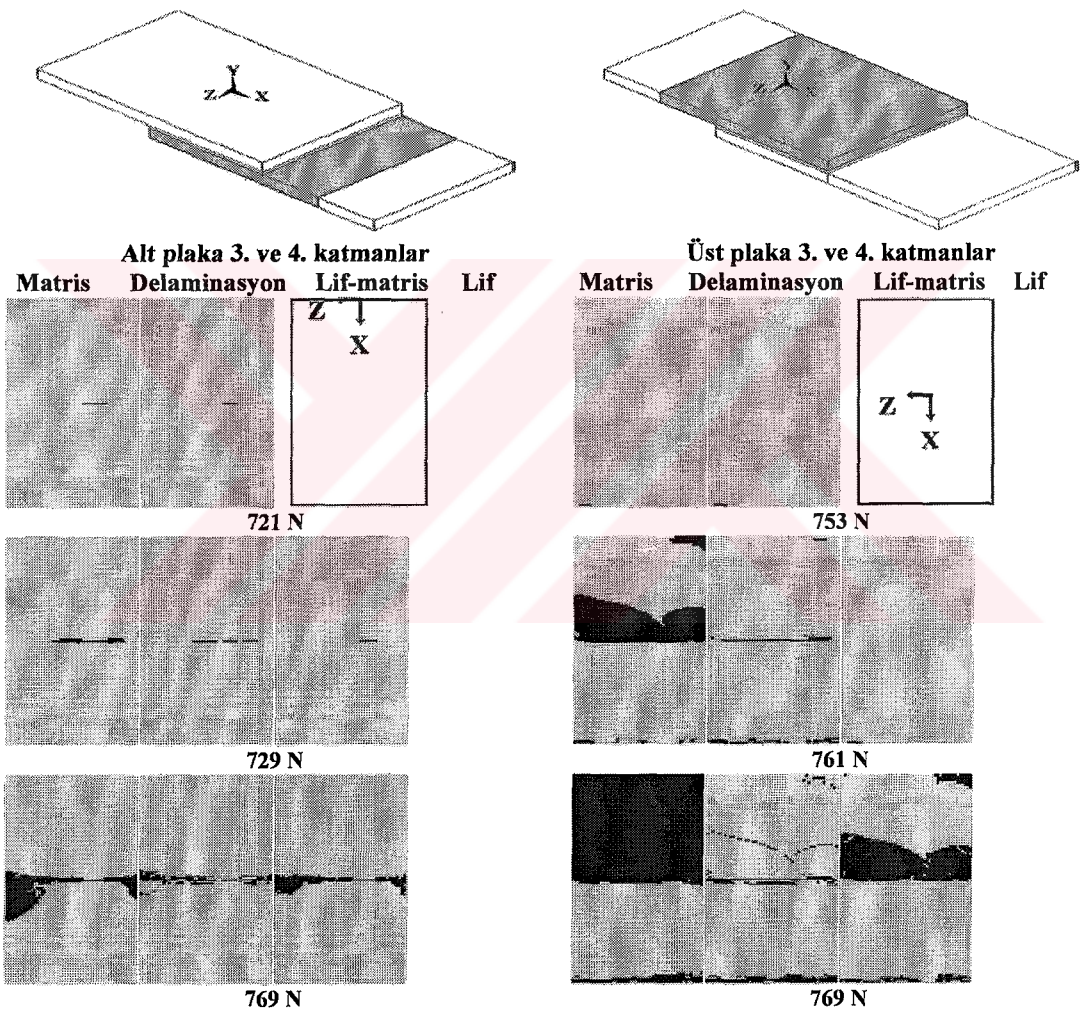
Şekil 4-14 Çekme durumunda 45° lik a) alt plakanın 9 ve 10. b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-15 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

90° lik bindirme bağlantısının çekme yüküne maruz kalması durumunda nasıl bir hasar davranışı sergileyeceğini görmek için Şekil 4-15'e baktığımızda, ilk hasarın 713 N da matris hasar modunda, alt plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlamaktadır. 90° lik bindirme bağlantısı için Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği hasarlar ile karşılaştırıldığında, yine hasarın alt plakada yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın

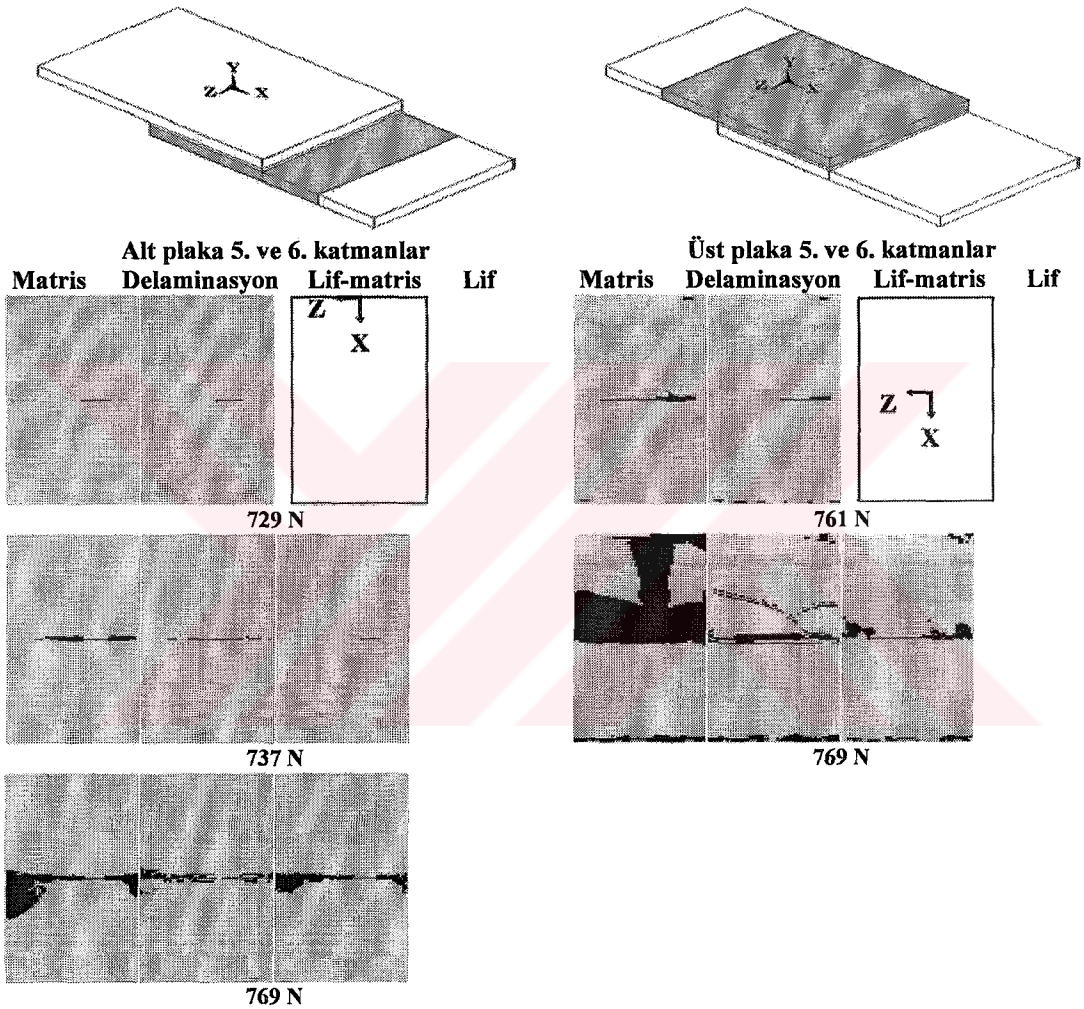
yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında 600 N da başladığı görülmektedir (Şekil 3-10). Hashin kriteri Tsai-Wu kriterine göre daha büyük yükte hasarı tahmin etmektedir. Bu katmanlarda hasar matriste kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında ilerlerken 721 N da lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır ve sonra da 737 N da delaminasyon hasar modu oluşarak 769 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında tamamen kopmaktadır.



Şekil 4-16 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Alt plakada hasar yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısım boyunca iyice yayıldıktan sonra üst plakada ilk hasar matris modunda 1 ve 2. katmanlarda 753 N da yapıştırıcı serbest ucu civarında geniş bir alanda birdenbire oluşmaktadır (Şekil 4-15). Üst plakanın

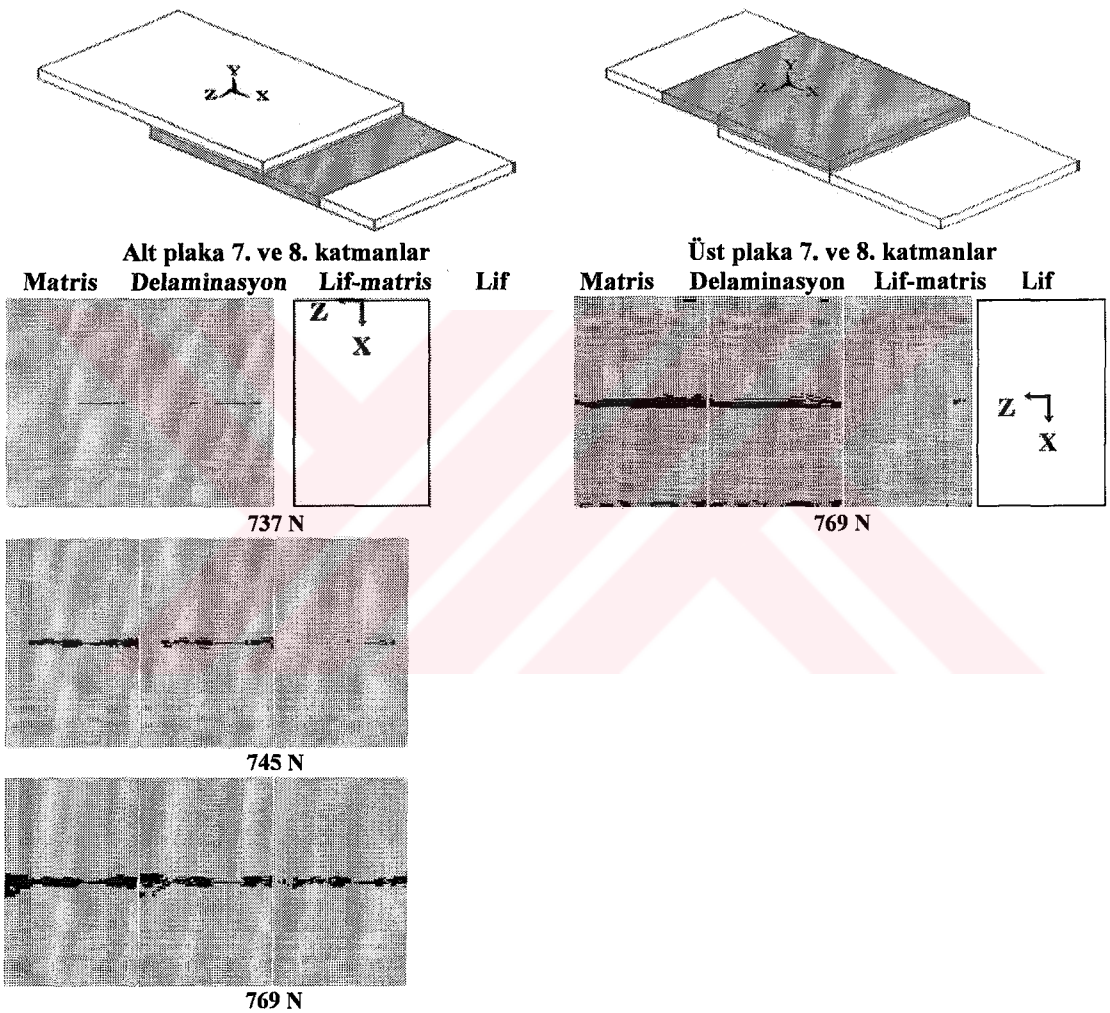
yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmı ile birlikte uç kısmında da hasar oluşmaktadır. Sebebi alt plakanın yapıştırıcı serbest ucunda hasarın iyice yayılması ile bu bölgenin zayıflaması ve bu bölgenin üstünde olan üst plakanın uç kısmının yükü taşımaya zorlanmasıdır. Üst plakada oluşan hasar bölgesi Tsai-Wu kırılma kriterinde olduğu gibi daha geniştir.



Şekil 4-17 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5 ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Alt plakada yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2. katmanlarda başlayan hasar yük artışıyla birlikte diğer katmanlara yayılmaktadır. Böylece 721 N da 3 ve 4., 729 N da 5 ve 6., 737 N da 7 ve 8., 745 N da 9 ve 10. katmanlarda matris ve delaminasyon modlarında yapıştırıcı serbest ucu bölgesinde hasar başlamakta ve bu hat boyunca ilerlemektedir ve sonra da lif-matris ayrılması hasar modu ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.16-19). Üst plakada

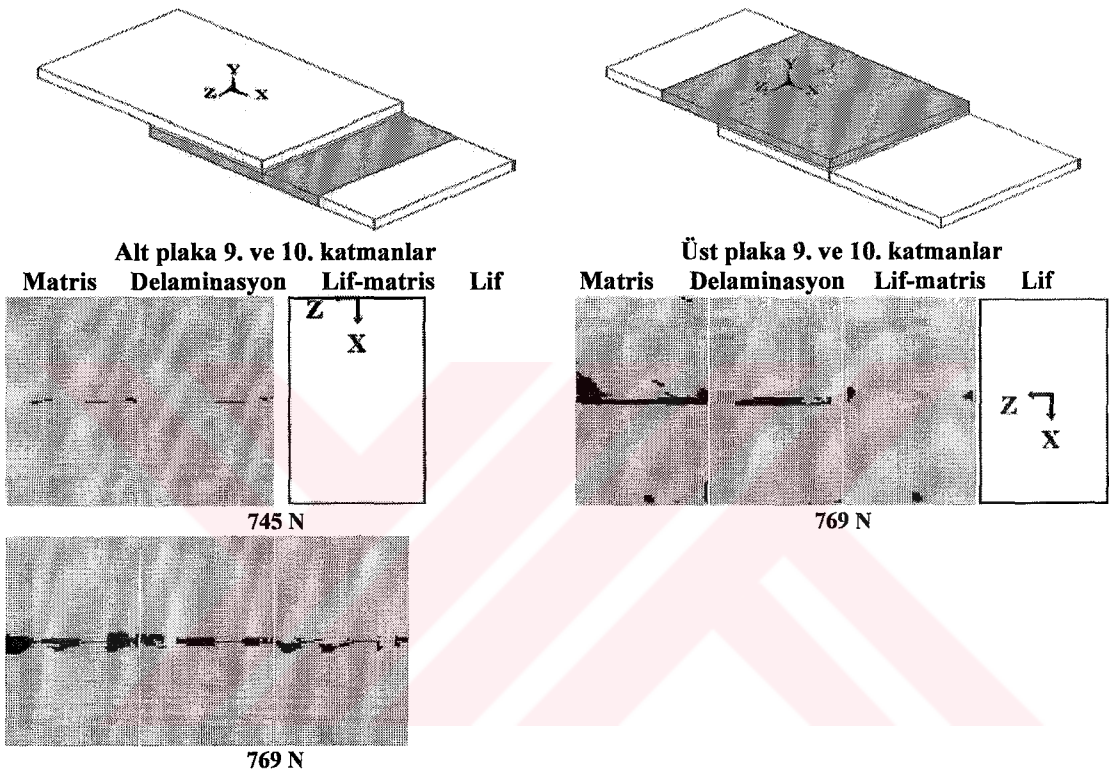
3 ve 4. katmanlarda 753 N da, 5 ve 6. katmanlarda 761 N da ve 7, 8, 9 ve 10. katmanlarda ise 769 N da yapıştırıcı serbest ucu bölgesinde hasarlar oluşmaktadır (Şekil 4.16-19). Hashin ve Tsai-Wu kriterlerinin ikisinde de ilk hasar oluşum yüklerine bakıldığında, hasarın yapıştırıcıya yakın olan elemanlarda gerilme yığılmalarının olduğu yapıştırıcı serbest uçlarına tekabül eden kısımlarda başlayıp yük arttıkça diğer katmanlara doğru yayıldığı görülmektedir.



Şekil 4-18 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

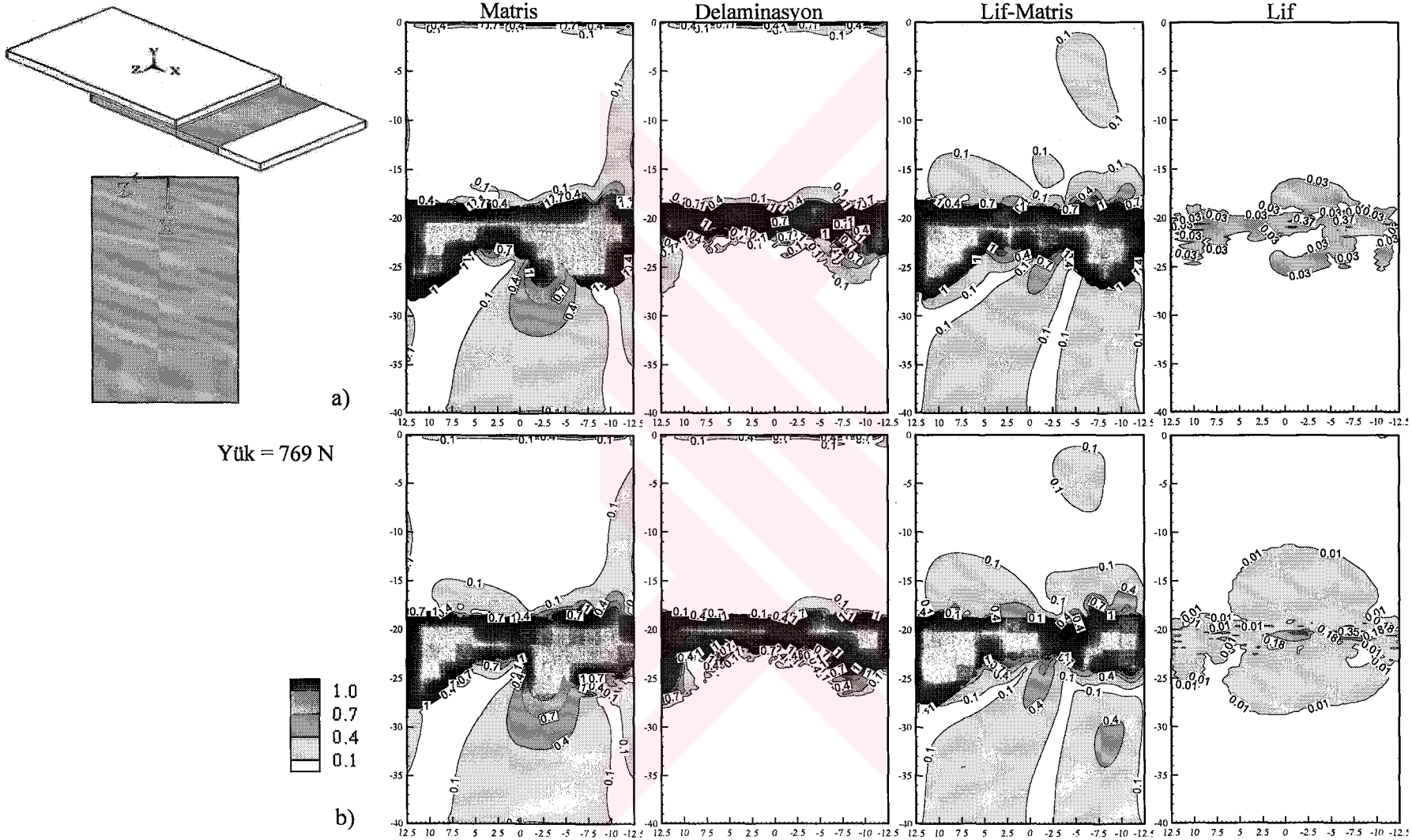
90° lik kompozit bindirme bağlantısının Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımı için Şekil 4.20-24 e baktığımızda alt plakanın matris ve lif-matris ayrılması hasar modları delaminasyon hasar modundan daha geniş alana yayılmıştır ve yapıştırıcıya yakın olan katmanlardan dışa doğru gittikçe hasarın yayılma bölgesi daralmaktadır. Ayrıca 90° lik

kompozit bindirme bağlantısında 0 ve 45° lik bindirme bağlantılarına göre lif-matris ayrılması hasar modunun delaminasyon moduna göre daha geniş bir yayılma bölgesine sahiptir ve sebebi, 90° yönlü kompozit bindirme bağlantısında uygulanan kuvvet liflere dik konumdadır ve uygulanan yük matrisi liften ayırmaya diğer açılı kompozit bindirme bağlantılarınkinden daha fazla zorlamaktadır.

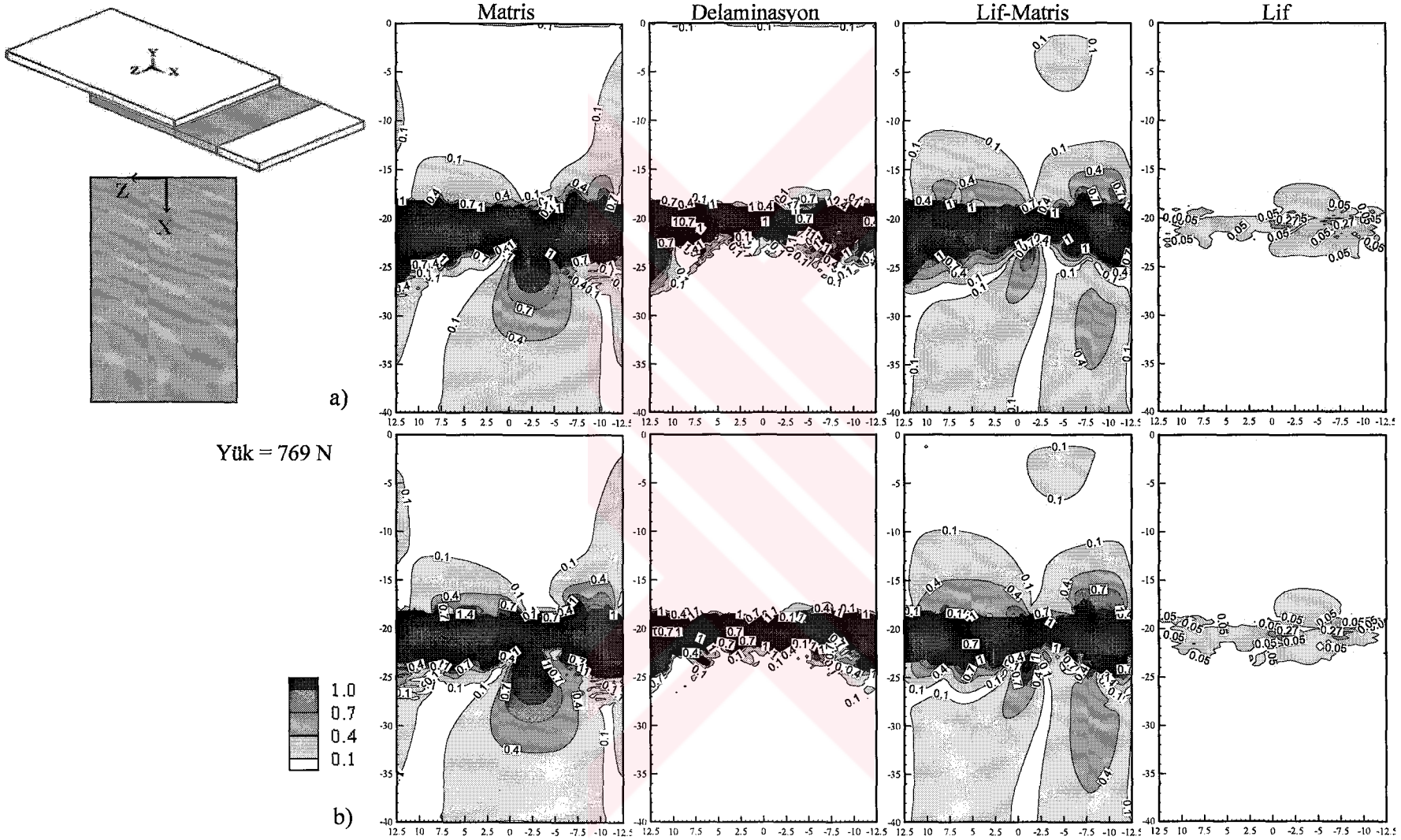


Şekil 4-19 Çekme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9 ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

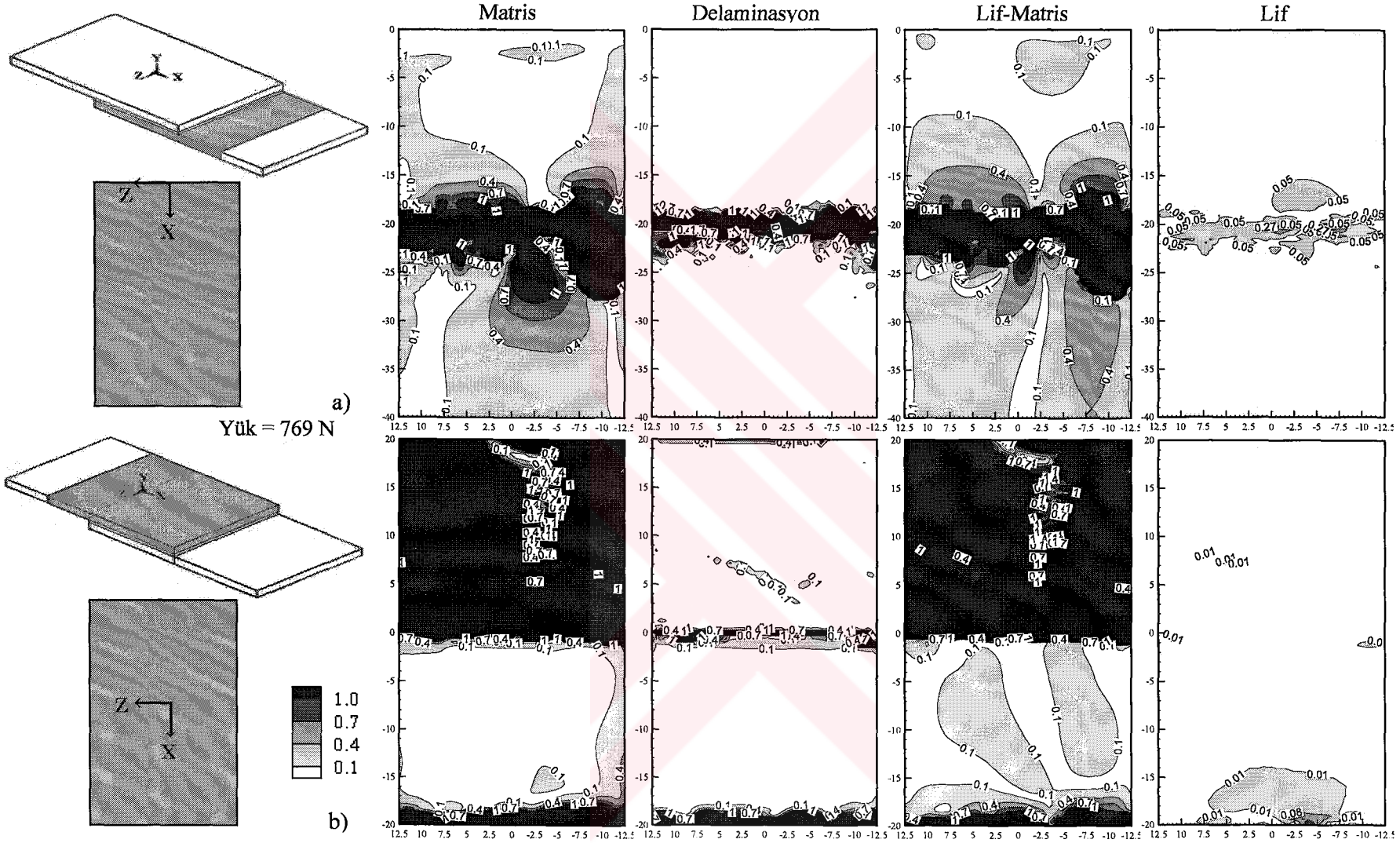
Üst plakada hasarların yayılma bölgeleri alt plakaya göre daha geniştir. Alt plakada hasar iyice yayıldıktan sonra üst plakada, hem alt plakanın zayıflaması hem de üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda gerilme yığılmalarının etkisi ile hasar özellikle yapıştırıcıya yakın olan katmanlarda son yükte geniş bir bölgeye yayılmıştır (Şekil 4.15-16). Alt plakada olduğu gibi üst plakanın matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında da yapıştırıcıya yakın olan katmanlarda dıştaki katmanlara göre daha geniş bir bölgede hasarlar ve ayrıca lif-matris ayrılması hasar modunun delaminasyona göre baskın olduğu görülmektedir.



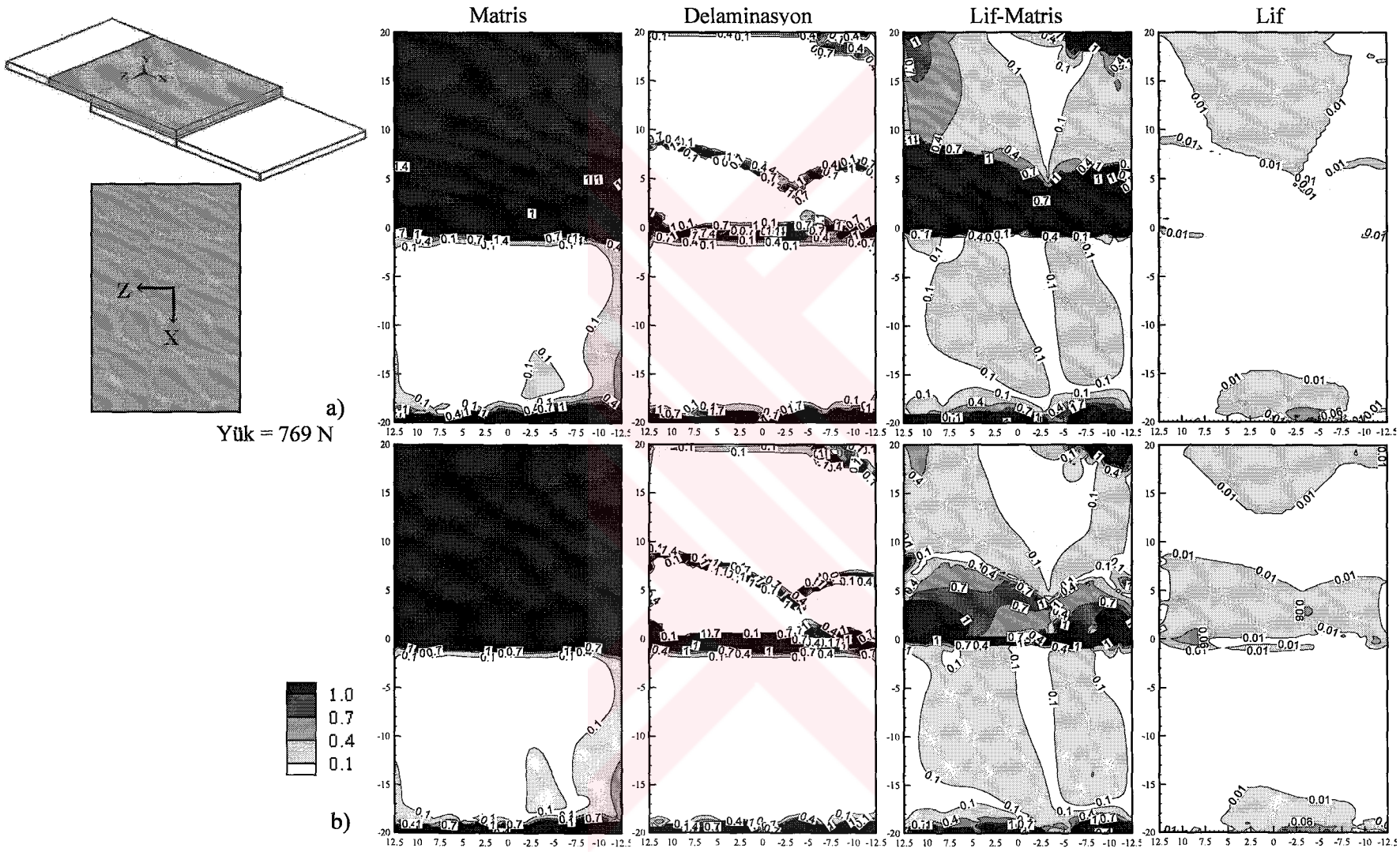
Şekil 4-20 Çekme durumunda 90° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



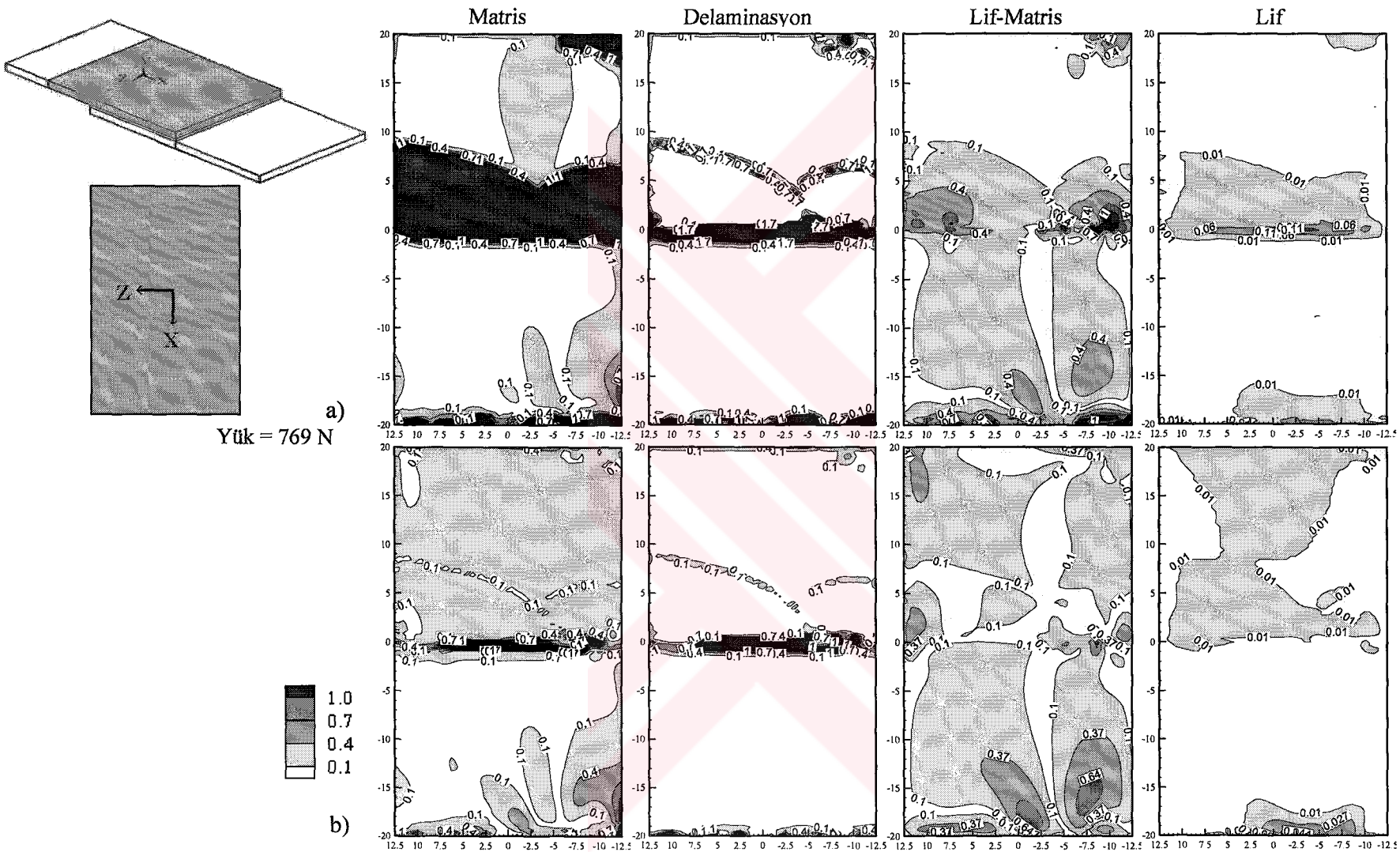
Şekil 4-21 Çekme durumunda 90° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-22 Çekme durumunda 90° lik a) alt plakanın 9 ve 10. b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri



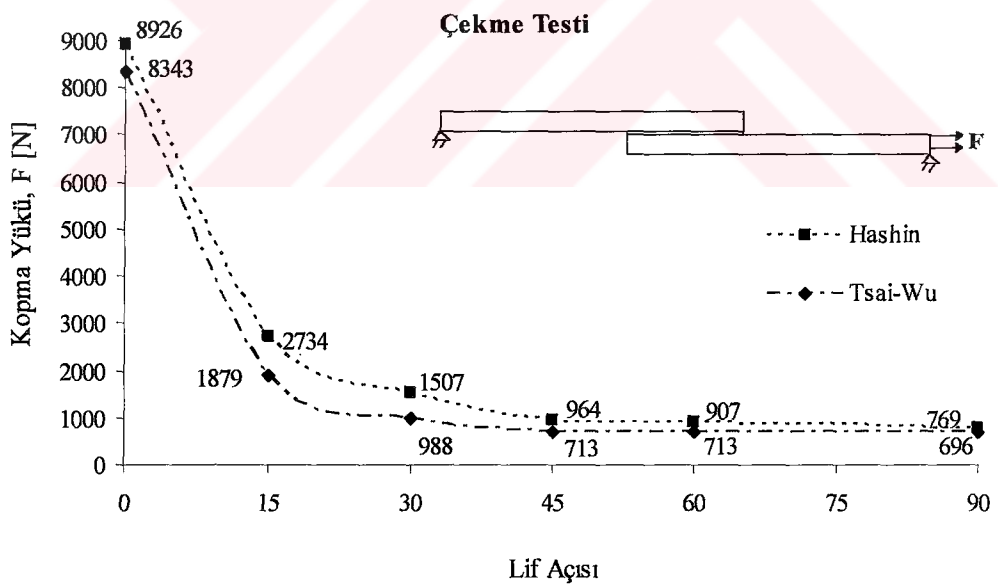
Şekil 4-23 Çekme durumunda 90° lik üst plakanın a) 3 ve 4. b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-24 Çekme durumunda 90° lik üst plakanın a) 7 ve 8. b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri

Çekme yükü altında kompozit bindirme bağlantısında açı değiştikçe hasar mekanizmasında da bazı farklılıklar olmaktadır. Örneğin; 0 ve 45° yönlü kompozit bindirme bağlantılarında matris hasar modunun yanında delaminasyon hasar modu daha geniş bir bölgeye yayılmış iken 90° yönlü kompozit bindirme bağlantısında matris hasar modu ile lif-matris ayrılması hasar modu daha geniş bölgeye yayılmıştır. Bunun nedeni; 90° yönlü kompozit bindirme bağlantısında uygulanan kuvvet liflere dik konumdadır ve uygulanan yük matrisi liften ayırmaya diğer açılı kompozit bindirme bağlantılarınkinden daha fazla zorlamaktadır.

Ayrıca 0, 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantılarına ait hem Hashin hem de Tsai-Wu kırılma kriterlerinin tahmin ettiği hasarlar incelendiğinde, her katmanda oluşan hasarların kendi içlerinde simetrik olmadıkları görülmektedir. Kompozit yapışanlar simetrik olduğu için oluşan hasarların da simetrik olması beklenir. Simetrik olmamasının sebebi Şekil 3-11 de bindirme bağlantısının deforme olmuş geometrisine baktığımızda bindirme bölgesinin döndüğünü görmekteyiz. Bu dönme nedeniyle hasar simetrik olarak yayılamamıştır.



Şekil 4-25 Çekme yükü altında bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi

Şekil 4-25 lif açısı büyürken Hashin ve Tsai-Wu kriterine göre kompozit bindirme bağlantılarının çekme yüküne karşı dayanımının azaldığını göstermektedir. Bindirme bağlantılarının kopma yüklerinin lif açısına göre değişim grafiğinin E_1 elastik

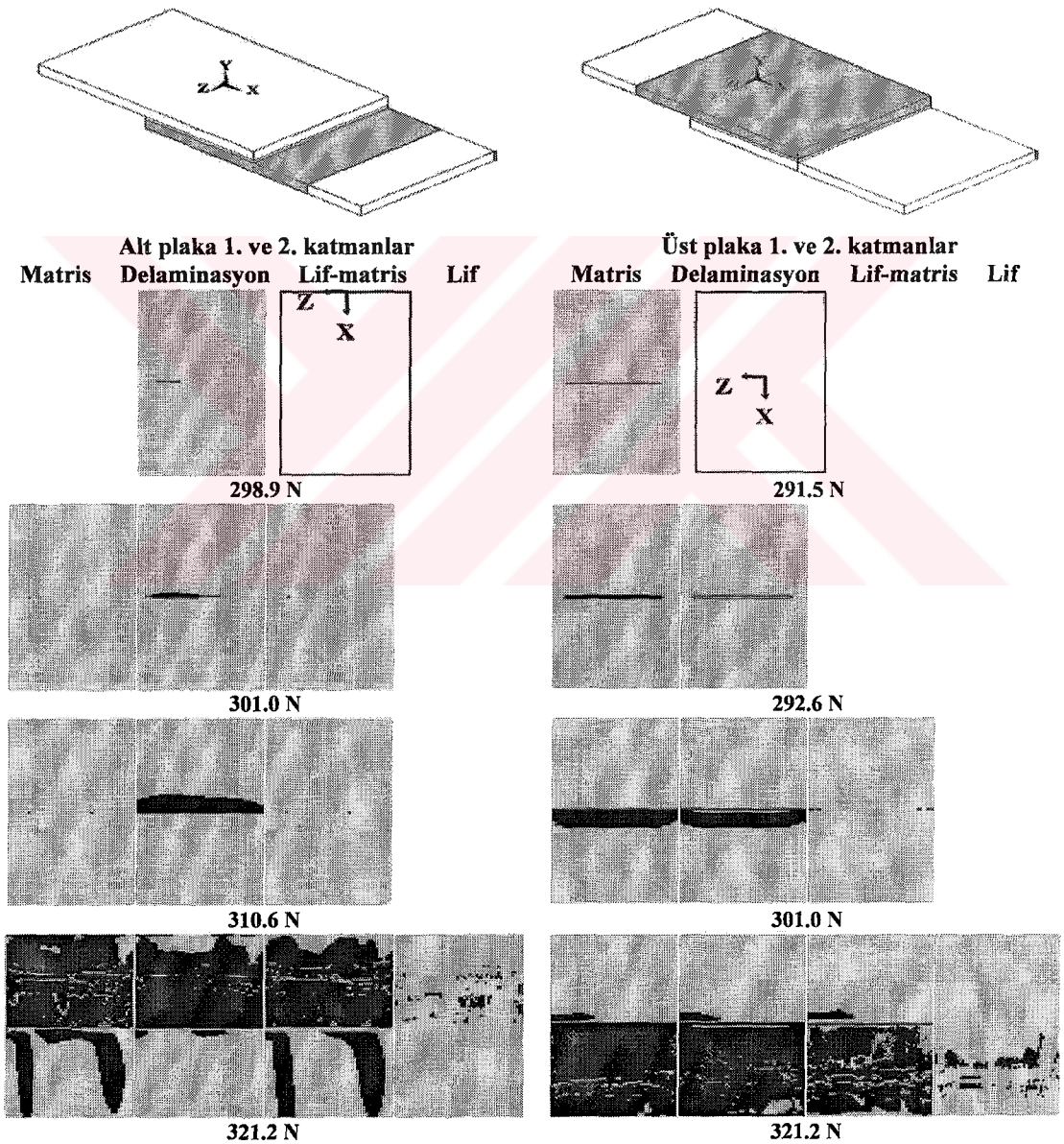
modülünün lif açısına göre değişim grafiği ile benzerliği görülmektedir (Şekil 3-13). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının çekme yüküne dayanımı bindirme bağlantısının kompozit plakalarının lif yönelim açısının değişimi ile doğrudan ilişkilidir ve lifler uygulanan çekme yüküne paralel iken en yüksek dayanımı göstermektedir. Ayrıca lifler çekme yükü hattına dik konumda yönelime yaklaştıkça dayanım düşmektedir ve en düşük dayanım lifler çekme yüküne dik konumda iken ortaya çıkar. Tsai-Wu kriterine göre karşılaştırıldığında, Hashin kriterine göre kompozit bindirme bağlantılarının daha yüksek yüklerde koptuğu görülmektedir.

4.3.2 Üç Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları

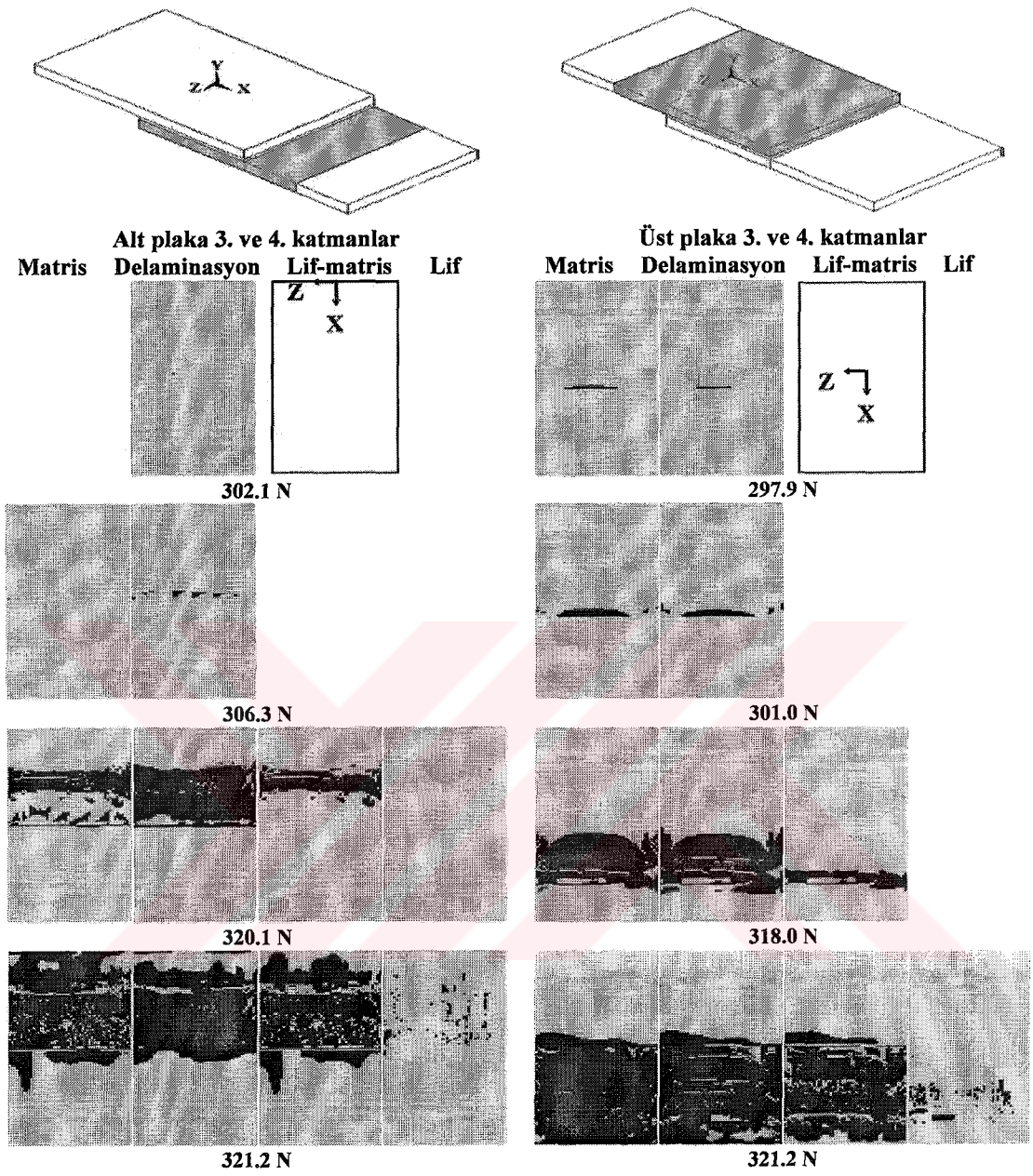
Üç nokta eğme yüküne maruz tek yönlü kompozit bindirme bağlantısının yükleme ve sınır şartları Şekil 3-14' de verildiği gibidir. Hashin Kriterine göre Tsai-Wu kriterinde olduğu gibi 0-90° lik lif açılı tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarının analizleri yapıldı ve sadece 0, 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantılarına ait hasarlar tezde şekillerle irdelenecektir.

0° lik kompozit bindirme bağlantısını üç nokta eğme testine tabi tuttuğumuzda Hashin kriteri yardımıyla hasar incelendiğinde, ilk hasarın 291.5 N da üst plakanın yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 numaralı katmanlarında matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlamaktadır (Şekil 4-26). Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği hasarlar ile karşılaştırıldığında, yine üst plakada 1. ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında 281.06 N da başlamakta idi (Şekil 3-17). Hashin Kriteri hasarı Tsai-Wu kriterine göre daha büyük yüklerde tahmin ettiği görülmektedir. Ayrıca Tsai-Wu kriterinin tahmin ettiği hasar yapıştırıcı serbest ucunda ilerledikten sonra plakanın serbest olan tarafına doğru yayılırken Hashin kriterinin hasarında ise bindirme bölgesine yayılmakta ve bindirme bölgesi tamamen hasarlı olmaktadır. Üst plakanın 1. ve 2. katmanlarında hasar matriste ilerlerken 292.6 N da delaminasyon hasar modu, 301 N da lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır ve hasarlar bindirme bölgesine doğru ilerlemektedir. Bu katmanlar 321.2 N da matris, delaminasyon, lif-matris ayrılması ve lif kopması hasar modlarında tamamen kopar. 298.9 N da alt plakanın 1. ve 2. katmanlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda delaminasyon modunda ortaya çıkmaktadır (Şekil 4-26). Bu katmanlarda matris

ve lif-matris ayrılması hasar modları bindirme bağlantısı kopmaya yakın bir yükte aniden ortaya çıkmakta ve hızlı bir şekilde delaminasyon tarzında hasar daha geniş bir alana yayılmaktadır. Tsai-Wu kırılma kriterinin hasarları alt plakada plakanın ucunda ve küçük bir alanda yayılmakta idi (Şekil 3-17). Fakat Hashin kriterinin tahmin ettiği hasarlar yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda başlayıp bindirme bölgesinde yayılmaktadır. Hashin kriteri hasarı daha büyük yüklerde tahmin ettiği için üst plakada hasarın iyice yayılması sebebi ile alt plaka daha fazla zorlanmakta ve Tsai-Wu'nun tahmin ettiği hasardan daha geniş bir alana yayılmaktadır.

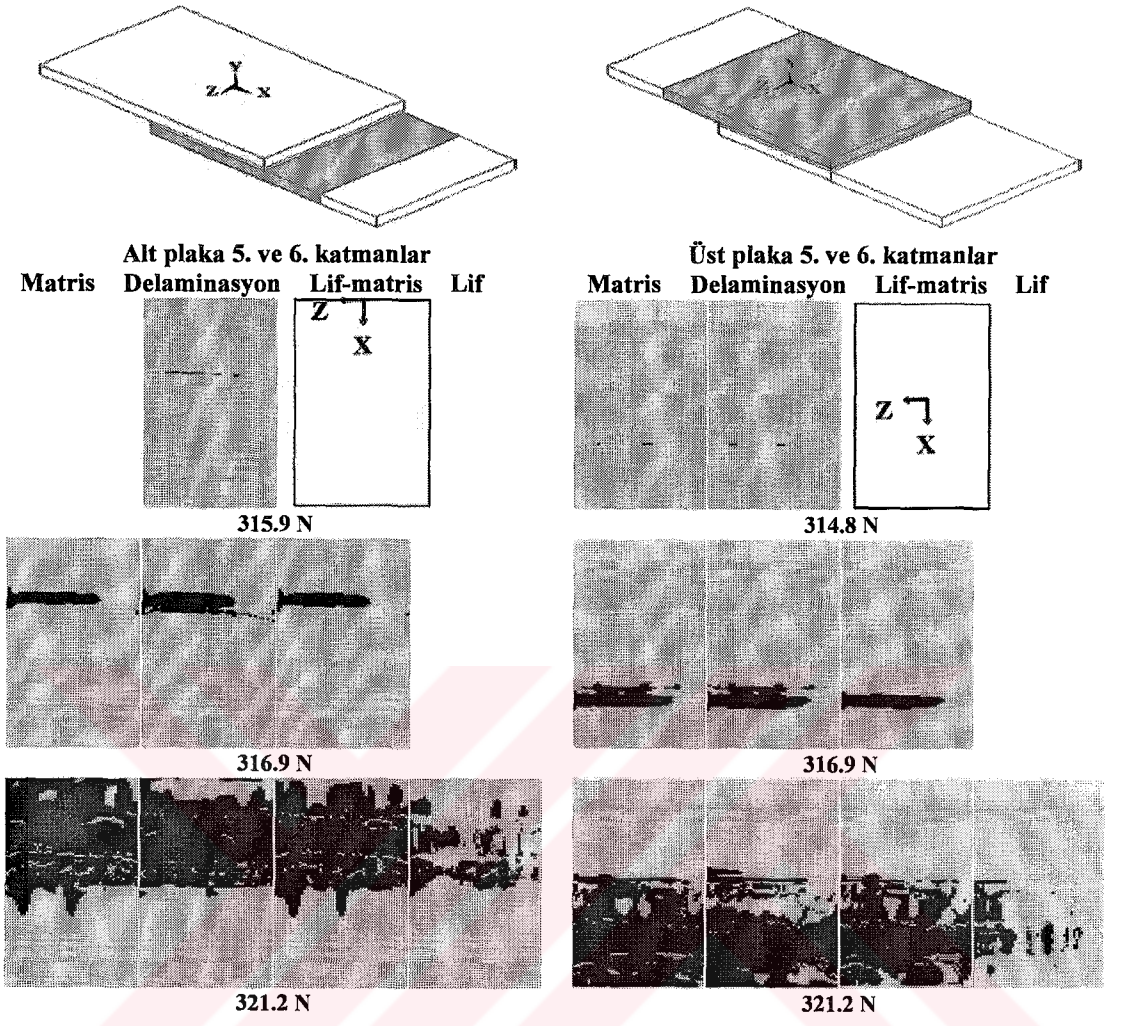


Şekil 4-26 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1 ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



Şekil 4-27 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3. ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

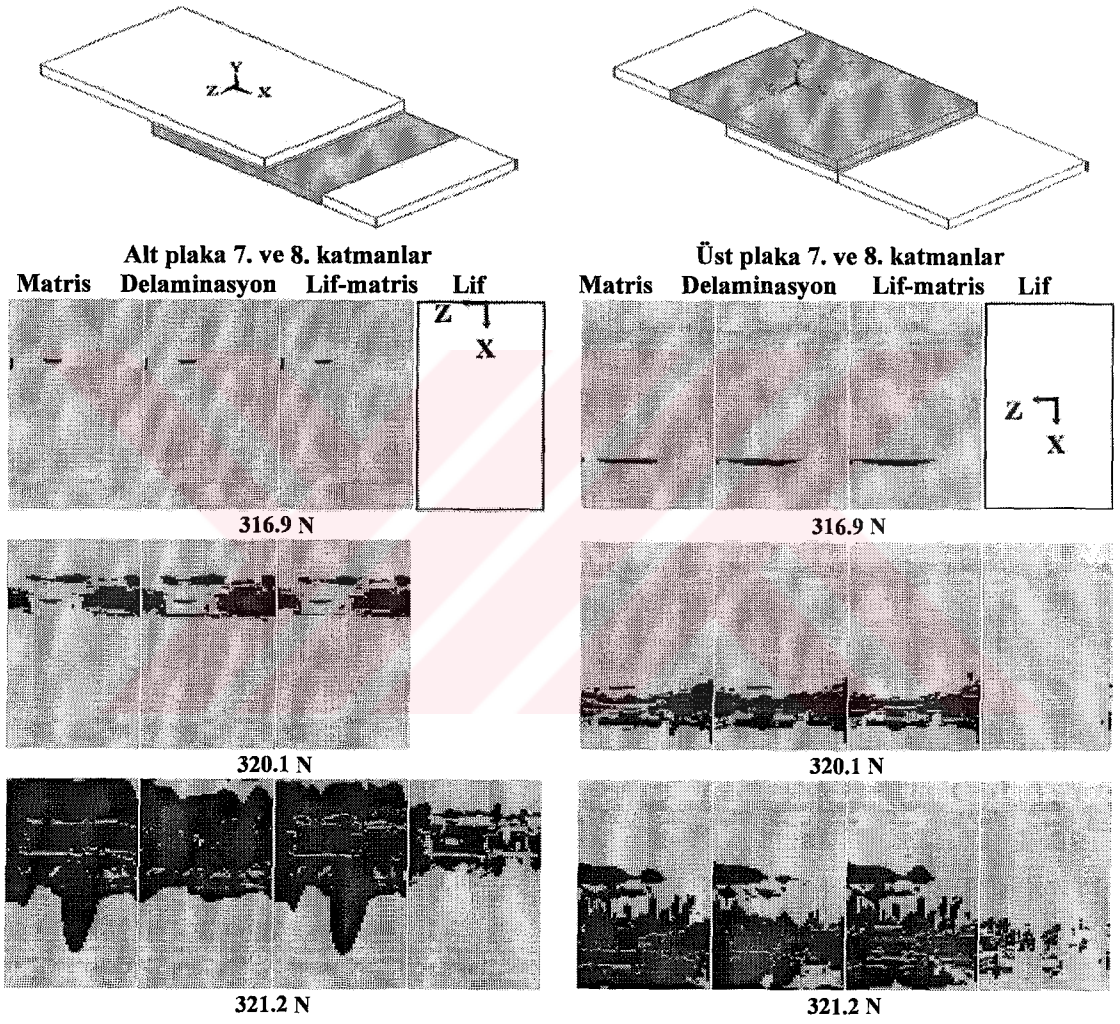
0° lik kompozit bindirme bağlantısının üst plakasının 3. ve 4. katmanlarında; hasar matris ve delaminasyon hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlamaktadır (Şekil 4-27). 318 N da lif-matris ayrılması hasar modu bindirme bölgesinin orta noktasında yani yükün uygulandığı yerde ortaya çıkmaktadır ve 321.2 N da üst plaka 3. ve 4. katmanları dört hasar modunun tesiri ile yapıştırıcı bindirme bölgesinden tamamen kopmaktadır.



Şekil 4-28 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5. ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Alt plakanın 3. ve 4. katmanlarında ise hasar delaminasyon modunda 302.1 N da başlayıp diğer hasar modları da ortaya çıkarak 321.2 N da katmanların tümünü yapıştırıcı bindirme bölgesinde koparmaktadır. 5, 6, 7, 8, 9 ve 10. katmanlarda oluşan hasarlar yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımlardan çok yükün uygulandığı yere daha yakın meydana gelmektedir (Şekil 4.28-30). Sebebi bu katmanların yükün uygulandığı bölgeye daha yakın olmasıdır. Yapıştırıcıya yakın katmanlara yapıştırıcının serbest ucundaki gerilme yığılmalarının etkisi çok fazla olduğu için hasarlar burada oluşmakta iken yapıştırıcıdan uzaklaştıkça dıştaki katmanların özellikle yapışanın yarısından sonraki katmanların uygulanan yükten ve bindirme bağlantısında yükten dolayı oluşan deformasyondan etkilendiğini görmekteyiz. Yük artıkça hasarlar yapıştırıcı bindirme

bölgesinde iyice yayılıp katmanlar dört hasar modunda kopmaktadır. Hashin kriteri alt ve üst plakalarda hasarın bindirme bölgesinde tamamen yayıldığını tahmin etmektedir. Tsai-Wu kriteri ise, hasarın yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımda iyice yayıldığını ve alt plakada ise Hashin kriterinin tahmin ettiği hasara göre yok denecek kadar az olduğunu tahmin etmiştir (Şekil 3-17).

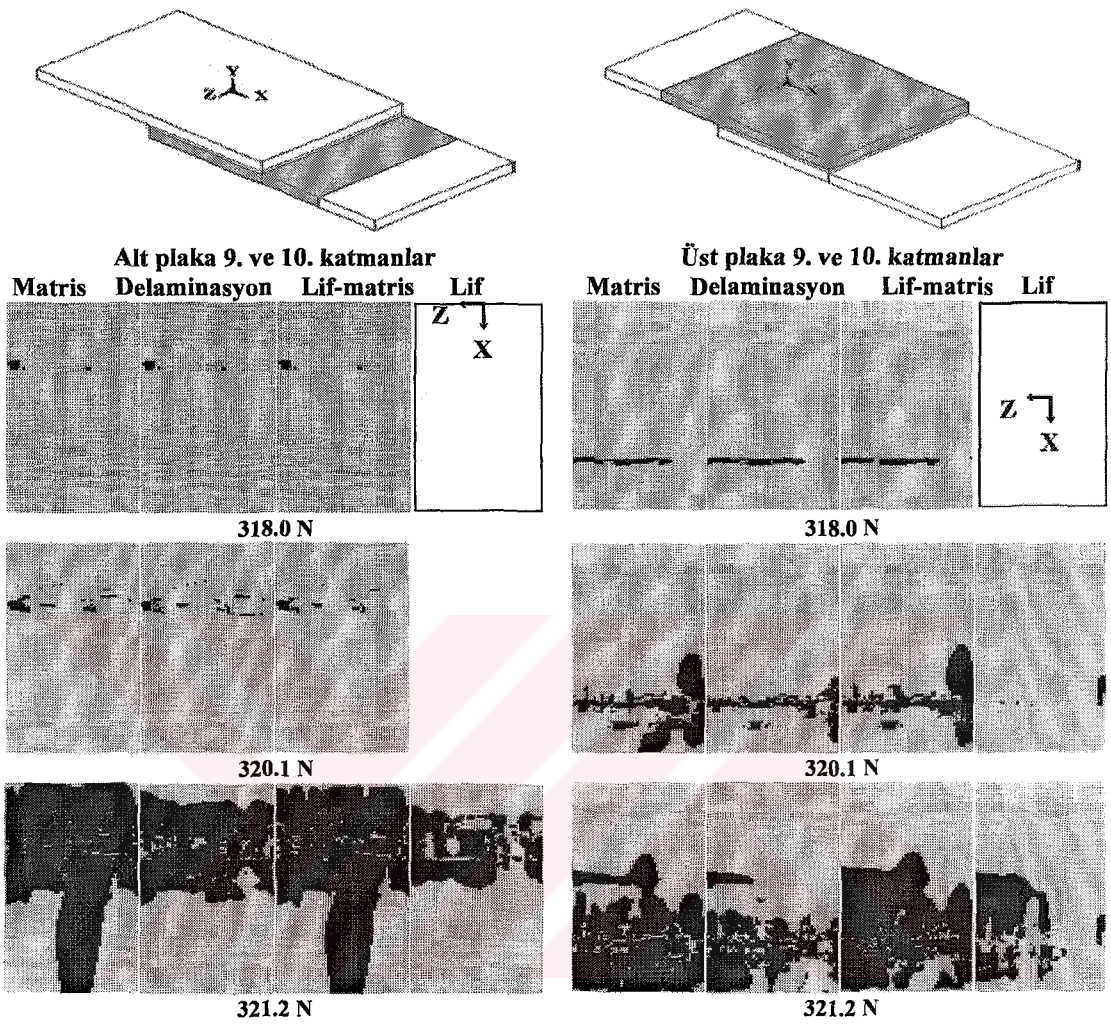


Şekil 4-29 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7. ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

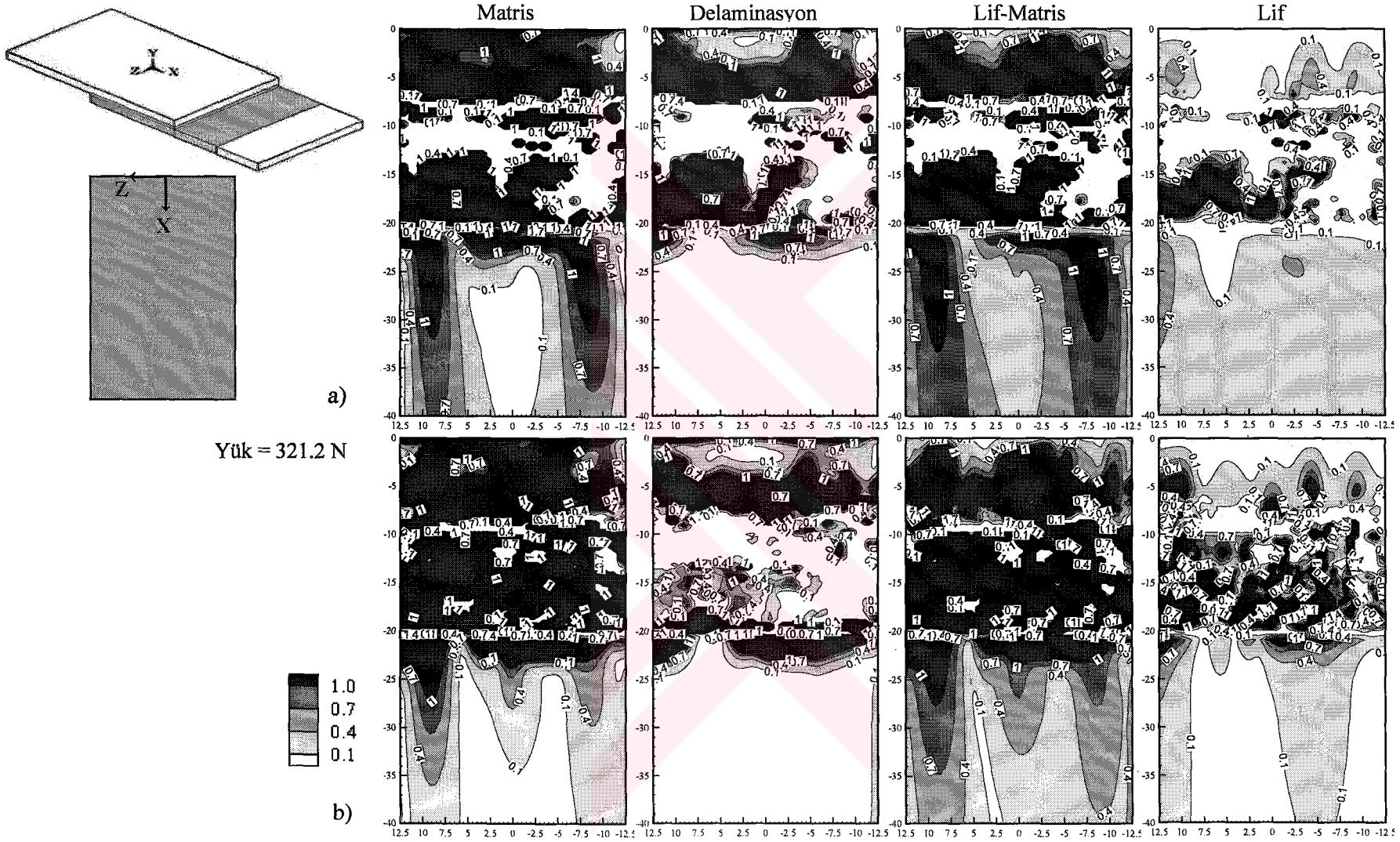
Şekil 4-31-35'deki şekillerde 0° lik kompozit bindirme bağlantısının 321.2 N da bütün katmanlarının Hashin indeks değerlerinin dağılımı görülmektedir. Alt plakanın genel olarak bütün katmanlarında matris ve lif-matris ayrılması hasar modları delaminasyona göre daha geniş bir bölgeye yayılmışlardır. Bu durum bindirme bölgesinde matrisin, life göre daha zayıf olmasından dolayı gerilme yığılmalarından ve deformasyonlardan etkilendiğini göstermektedir. Ayrıca yapıştırıcıya yakın olan katmanlarda hasarlar yapıştırıcı serbest uçlarında yoğunlaşmış iken dıştaki katmanların hasarları bindirme bölgesinde tamamen yayılmış ve plakanın serbest tarafına doğru ilerlemiştir. Bunun sebebi; alt plakanın alt yüzeyinin çekmeye üst yüzeyinin de basmaya maruz kalmasıdır (Şekil 3-20).

Daha öncede belirtildiği gibi yapıştırıcı basmaya çekmeden yaklaşık 3 kat daha fazla dayanıklı olduğu için yapıştırıcıya yakın olan katmanlar sadece serbest uçlardaki gerilme yığılmalarından etkilenirken dıştaki katmanlar hem gerilme yığılmalarından hem de çekme deformasyonlarından etkilenmektedir. Üst plakanın hasarlarını incelediğimizde ise, yapıştırıcıya yakın olan katmanların hasarlarının dıştaki katmanlara göre daha geniş bölgeye yayılmış olduğunu görmekteyiz.

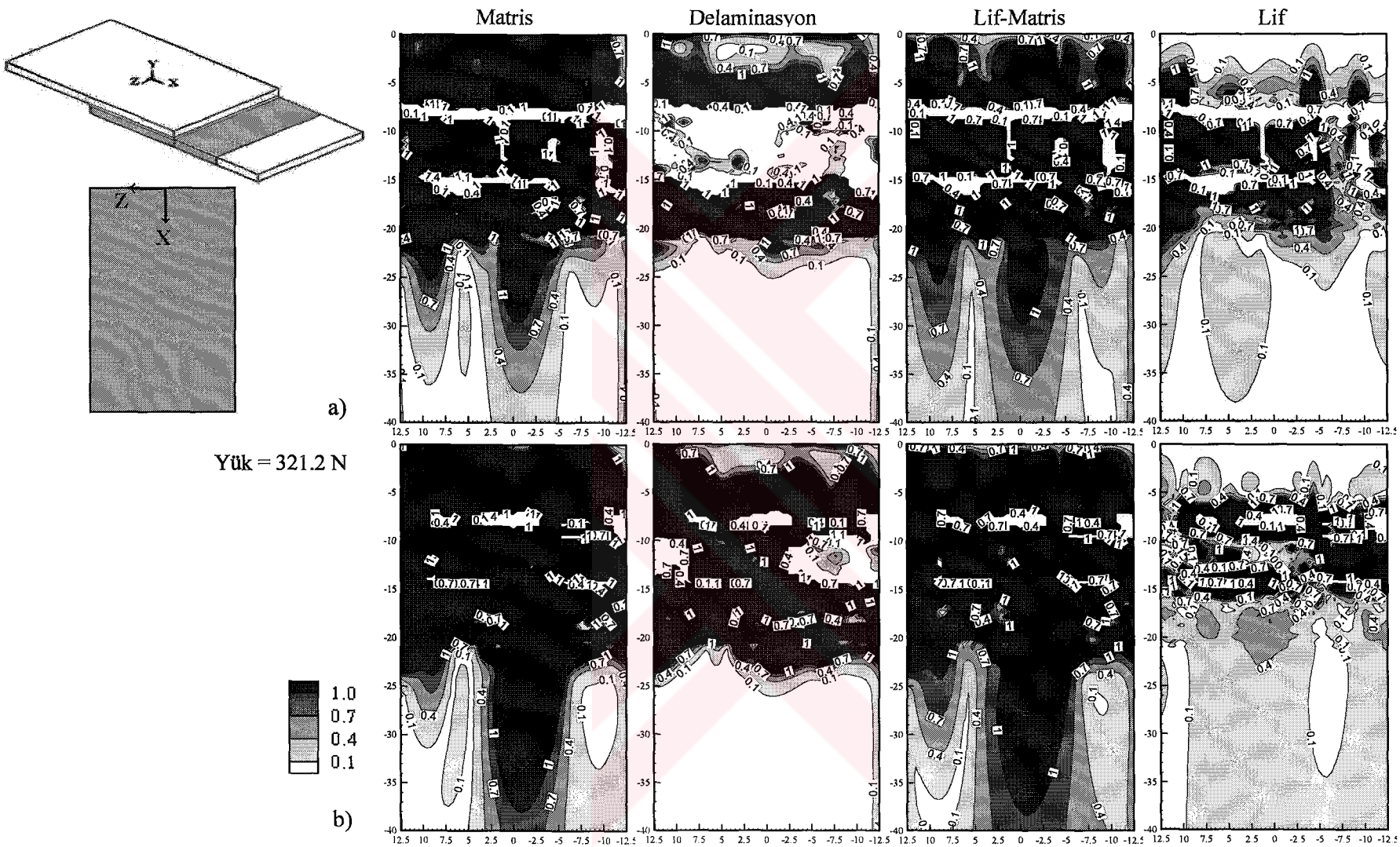
Üst plakada alt plakada olduğu gibi alt yüzey çekmeye maruzken üst yüzey basmaya maruzdur. Fakat üst plakada alt yüzeyde yapıştırıcıya yakın olan katmanlar üst yüzeyde ise dıştaki katmanlar mevcuttur. Yapıştırıcıya yakın olan katmanlar hem çekme durumundan hem de gerilme yığılmalarından dolayı daha fazla hasarlı olmaktadır. Ayrıca 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hem alt hem de üst plakalarında çekme yükünün aksine üç nokta eğme yükü altında lif kopması hasar modu görülmektedir. Oluşan bu hasarların özellikle yükün uygulandığı yerde yoğunlaştığını dikkate alırsak bindirme bağlantısının yükün uygulandığı yerde kayma gerilmelerine maruz kalmasından dolayı buradaki liflerin kopmaya zorlandıkları görülmektedir.



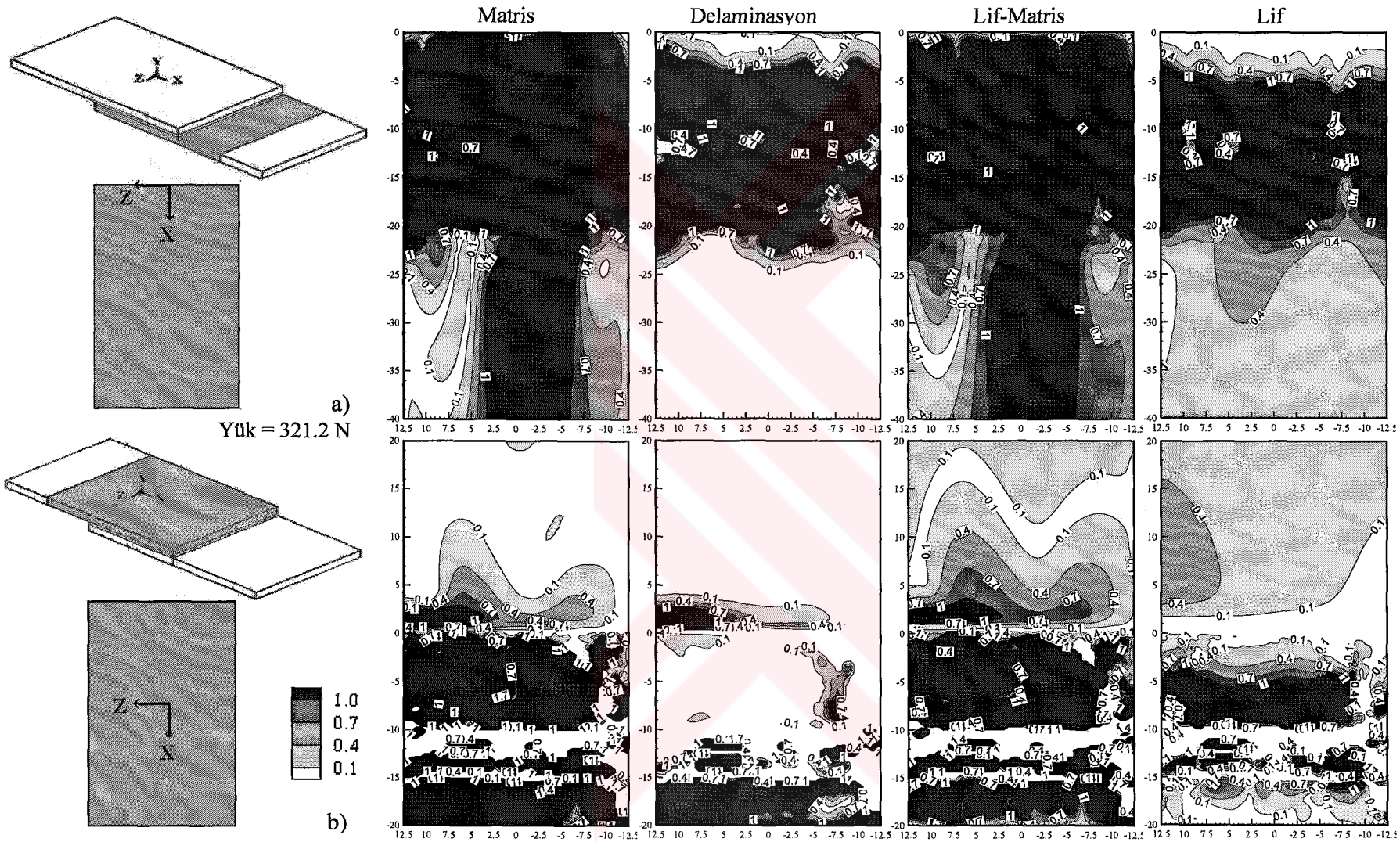
Şekil 4-30 Üç nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9. ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



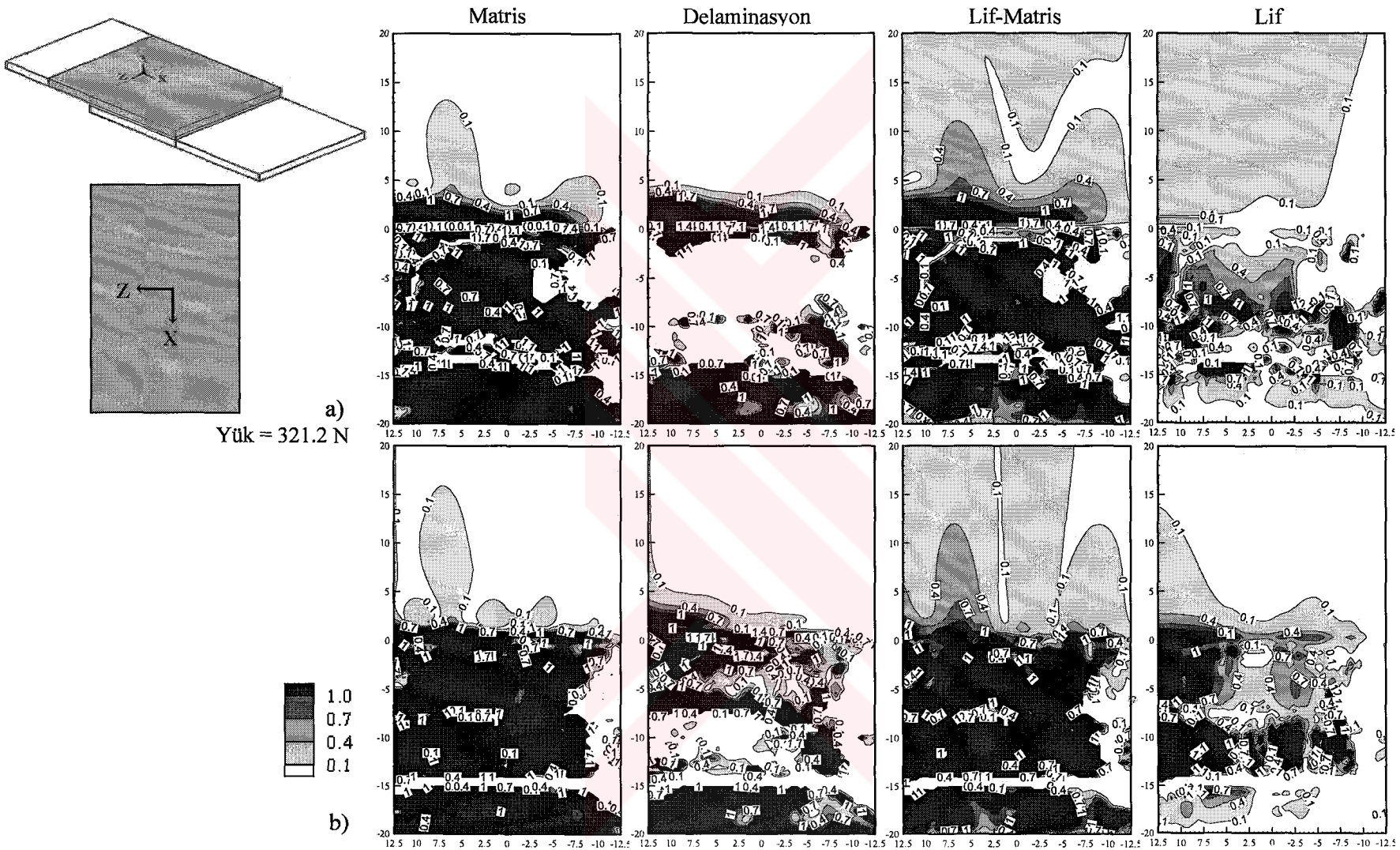
Şekil 4-31 Üç nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



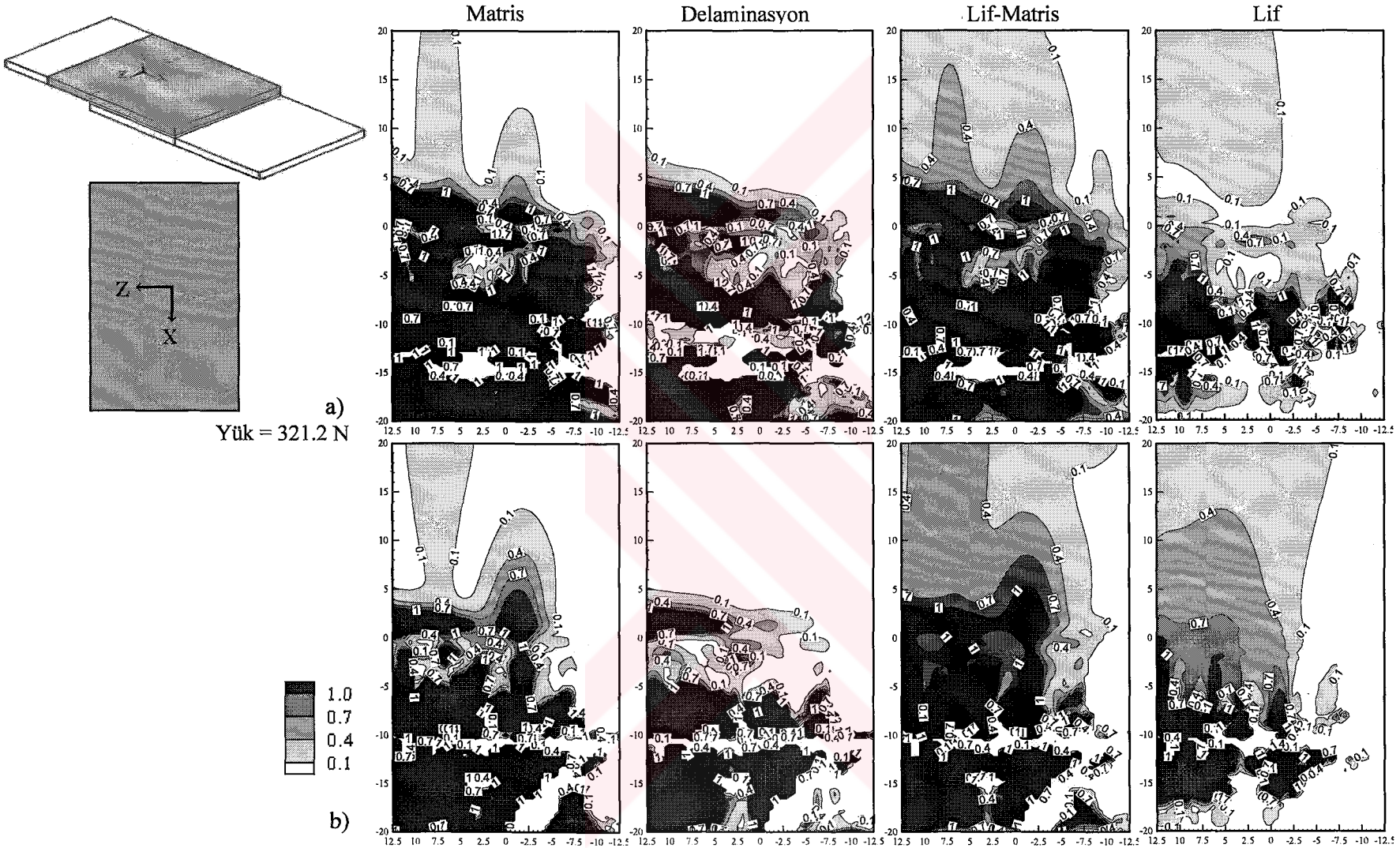
Şekil 4-32 Üç nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



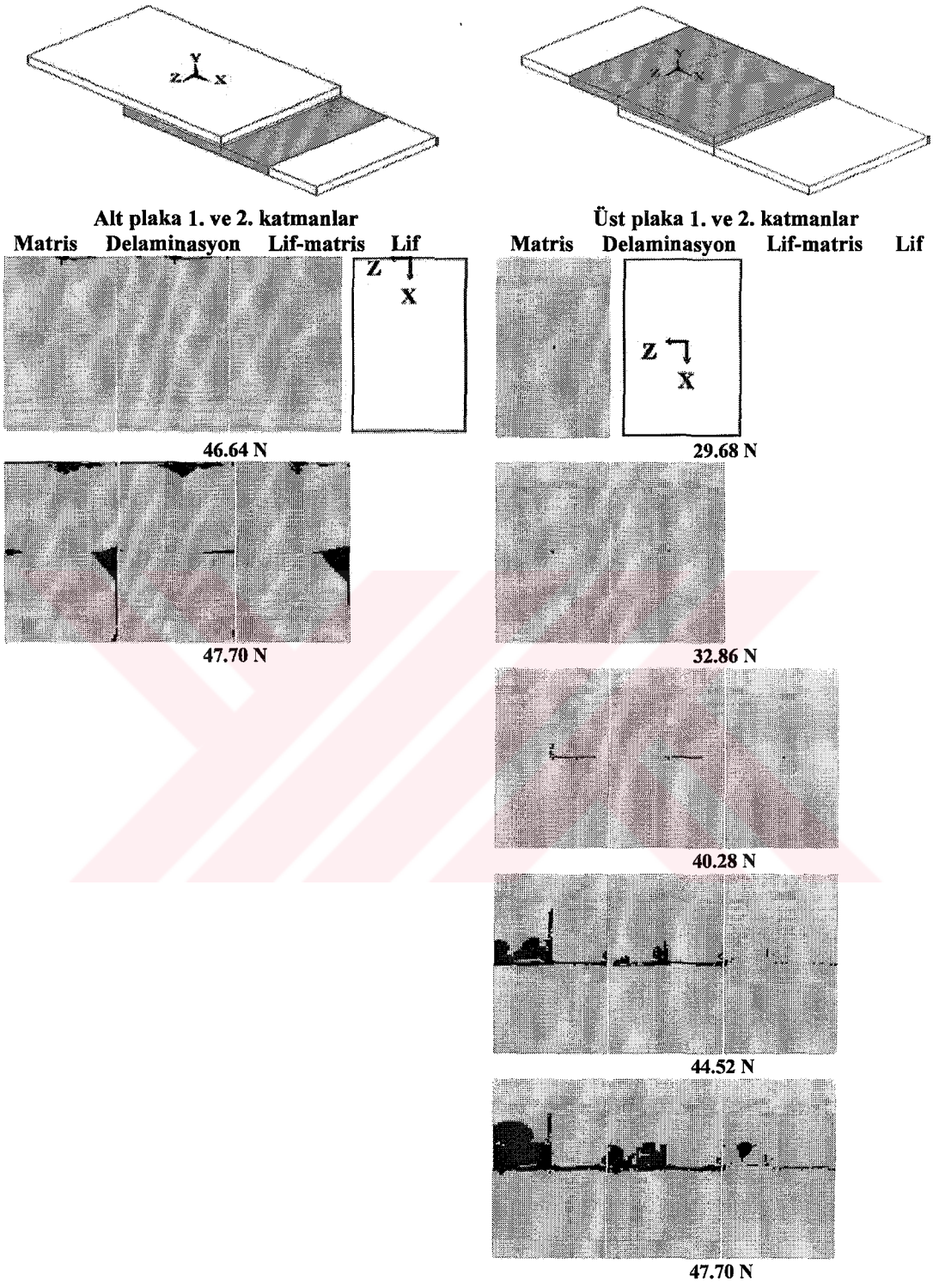
Şekil 4-33 Üç nokta eğme durumunda 0° lik a) alt plakanın 9 ve 10. b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri



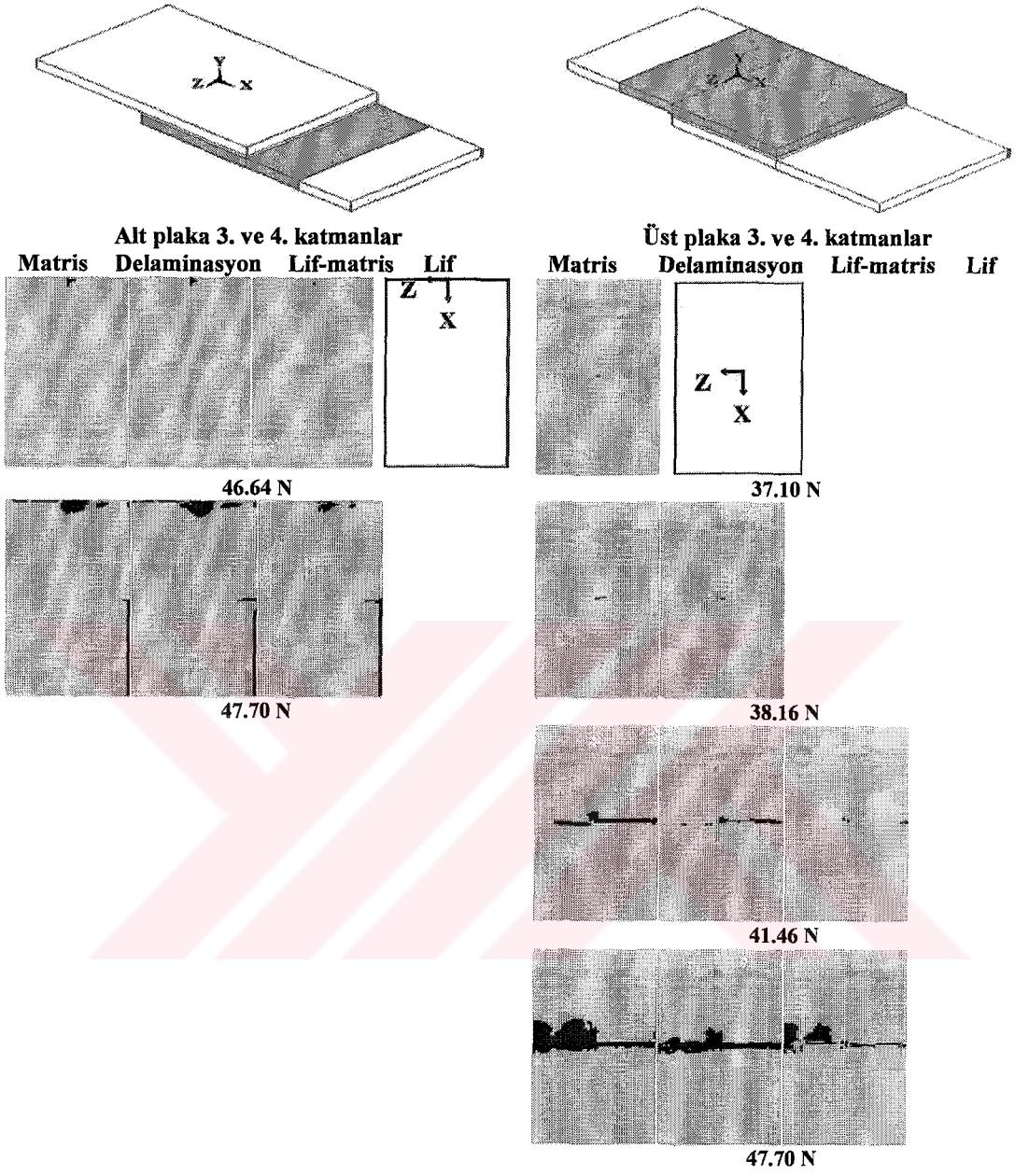
Şekil 4-34 Üç nokta eğme durumunda 0° lik üst plakanın a) 3 ve 4. b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-35 Üç nokta eğme durumunda 0° lik üst plakanın a) 7 ve 8. b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri



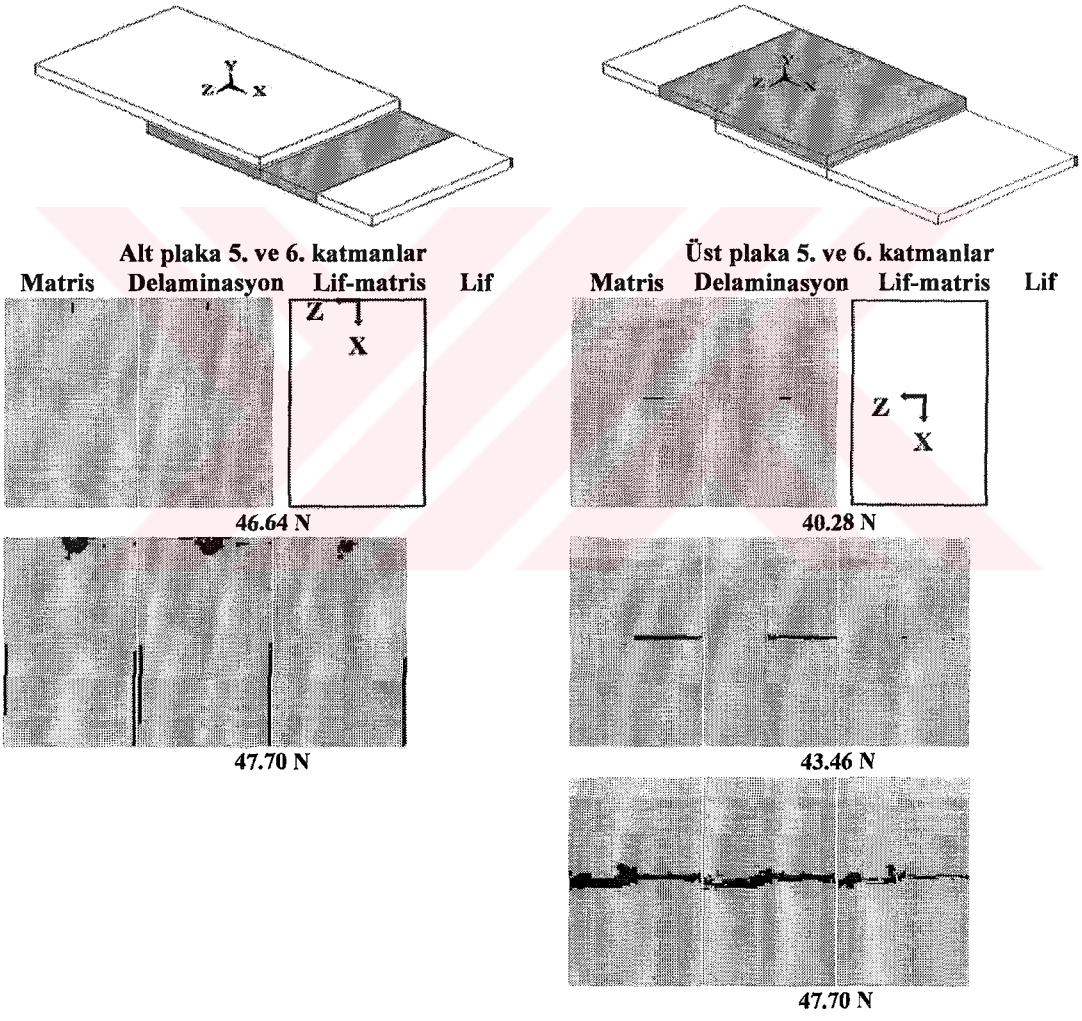
Şekil 4-36 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1. ve 2. katmanlarının Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



Şekil 4-37 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3. ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

45° lik kompozit bindirme bağlantısı üç nokta eğme yüküne maruz kaldığında ilk hasar 28.68 N da üst plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta ve yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmaktadır (Şekil 4-36). Tsai-Wu kırılma kriterinde ise 29.15 N da yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamıştır (Şekil 3-18). Görüldüğü gibi Hashin kriteri hasarı daha yüksek yüklerde tahmin etmektedir.

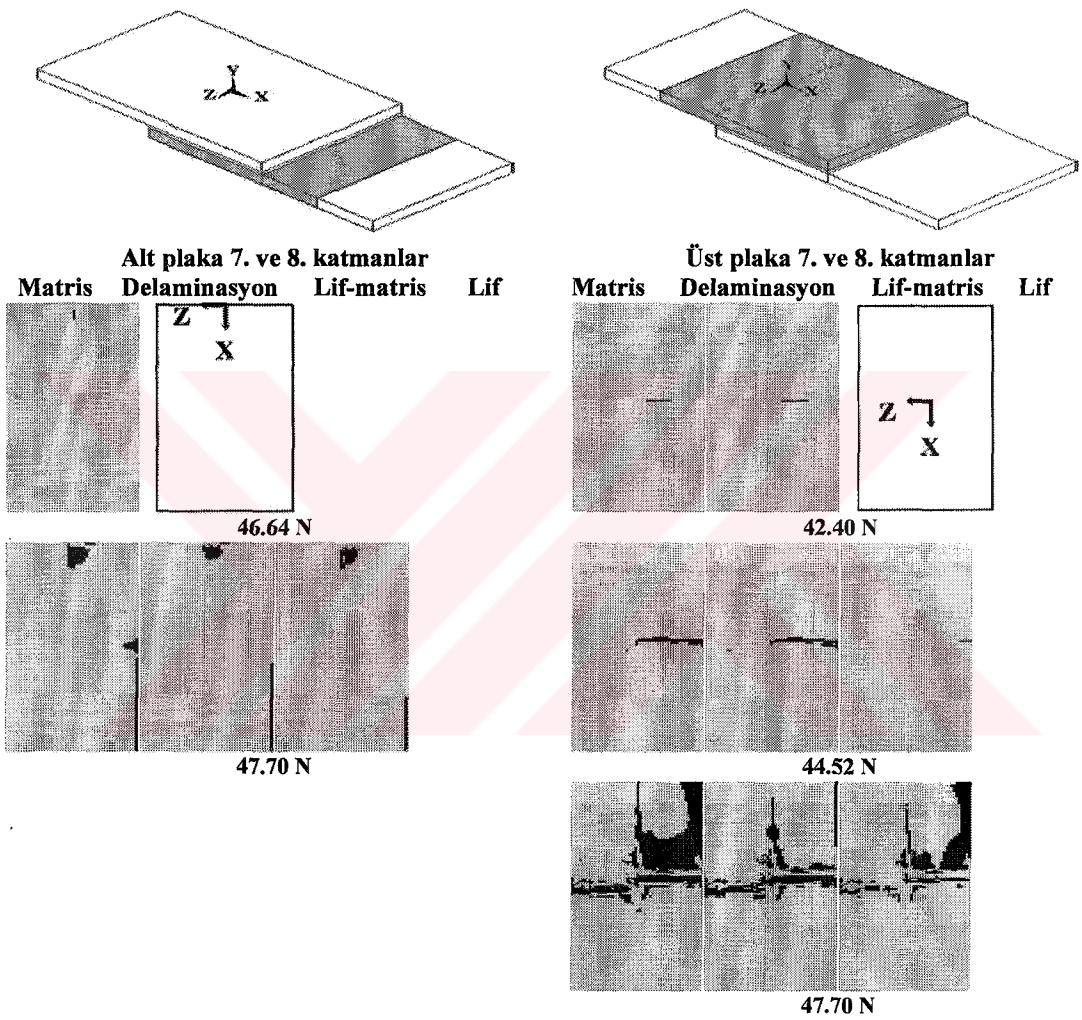
32.86 N da delaminasyon hasar modu ve 40.28 N da da lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta ve yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmaktadır. Bu katmanlar 47.70 N da lif kopması hasar modu hariç diğer üç hasar modunda kopmaktadır. Matris hasar moduna baktığımızda yapıştırıcı serbest ucunun sol kısmında 45° lik lif eksenine paralel şekilde hasarın daha fazla yayıldığını görmekteyiz. Bu durum bize Hashin kriterinin bu katmanda kopmanın matristen lif yönlerine paralel şekilde yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımdan plakanın serbest tarafına doğru kopacağını göstermektedir.



Şekil 4-38 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5. ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Şekil 4-36'da alt plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında oluşan hasarı incelediğimizde ilk hasarın 46.64 N da üç hasar modunda da plakanın bittiği serbest uçta, üst plaka

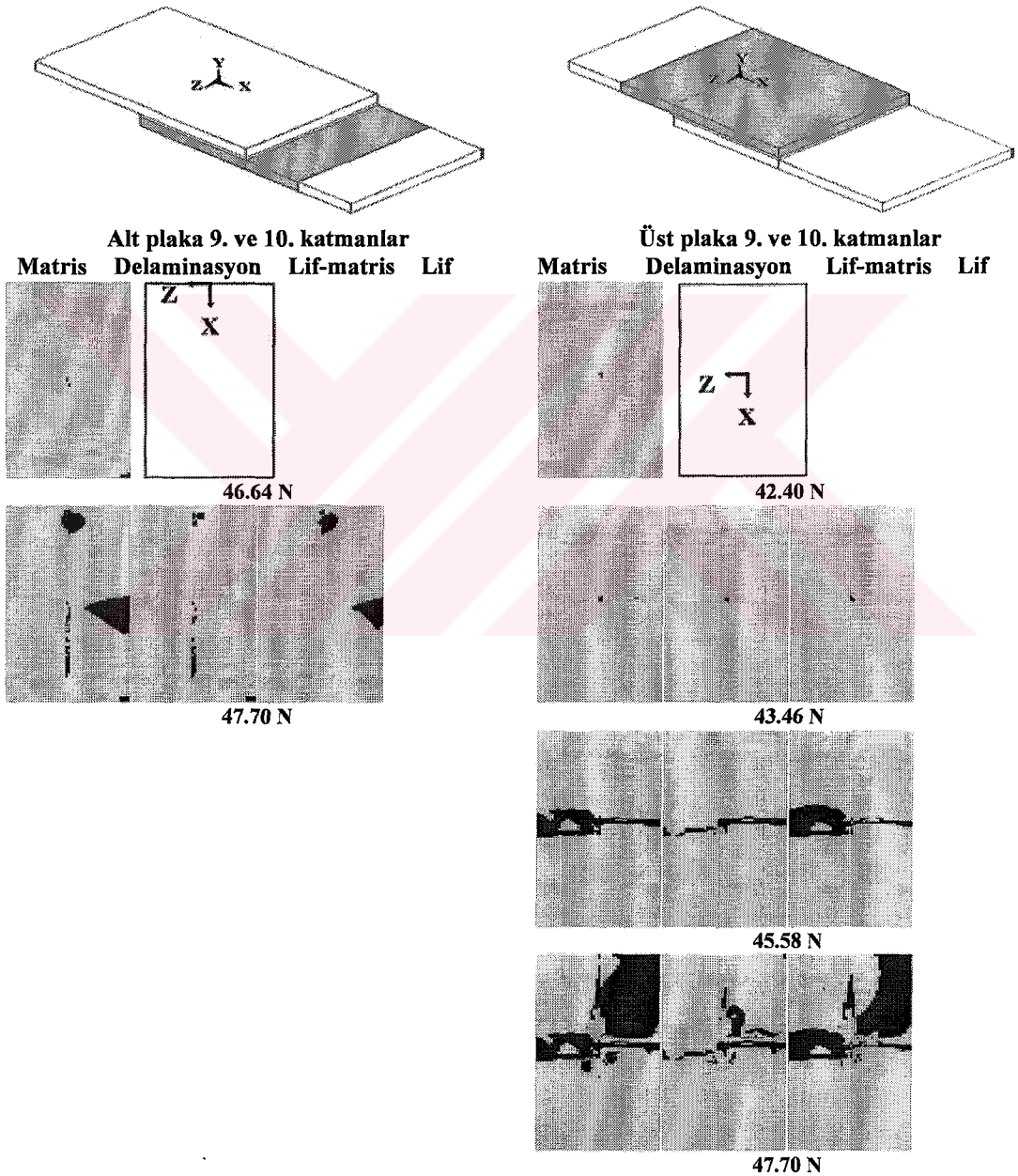
yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başladığı görülmektedir. Üst plaka yapıştırıcı serbest ucunda hasar iyice yayıldığı ve artık yük taşıyamadığı için alt plakanın 1. ve 2. katmanları bu kısımda yükü taşımaya zorlanmakta ve bu nedenle hasarlar başlamaktadır. 47.7 N da yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda yanal hasarlar oluşmaktadır.



Şekil 4-39 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7. ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

3. ve 4. katmanlarda hasarı incelediğimizde; üst plakada 37.10 N da hasar matris hasar modunda yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta ve yük arttıkça da delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarına geçmektedir (Şekil 4-37). Hasarlar yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmakta ve 47.70 N da katmanlar kopmaktadır. 1. ve 2. katmalarda olduğu gibi 3. ve 4. katmanlarda da matris hasar modu

yapıştırıcı serbest ucu civarının sol tarafında fazla yayılmıştır, fakat 1. ve 2. katmanlara göre daha dardır. Lif eksenine paralel şekilde yapıştırıcı serbest ucundan plakanın serbest tarafına doğru matris kopma bu katmanlarda da devam etmektedir. Alt plakaya baktığımızda, 46.64 N da 1. ve 2. katmanlarda olduğu gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlayıp yayılırken 47.70 N da alt plaka yapıştırıcı serbest ucu kısmının sağ tarafında yanal hasar oluşmaktadır.

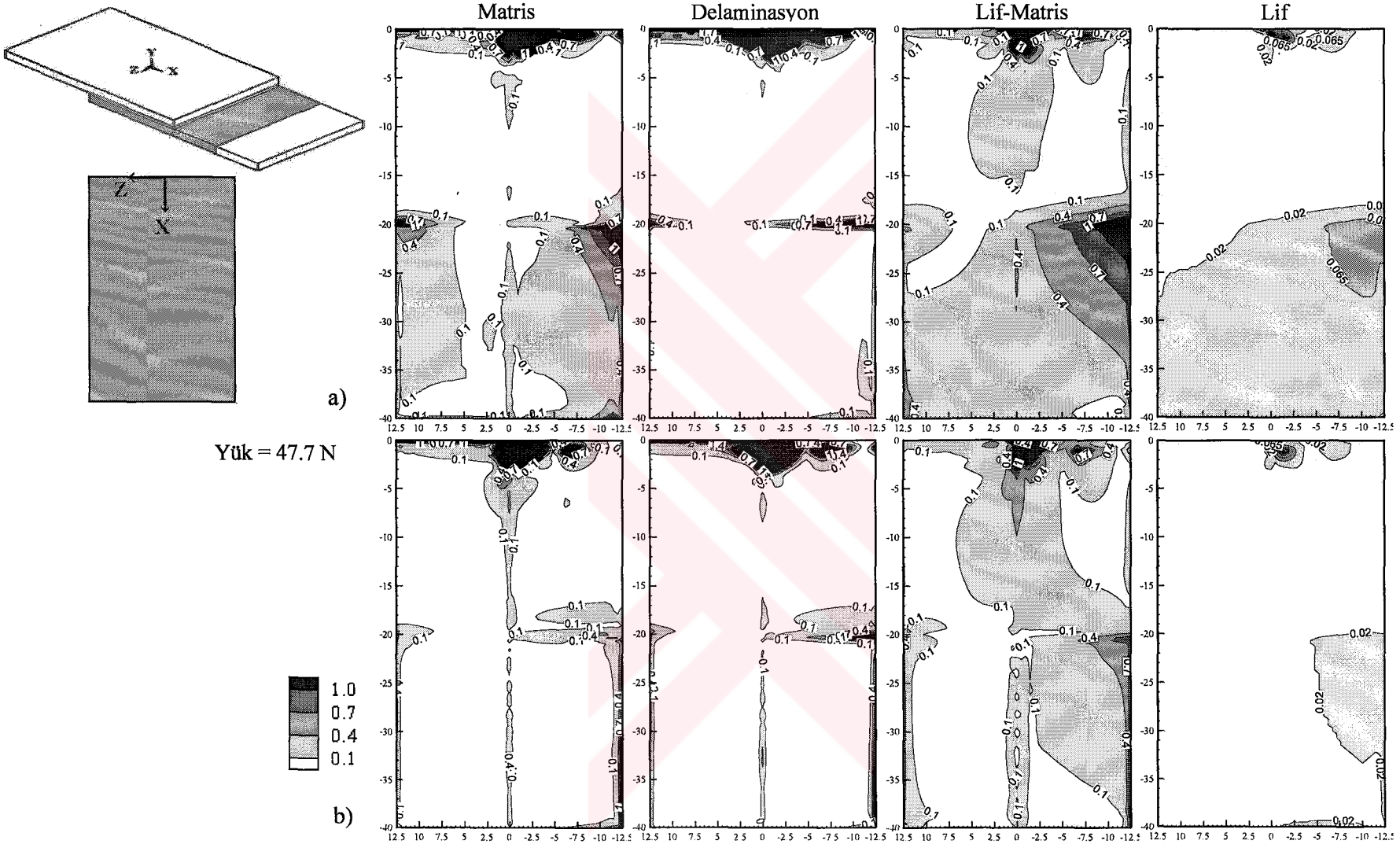


Şekil 4-40 Üç nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9. ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

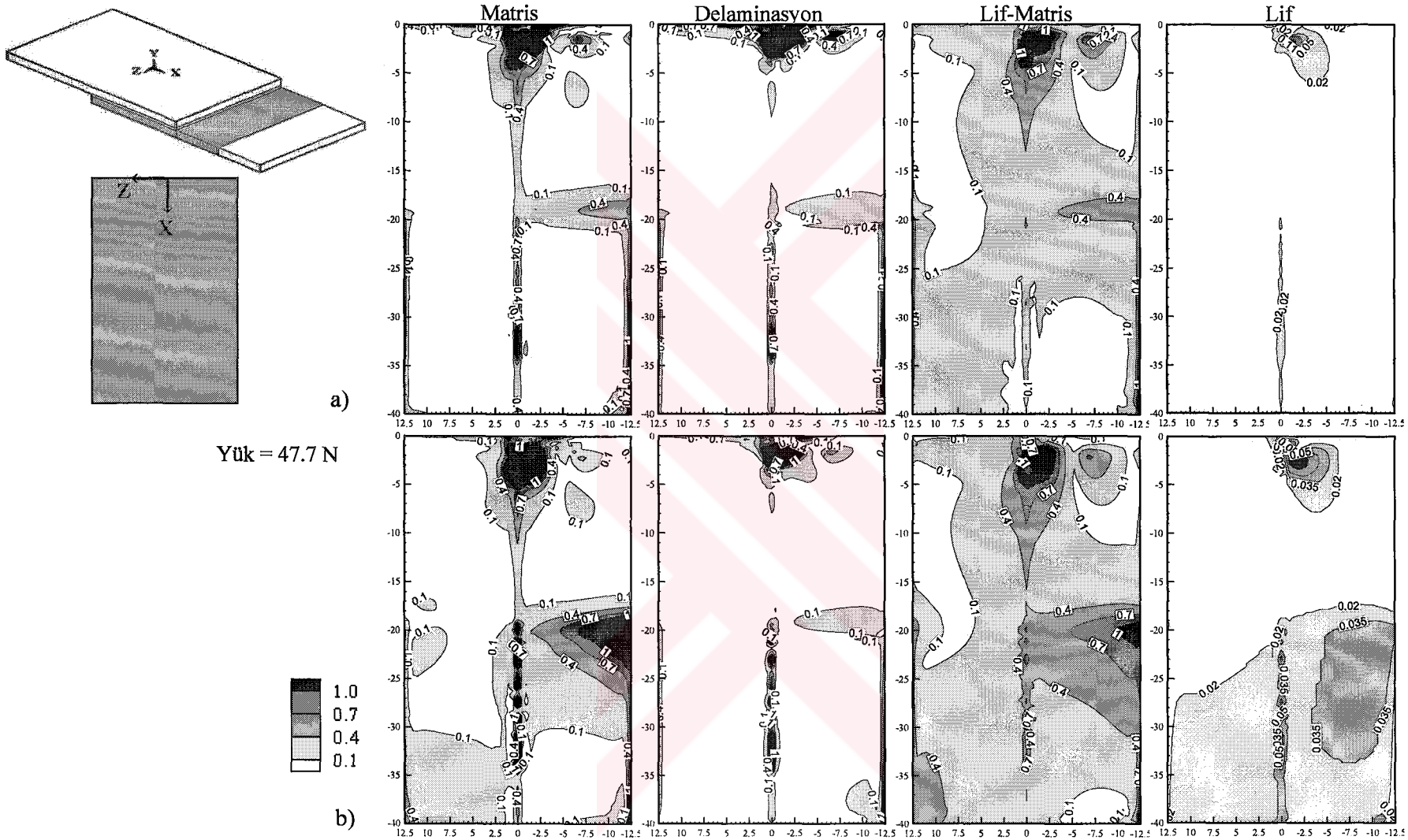
5. ve 6. katmanlarda hasar üst plakada 40.28 N da diğer katmanlardaki gibi matris ve delaminasyon hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta ve yük arttıkça da lif-matris ayrılması moduna geçmektedir (Şekil 4-38). Üst plakada 1, 2, 3 ve 4. katmanlarda lif eksenine paralel giden matris hasarı 5. ve 6. katmanlarda pek belli olmamaktadır sadece Tsai-Wu kriterinin tahmin ettiği gibi yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmıştır (Şekil 3-18). Alt plakada, 46.64 N da 1, 2, 3 ve 4. katmanlarda olduğu gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda hasar başlayıp yayılırken 47.70 N da alt plaka yapıştırıcı serbest ucu kısmında yanal hasarlar oluşmaktadır.

Dıştaki katmanlara gittikçe yani 7, 8, 9 ve 10. katmanlarda üst plakada hasarın uygulanan yükün etkisiyle daha geniş bir bölgede yayıldığı görülmektedir (Şekil 4.39-40). Üst plakada dıştaki bu katmanlarda da hasar matris, lif-matris ayrılması ve delaminasyon hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısım boyunca ortaya çıkmaktadır. Alt plakada diğer katmanlardaki gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlayıp yayılırken 47.70 N da üç hasar modunda da alt plaka yapıştırıcı serbest ucu civarında yanal hasarlar oluşmaktadır.

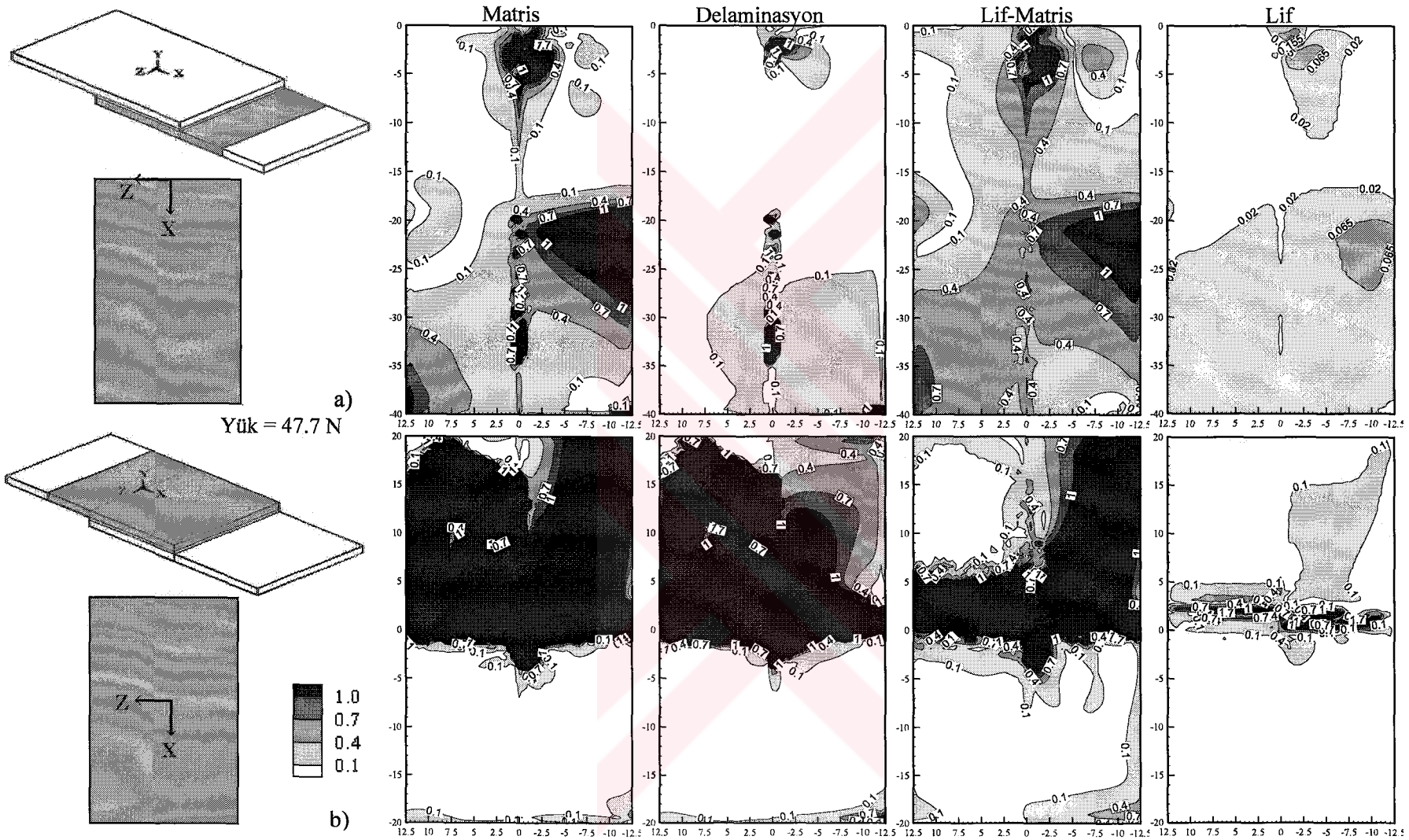
Şekil 4.41-45, 45° lik kompozit bindirme bağlantısının 47.7 N da tüm katmanlarının Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımını göstermektedir. Üst plakada matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modları geniş alana yayılmışken lif kopması hasar modu yapıştırıcı serbest ucu civarında daha dar bir bölgededir. Ayrıca yapıştırıcıya yakın olan katmanların hasarları yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmalarından dolayı dıştaki katmanlara göre daha fazladır. Alt plaka ise hasar üst plakaya göre daha dar bölgededir. Üst plaka serbest ucuna denk gelen kısımda yani alt plakanın uç kısmında ve ayrıca alt plaka yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımda yanal hasarlar oluşmaktadır. Özellikle alt plakada matris ve lif-matris ayrılması hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımdaki yanal hasarlar lif eksenine paralel şekilde ve plakanın serbest kısmına doğrudur. Hashin kriterinin alt plakada tahmin ettiği hasarlar Tsai-Wu kriteri tarafından tahmin edilememektedir. Ayrıca Hashin kriterine göre üst plakadaki hasarlar Tsai-Wu kriterinin hasarından daha geniş bölgeye yayılmıştır. Sebebi Hashin kriterinin hasarı daha yüksek yüklerde tahmin etmesi ve üst plakadaki hasarın iyice yayılmasından dolayı alt plakanın yük taşımaya zorlanmasıdır.



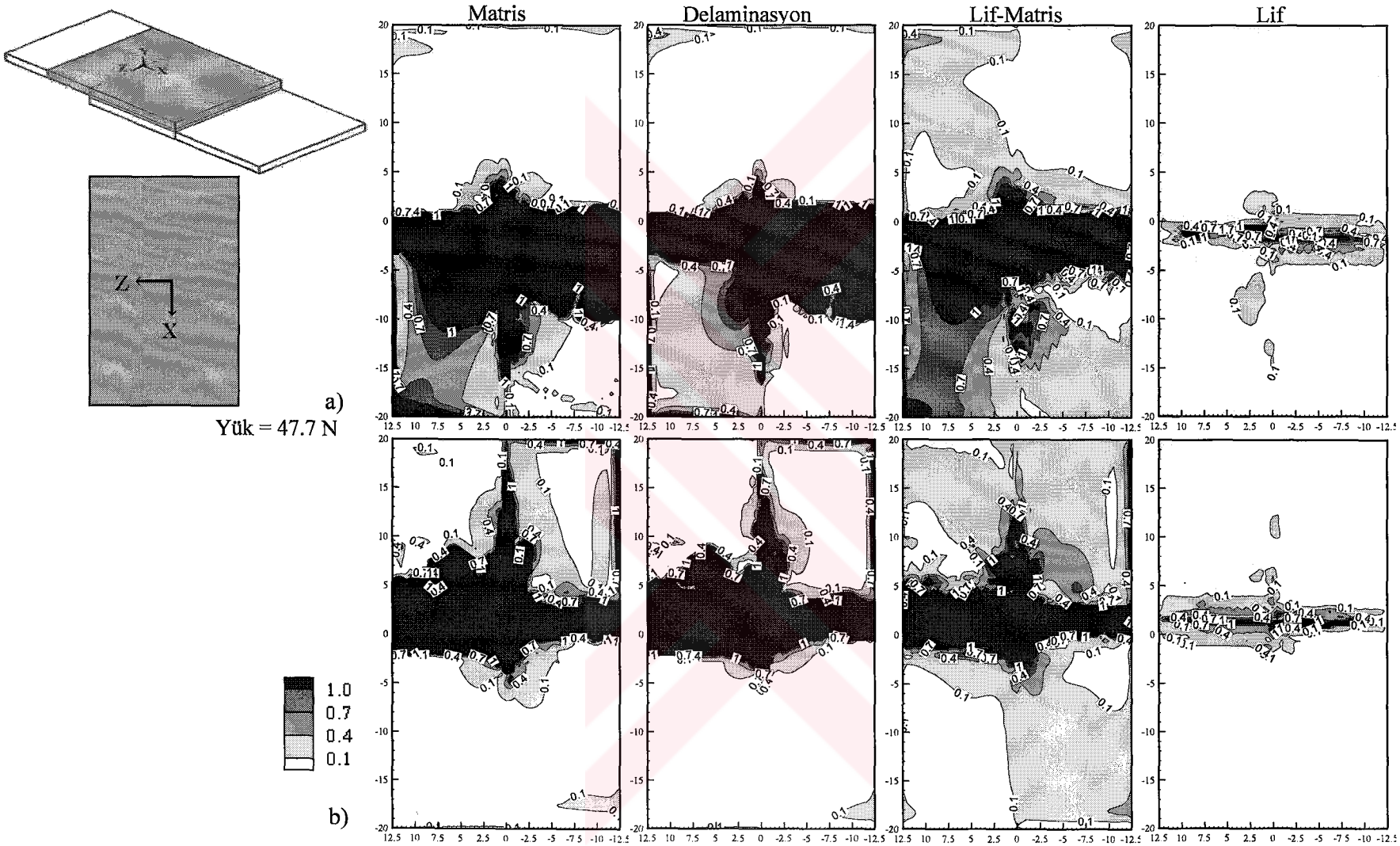
Şekil 4-41 Üç nokta eğme durumunda 45° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



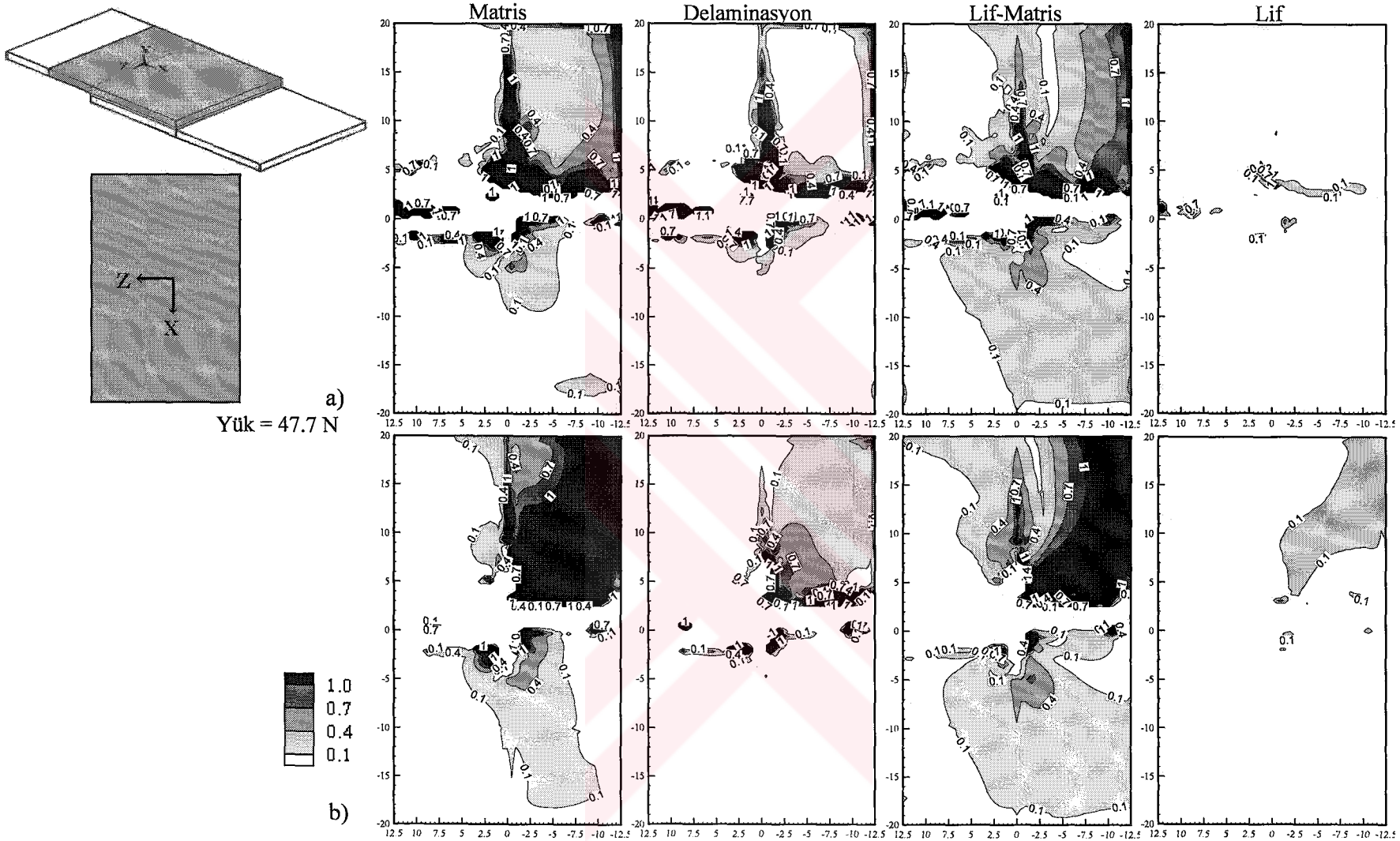
Şekil 4-42 Üç nokta eğme durumunda 45° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-43 Üç nokta eğme durumunda 45° lik a) alt plakanın 9 ve 10. b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-44 Üç nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın a) 3 ve 4. b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri

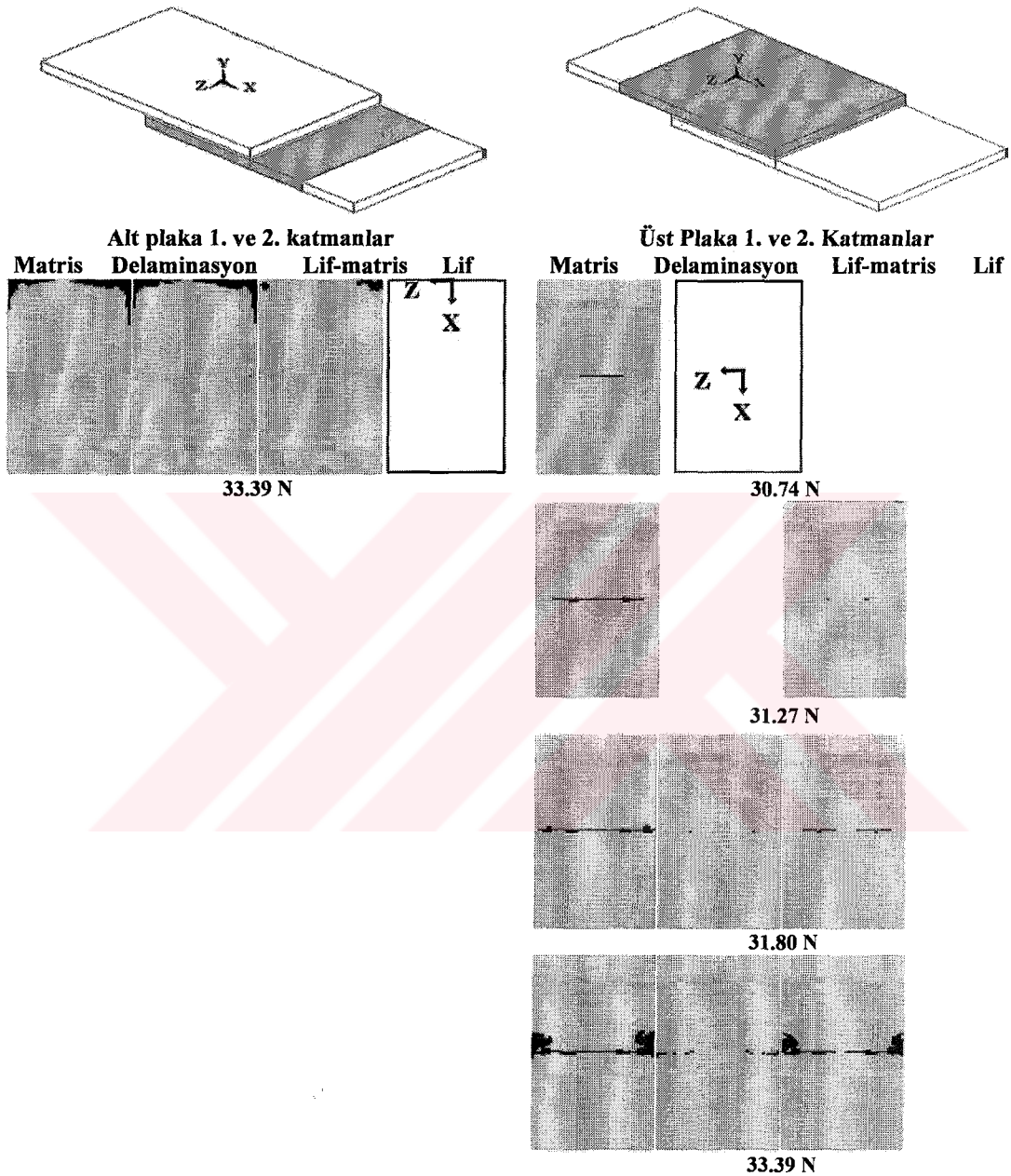


Şekil 4-45 Üç nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın a) 7 ve 8. b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri

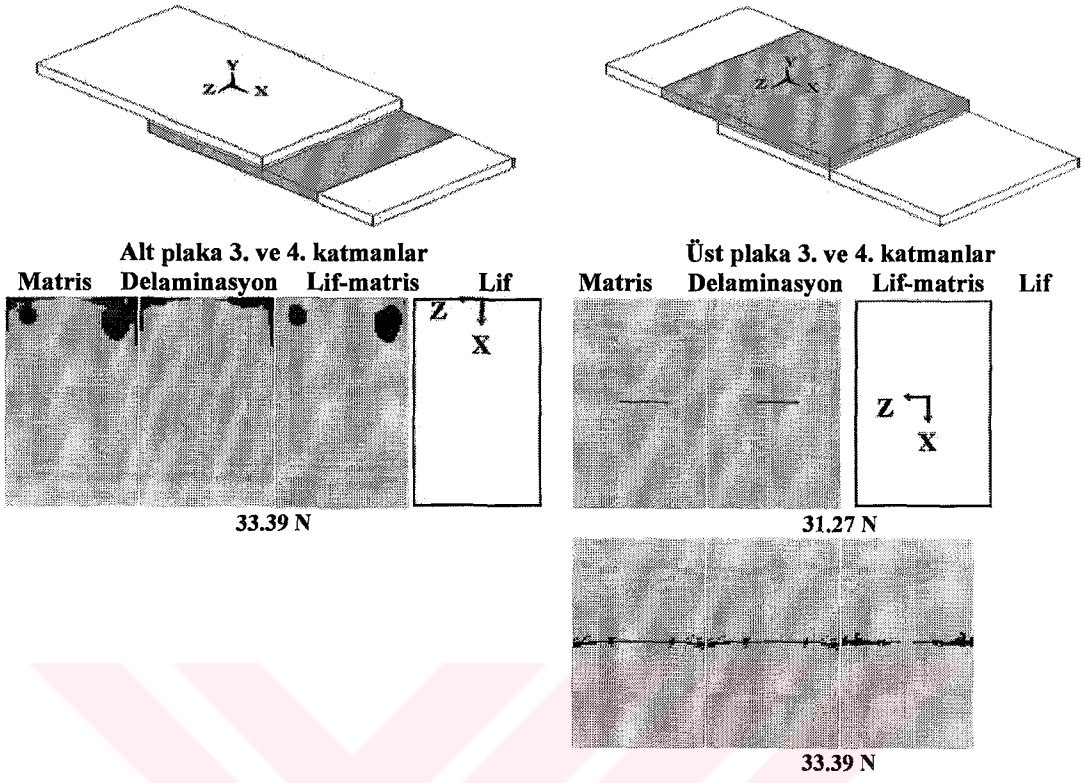
Üç nokta eğme yükü altında 0 ile 45° lik kompozit bindirme bağlantılarını karşılaştıracak olursak, 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hasarının genel olarak bindirme bölgesinde yayıldığını görmekteyiz. Fakat 45° lik kompozit bindirme bağlantısında hasar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ve bu bölgeden plakanın serbest olan kısmına doğru lif eksenine paralel şekilde yayılmıştır. Bunun sebebi, 0° lik kompozit bindirme bağlantısının üç nokta eğme yüküne 45° lik bağlantıdan daha dayanıklı olmasıdır. 0° lik kompozit bindirme bağlantısı daha dayanıklı olduğu için eğme yükünden yapıştırıcı daha fazla etkilenmektedir ve yapıştırıcı hızlı bir şekilde zayıflamaktadır. Yapıştırıcının zayıflamasından dolayı da bindirme bölgesinde plakaya yük aktarılmaktadır ve böylece bindirme bölgesinde plakanın hasarları daha fazla bölgeye yayılmaktadır. Oysa 45° lik kompozit bindirme bağlantısı daya dayanıksız olduğu için yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmaları plakayı bu kısımlardan zayıflatmakta ve kopmasına neden olmaktadır.

90° lik kompozit bindirme bağlantısının üç nokta eğme yüküne maruz kalması durumunda, ilk hasar 30.74 N da üst plakanın yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 numaralı katmanlarında matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlamaktadır (Şekil 4-46). Tsai-Wu kırılma kriterine göre hasarlar ile karşılaştırıldığında, yine üst plakada yapıştırıcıya yakın olan 1. ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında 25.23 N da başladığı görülmektedir (Şekil 3-18). Hashin Kriteri hasarı Tsai-Wu kriterine göre daha yüksek yüklerde tahmin ettiği 90° lik kompozit bindirme bağlantısının üç nokta eğme testinde de görülmektedir. Üst plakada 1. ve 2. katmanlarda hasar matriste ilerlerken 31.27 N da lif-matris ayrılması hasar modu, 31.80 N da delaminasyon hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır ve hasarlar bindirme bölgesine doğru ilerlemektedir. Bu katmanlar 33.39 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında tamamen kopmaktadır. Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği gibi Hashin kriterinin tahmin ettiği hasar yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısım boyunca yayılmıştır ve son kopma yükünde yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısmın hem sağ hem de sol yanlarında yayılma geniştir. Alt plakada ise son kopma yükünde 1. ve 2. katmanlarda plakanın ucunda yani üst plaka serbest ucuna tekabül eden kısımda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması moduda ortaya çıkmaktadır (Şekil 4-46). Üst plakada hasarın yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımda

yayılması ile buradan alt plakanın ucuna yük aktarılmaktadır ve bu nedenle alt plakanın uç kısmında hasarlar oluşmaktadır.

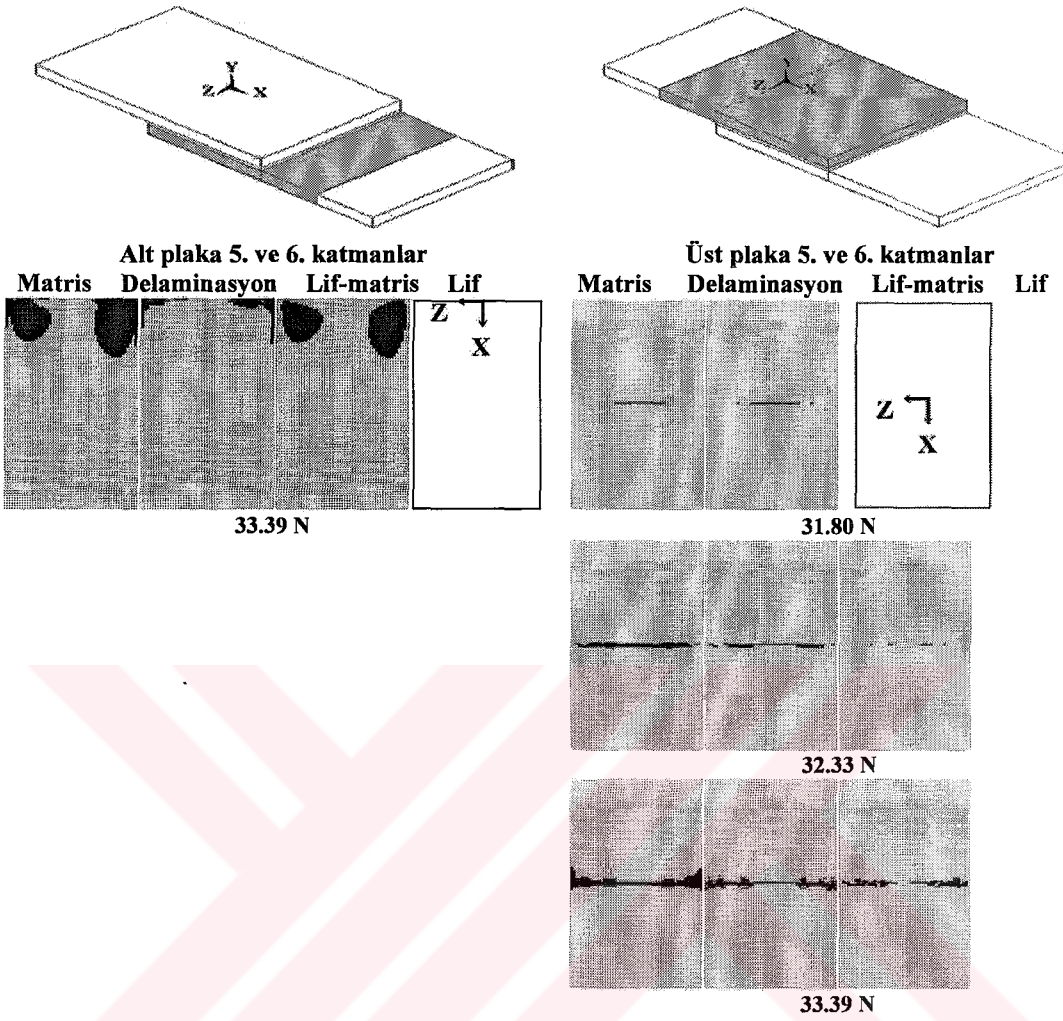


Şekil 4-46 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1. ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



Şekil 4-47 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3. ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

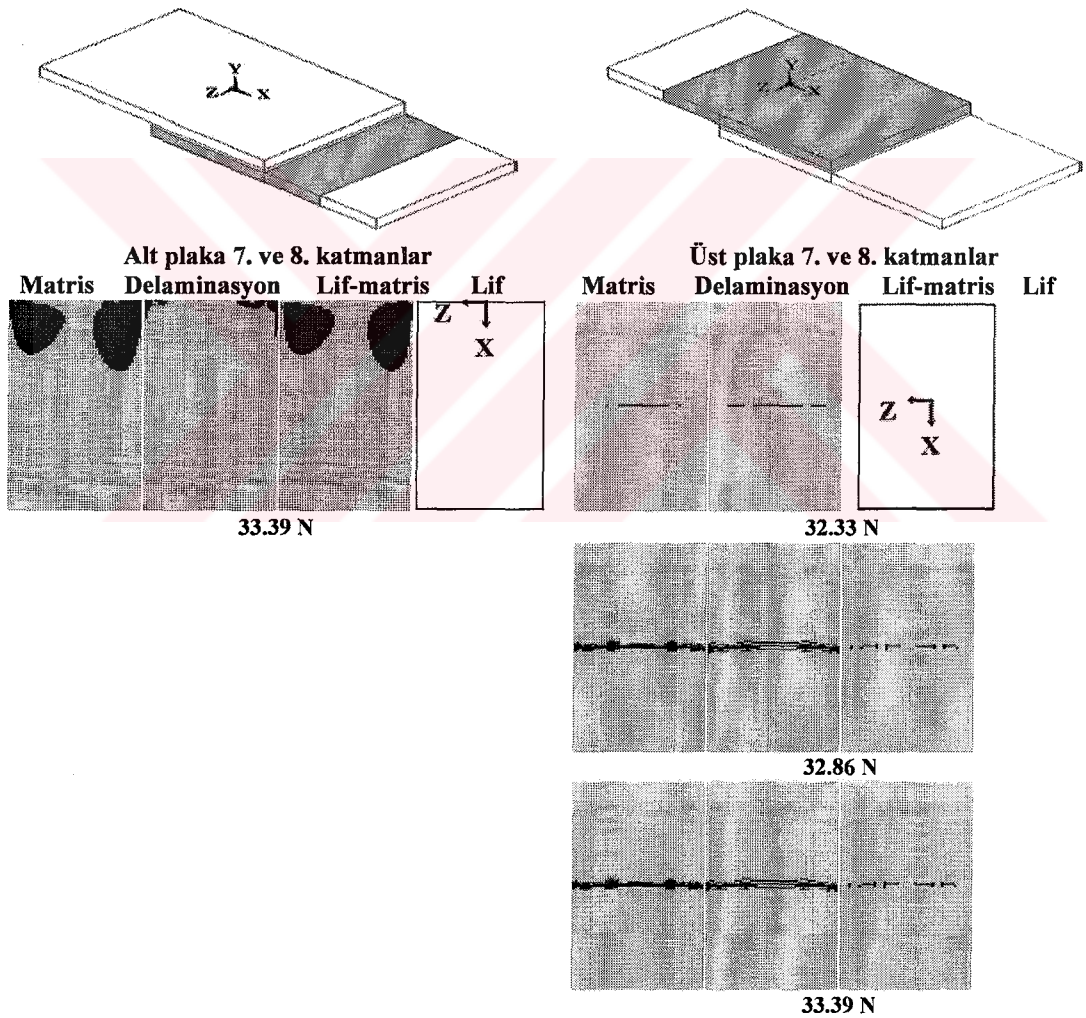
Şekil 4-47 üç nokta eğme yükü altında 90° lik kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3. ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimini göstermektedir. Bu şekli incelediğimizde, üst plakada hasarın 31.27 N da matris ve delaminasyon hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başladığını ve yük arttıkça da lif-matris ayrılması modu tarzında ortaya çıktığını görmekteyiz. Hasarlar yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmakta ve 33.39 N da katmanlar kopmaktadır. Alt plakaya baktığımızda, 33.39 N da 1. ve 2. katmanlarda olduğu gibi uçta, üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modları oluşmaktadır. Bu katmanlarda uçta oluşan hasar 1. ve 2. katmanlara göre biraz daha bindirme bölgesinin içine doğru gelişmiştir ve daha geniş bir bölgede yayılmıştır.



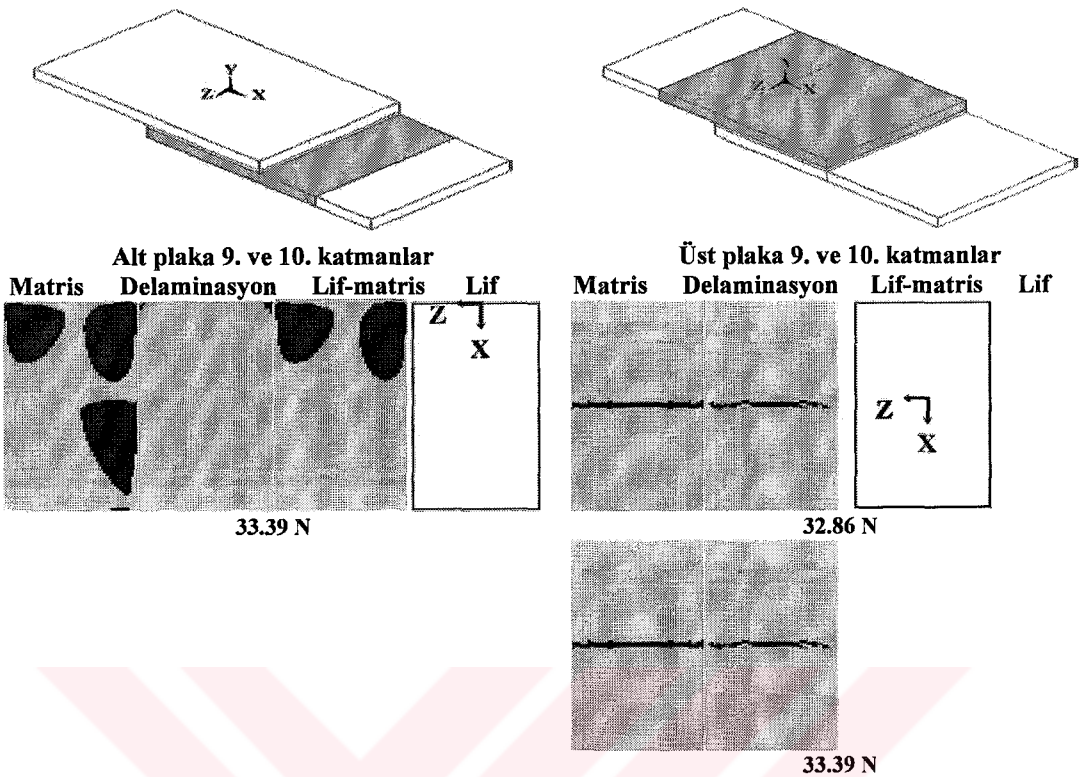
Şekil 4-48 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5. ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

5. ve 6. katmanların hasarı için Şekil 4-48'e baktığımızda; üst plakada 31.80 N da hasar matris ve delaminasyon hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamaktadır. Yük artışıyla birlikte lif-matris ayrılması modu ortaya çıkmaktadır. Hasarlar yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmakta ve 33.39 N da katmanlar kopmaktadır. Alt plakada ise, 33.39 N da 1, 2, 3 ve 4. katmanlarda olduğu gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda hasar oluşmaktadır. Fakat 1, 2, 3 ve 4. katmanlara göre daha geniş bölgeye yayılmıştır. 7, 8, 9 ve 10. katmanların hasarını incelediğimizde; üst plakada hasarın matris ve delaminasyon modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta olduğunu ve yük arttıkça lif-matris ayrılması hasar modunun ortaya çıktığını görmekteyiz (Şekil

4.49-50). 7, 8, 9 ve 10. katmanların alt plakasının hasarı ise, 33.39 N da önceki katmanlarda olduğu gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarında meydana gelmektedir. 90° lik kompozit bindirme bağlantısında alt plakanın hasarlarına baktığımızda yapıştırıcıya yakın olan katmanların hasarının dıştaki katmanlara göre daha dar bir bölgede yayılmış oldukları görülmektedir. Sebebi alt plakanın alt yüzeyinin çekmeye maruz kalmasıdır. Ayrıca üst plakanın alt yüzeyinin çekmeye maruz kalmasından dolayı üst plakada alt yüzeyde bulunan yapıştırıcıya yakın olan katmanların özellikle 1. ve 2. katmanların hasarı dıştaki katmanların hasarından daha geniştir.



Şekil 4-49 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7. ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



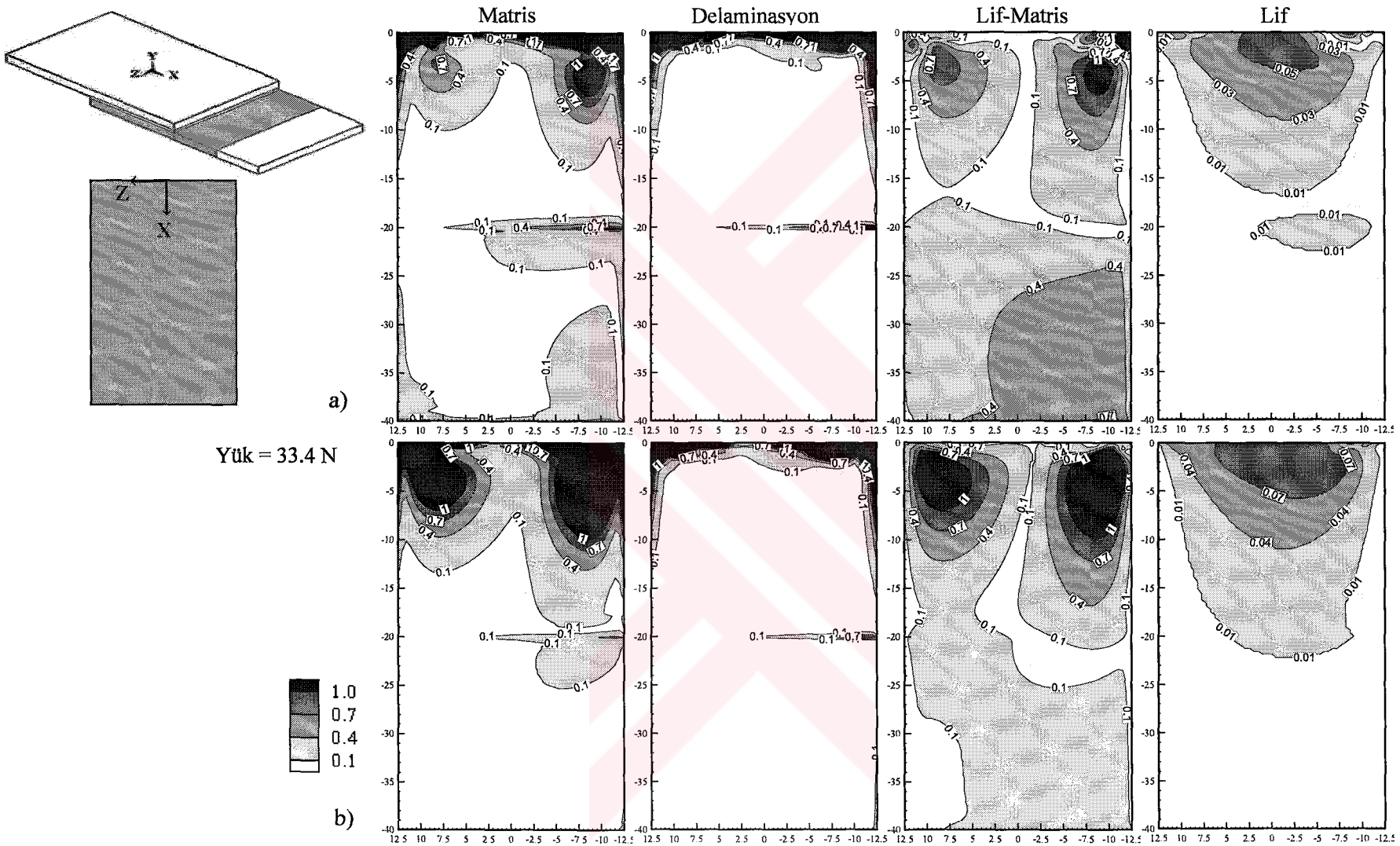
Şekil 4-50 Üç nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9. ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği hasarlar Hashin kriterinin tahmin ettiklerinden daha geniştir. Bununla birlikte Hashin kriteri alt plakada hasar tahmin ederken Tsai-Wu kriteri alt plakada hasar tahmin etmemektedir (Şekil 3-18). Bu iki durumdan anlaşılan Hashin kriteri alt plakada hasar tahmin ederek üst plakadan alt plakaya yük taşındığını ortaya koymakta ve böylece Hashin kriterinin üst plakada tahmin ettiği hasar alt plakaya yük taşınmasından dolayı Tsai-Wu'nun tahmininden daha dar bölgede yayılmaktadır.

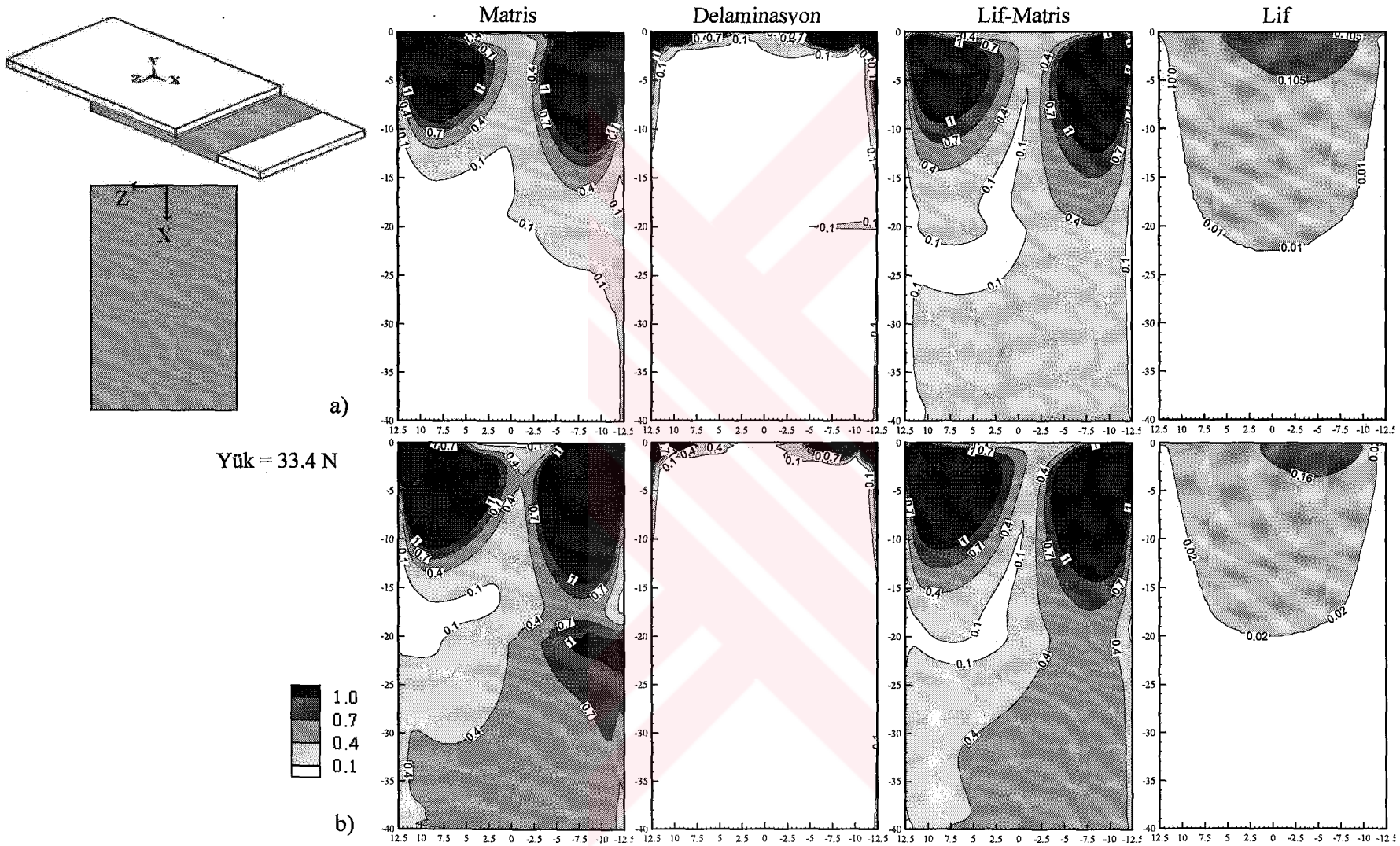
Şekil 4.51-55 üç nokta eğme yükü altında 90° lik kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 33.39 N da Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımı gösterilmektedir. Bu şekillerde alt plakanın Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımına baktığımızda hasarların matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarında plakanın uç kısmında oluştuğu ve dıştaki katmanlara doğru gittikçe hasarın bindirme bölgesinin içine doğru genişlediğini görmekteyiz. Alt plakanın alt yüzeyinin çekmeye maruz kalmasından dolayı dıştaki katmanların hasarının yapıştırıcıya yakın katmanların hasarından daha geniş bölgeye yayılmış olduğu Hashin hasar indeks değerlerinin şekillerinden de

görülmektedir. Üst plakada ise matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modları oluşmaktadır. Üst plakanın alt yüzeyinin çekmeye maruz kalmasından ve yapıştırıcı serbest ucundaki gerilme yığılmalarından dolayı üst plakada alt yüzeyde bulunan yapıştırıcıya yakın olan katmanların hasarı dıştaki katmanların hasarından daha geniş bölgeye yayılmış durumdadır. Çekme yükü altında 90° lik kompozit bindirme bağlantısında lif-matris ayrılması ve matris hasar modları delaminasyona göre daha baskın iken üç nokta eğme yükü altında 90° lik kompozit bindirme bağlantısında lif-matris ayrılması hasar modu çok baskın görünmemektedir. Çekme yükünde uygulanan yük liflere dik konumda olduğu için matrisi liften ayırmaya çalışmakta idi fakat üç nokta eğme yükünde böyle bir durum söz konusu değildir.

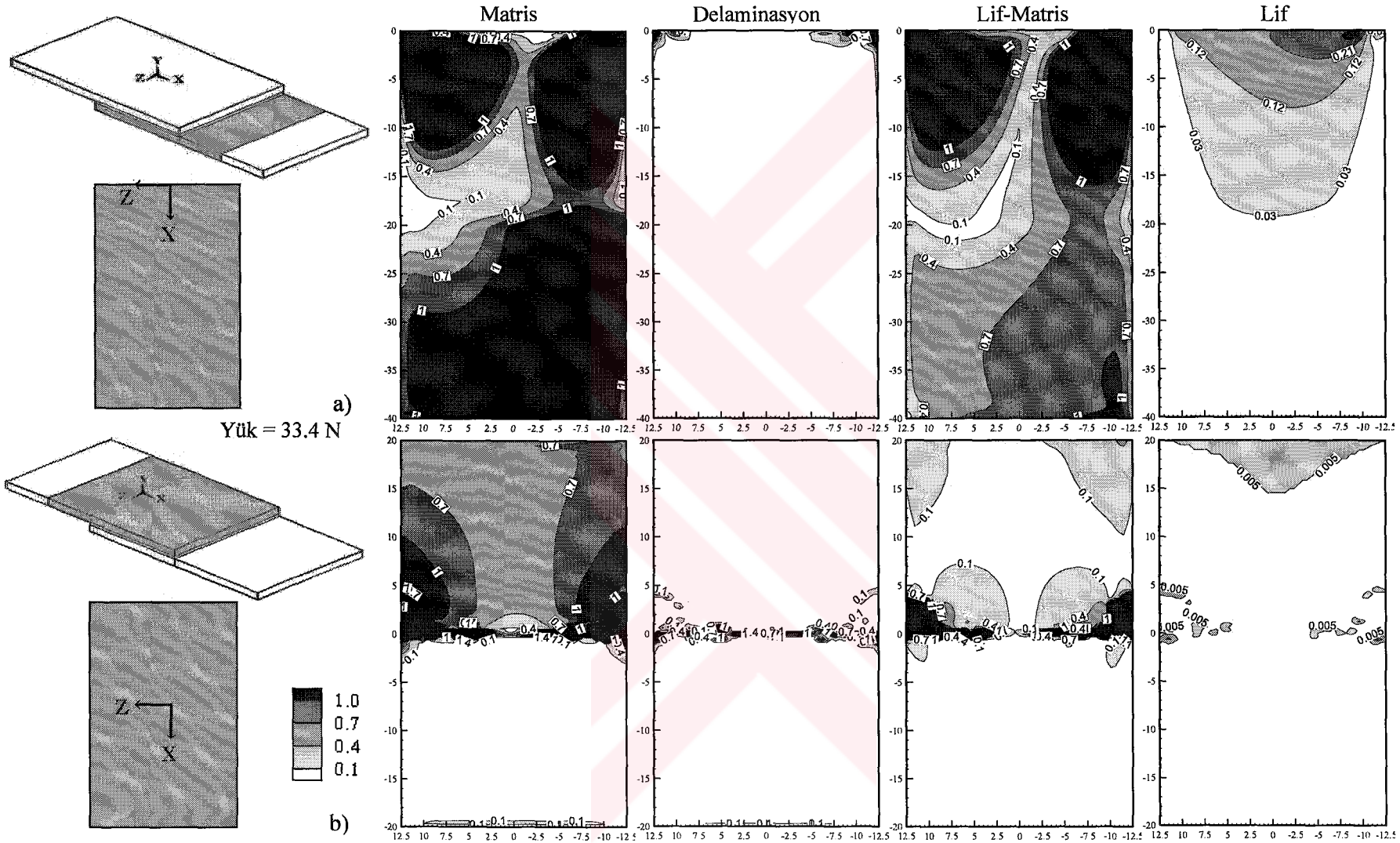
Üç nokta eğme yükü altında 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hasarının genel olarak bindirme bölgesinde yayıldığı daha önce belirtilmişti. Fakat 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantılarında hasar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda yayılmıştır. Bunun sebebi, 0° lik kompozit bindirme bağlantısı daha dayanıklı olduğu için eğme yükünden yapıştırıcı daha fazla etkilenmektedir ve yapıştırıcı hızlı bir şekilde zayıflamaktadır. Yapıştırıcının zayıflamasından dolayı da bindirme bölgesinde plakaya yük aktarılmaktadır ve böylece bindirme bölgesinde plakanın hasarları daha fazla bölgeye yayılmaktadır. Oysa 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantıları daha dayanıksız olduğu için yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmaları plakaları bu kısımlardan zayıflatmakta ve kopmasına neden olmaktadır. Ayrıca 45° lik kompozit bindirme bağlantısının üç nokta eğme yükü altında oluşan hasarları 0 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantılarının hasarlarına göre daha dar bir bölgede yayılmıştır. 45° lik kompozit bindirme bağlantısı 45° lik lif yönlenmesinden dolayı kayma gerilmelerine daha fazla dayanabilmektedir. Fakat genel olarak 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantılarının dayanımı düşük olduğu için aniden kopmaktadır. Bu nedenle hasar yayılmadan 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantıları kopmaktadır. Bununla birlikte, 0° lik kompozit bindirme bağlantılarında yapıştırıcıya yakın olan katmanlardan dışa doğru gittikçe yani yapışanın ortasından sonraki katmanlarda hasar yükün uygulandığı noktada oluşuyor. Bunun sebebi plaka doğrultusuna paralel olan 0° yönlü liflerin eğme durumunda doğrudan kayma gerilmelerine maruz kalmalarıdır.



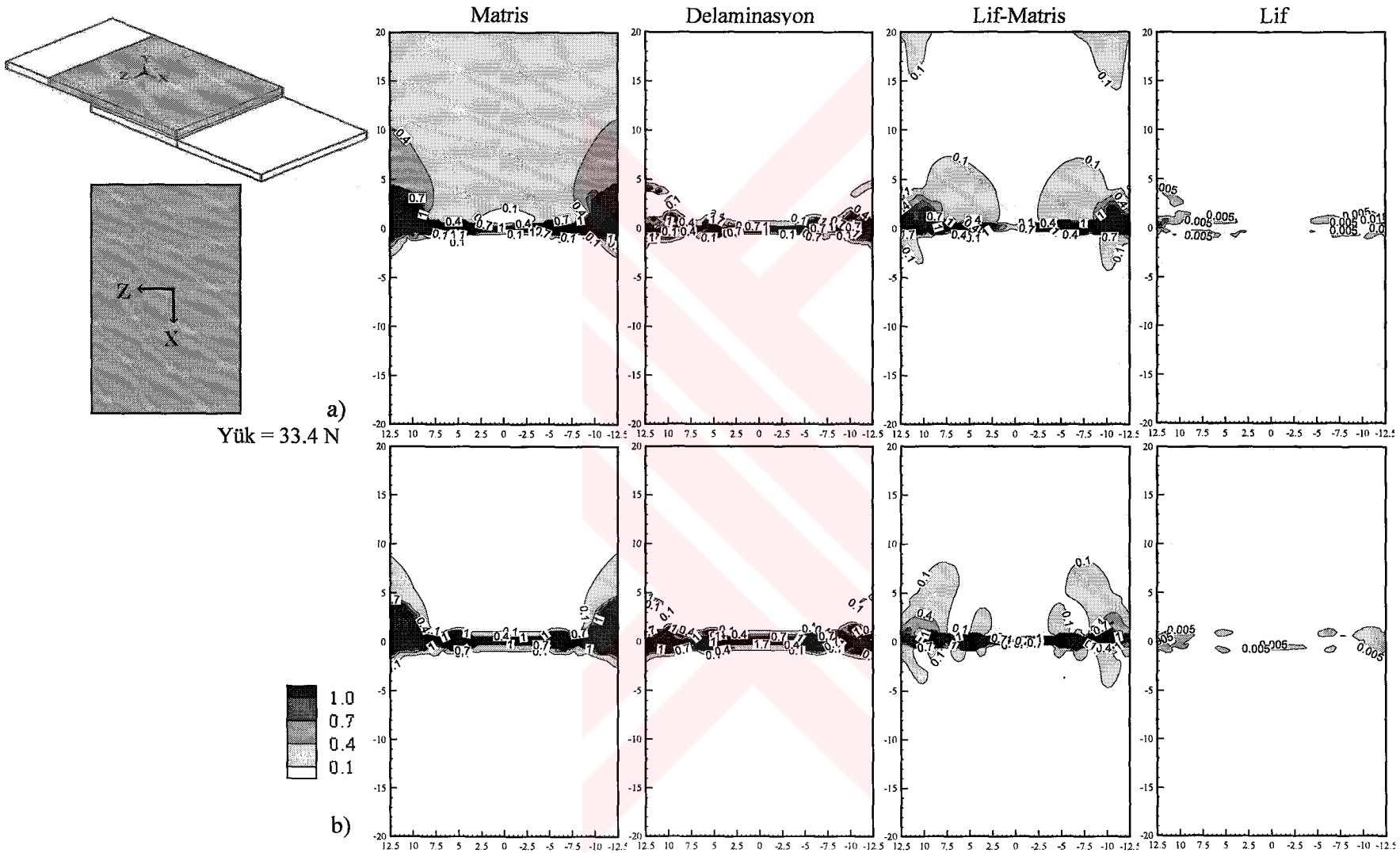
Şekil 4-51 Üç nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



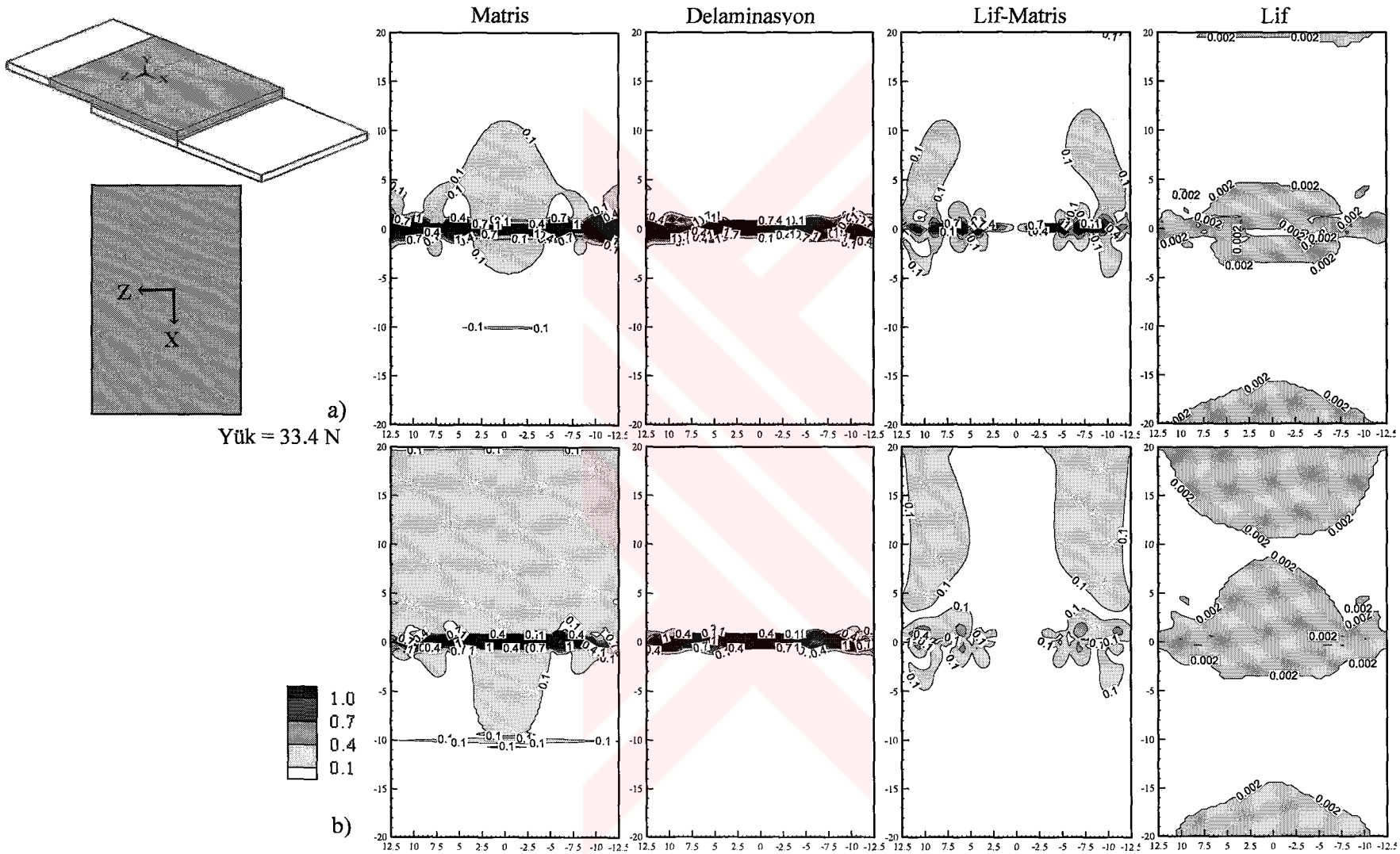
Şekil 4-52 Üç nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



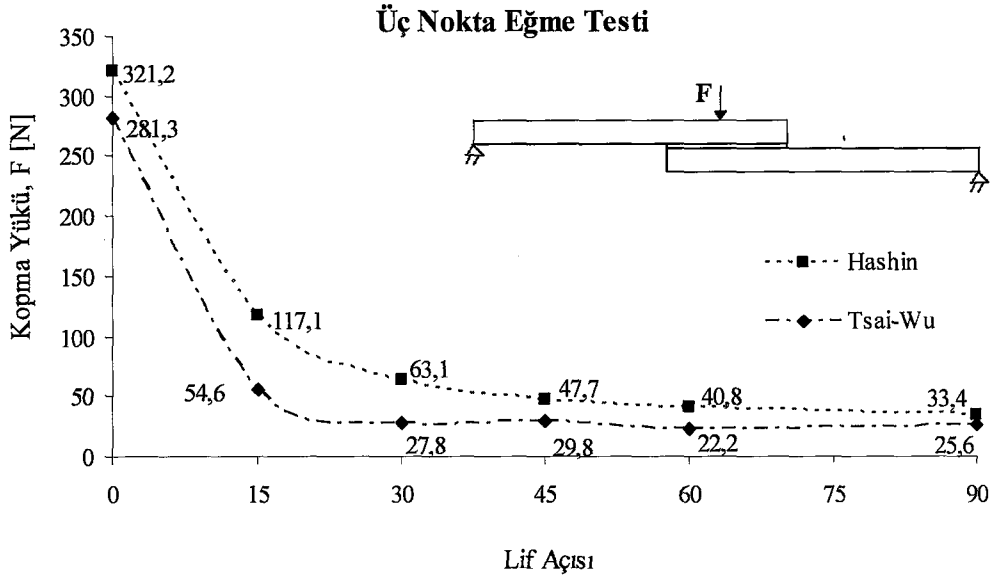
Şekil 4-53 Üç nokta eğme durumunda 90° lik a) alt plakanın 9 ve 10. b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-54 Üç nokta eğme durumunda 90° lik üst plakanın a) 3 ve 4. b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-55 Üç nokta eğme durumunda 90° lik üst plakanın a) 7 ve 8. b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri

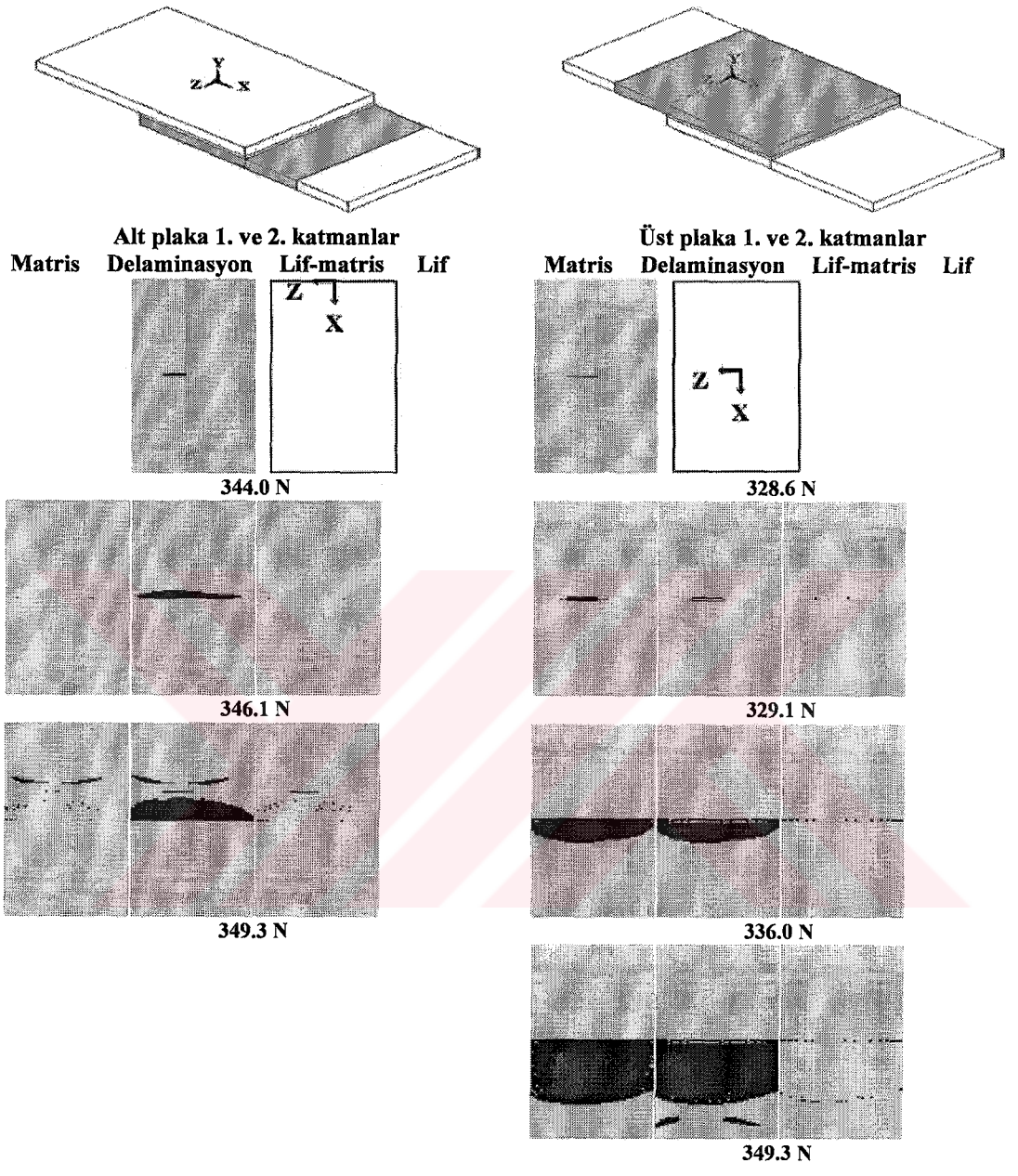


Şekil 4-56 Üç nokta eğme durumunda kompozit bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi

Şekil 4-56 üç nokta eğme yükü altında kompozit bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yüklerini göstermektedir. Bu grafiği incelediğimizde, lif açısı büyüdükçe Hashin ve Tsai-Wu hasar kriterlerine göre kompozit bindirme bağlantılarının üç nokta eğme yüküne karşı dayanımının azaldığı görülmektedir. Bindirme bağlantılarının kopma yüklerinin lif açısına göre değişim grafiği ile E_1 elastik modülünün açıya göre değişim grafiği ile aynı tarzdadır (Şekil 3-14) Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının üç nokta eğme testine dayanımı çekme testinde olduğu gibi bindirme bağlantısının kompozit plakalarının lif yönelim açısının değişimi ile doğrudan ilişkilidir.

4.3.3 Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Yönlü Kompozit Bindirme Bağlantıları

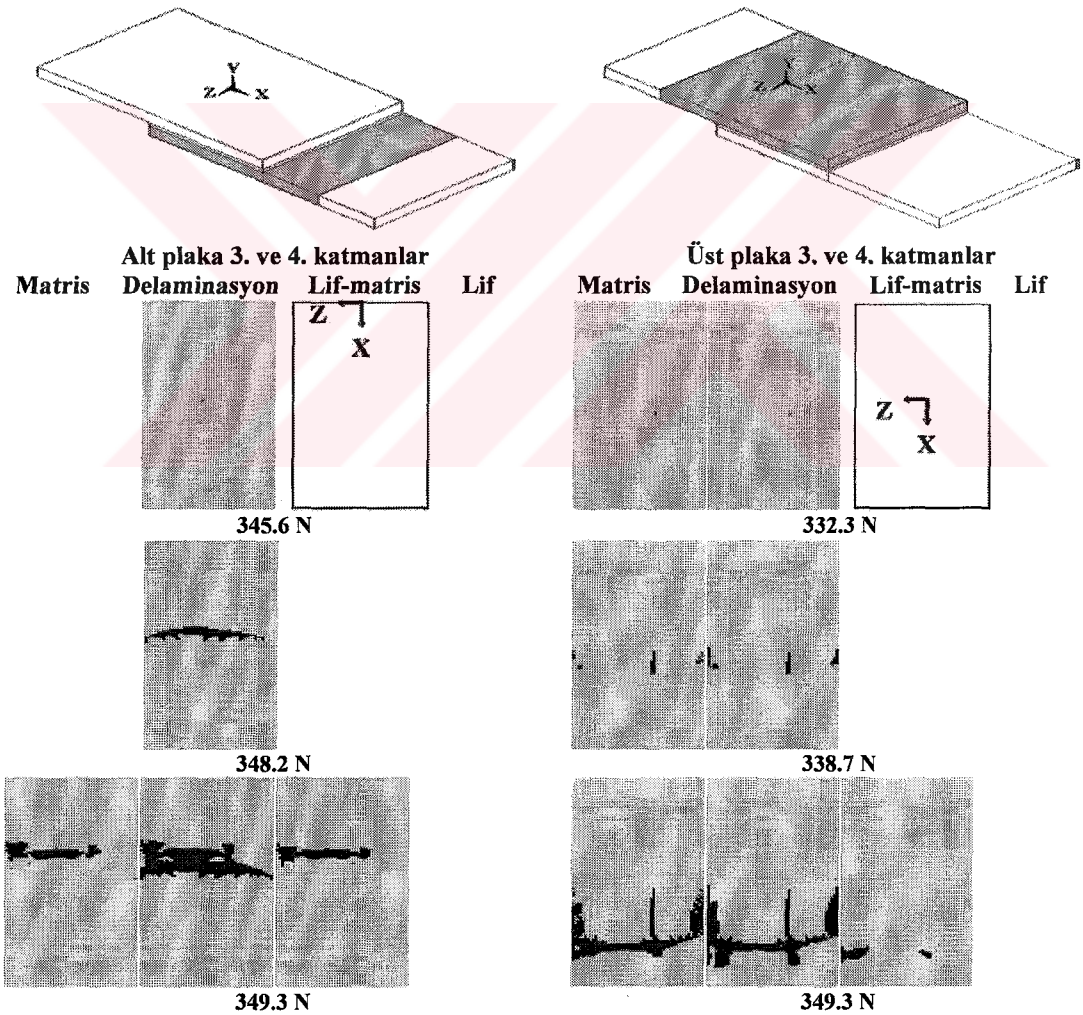
Tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarının dört nokta eğme testi için yükleme ve sınır şartları Şekil 3-14' de verilmiştir. Hashin kriterine göre Tsai-Wu kriterinde olduğu gibi 0-90° lif açılarında tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarının analizleri yapıldı ve sadece 0, 45 ve 90° lif açılı kompozit bindirme bağlantılarına ait hasarlar tezde irdelenecektir.



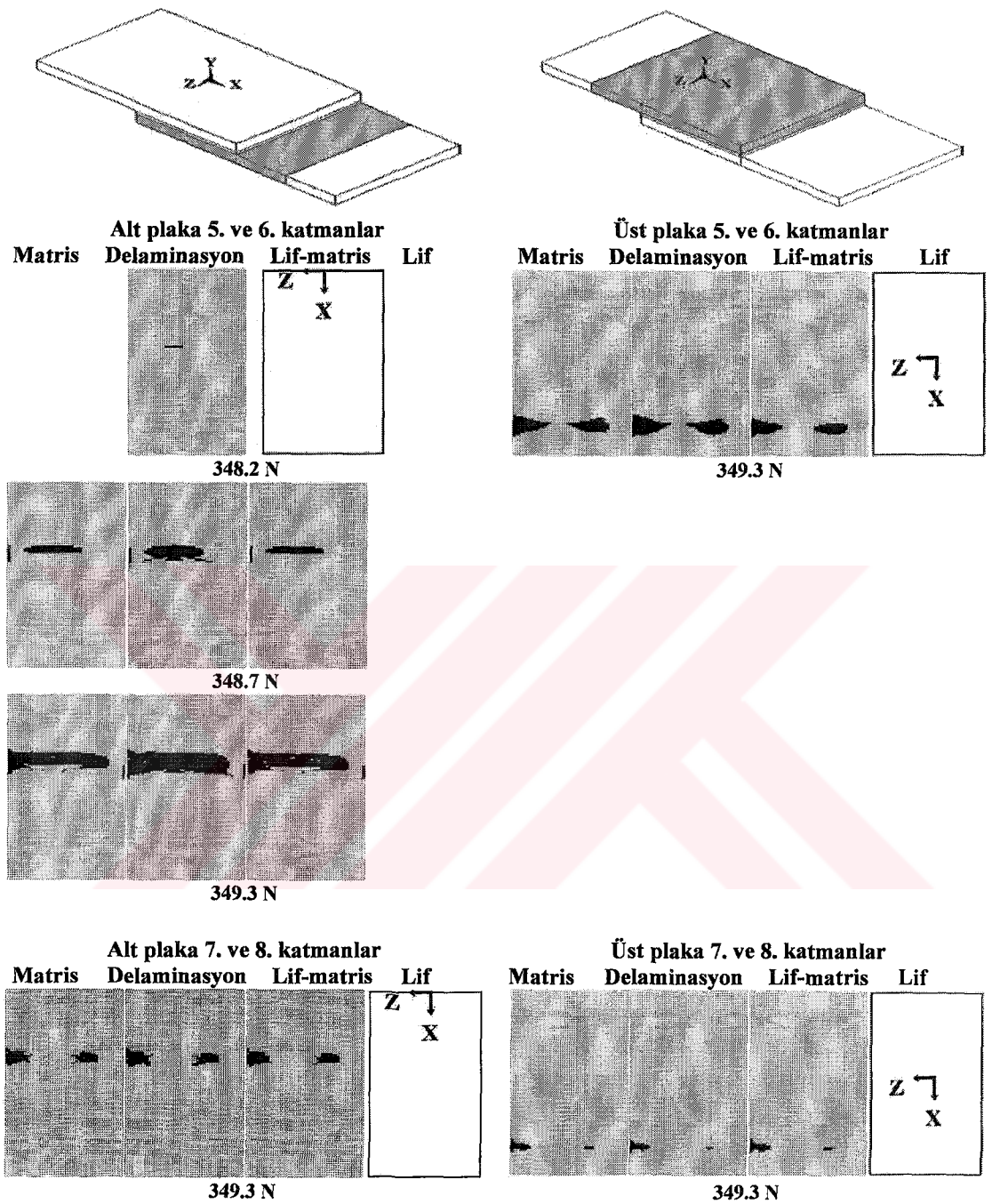
Şekil 4-57 Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1. ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

0° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altında ilk hasarı 328.6 N da üst plakanın yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 numaralı katmanlarında matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlamaktadır (Şekil 4-57). Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği hasarın üst plakada 1 ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında

337.61 N da başladığı ve 338.14 N da bağlantının koptuğu daha önceki bölümde belirtilmişti (Şekil 3-26). Oluşan hasar matriste ilerlerken 329.1 N da delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır ve bu katmanlar 349.3 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında tamamen kopar. Üst plakada 1. ve 2. katmanlarda hasar yayılırken, 344 N da alt plakanın 1. ve 2. katmanlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda delaminasyon modunda hasar ortaya çıkmaktadır ve bindirme bölgesinin içine doğru hasar ilerlemektedir. Delaminasyon hasar modunun yanında matris ve lif-matris ayrılması hasar modları ortaya çıkmaktadır. Fakat matris ve lif-matris ayrılması hasar modları delaminasyon moduna göre daha dar bir bölgede yayılmıştır.



Şekil 4-58 Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3. ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



Şekil 4-59 Dört nokta eğme yükü altında 0° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5, 6, 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

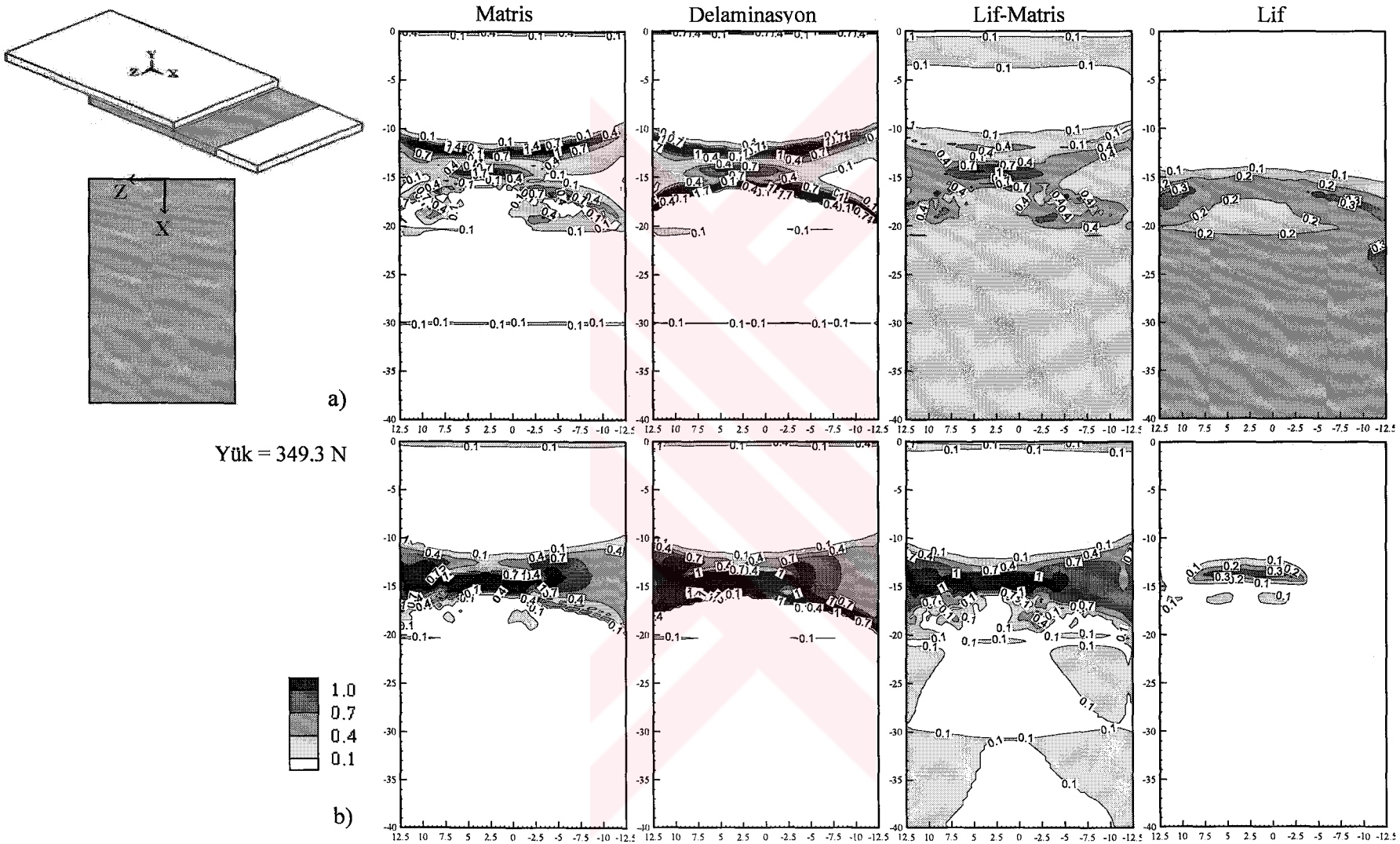
Üst plakanın 3. ve 4. katmanlarında; hasar 332.3 N da matris ve delaminasyon hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlamaktadır (Şekil 4-58). Yük artmaya devam ederken 349.3 N da lif-matris ayrılması hasar modu bindirme bölgesinin ortasında oluşmaktadır. Alt plakanın 3. ve 4. katmanlarında ise 345.6 N da delaminasyon hasar modunda yapıştırıcı serbest ucu bölgesinde hasar başlamakta ve bu iki katman son kopma yükü olan 349.3 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarından kopmaktadır.

5, 6, 7 ve 8. katmanların hasar oluşum ve gelişimleri için Şekil 4-59'a baktığımızda; üst plakada bu katmanlarda hasar son kopma yükü olan 349.3 N da bindirme bölgesinin orta kısmında oluşmaktadır. Alt plaka ise 7. ve 8. katmanlarda hasar son kopma yükü 349.3 N da bindirme bölgesinin orta kısmında oluşmakta iken 5. ve 6. katmanların ilk hasarı 348.2 N da delaminasyon hasar modunda yapıştırıcı serbest ucu civarında görülmektedir. 348.7 N da matris ve lif-matris ayrılması hasar modları yapıştırıcı serbest ucun civarında oluşmaktadır ve son kopma yükünde matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarında hasar iyice yayılmaktadır. Genel olarak, 0° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yüküne maruz kalması durumunda alt ve üst plakalarda oluşan hasarlar birbirinin devamı şeklindedir. Yani 1. ve 2. katmanlarda hasar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlayıp bindirme bölgesinin içine doğru ilerlerken devamı olan 3. ve 4. katmanlarda hasar yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımda başlayıp bindirme bölgesinde 1. ve 2. katmanların hasarının bittiği kısımda yayılmaktadır. Dıştaki katmanlara doğru ilerledikçe hasarlar uç kısımlara doğru yayılmış şekilde ortaya çıkmaktadır. Fakat dıştaki katmanlarda yapıştırıcıya yakın olan katmanlardan daha az hasarlar oluşmaktadır. Bu durumdan yapıştırıcıya yakın olan katmanlara yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmalarının etkisi görülmektedir.

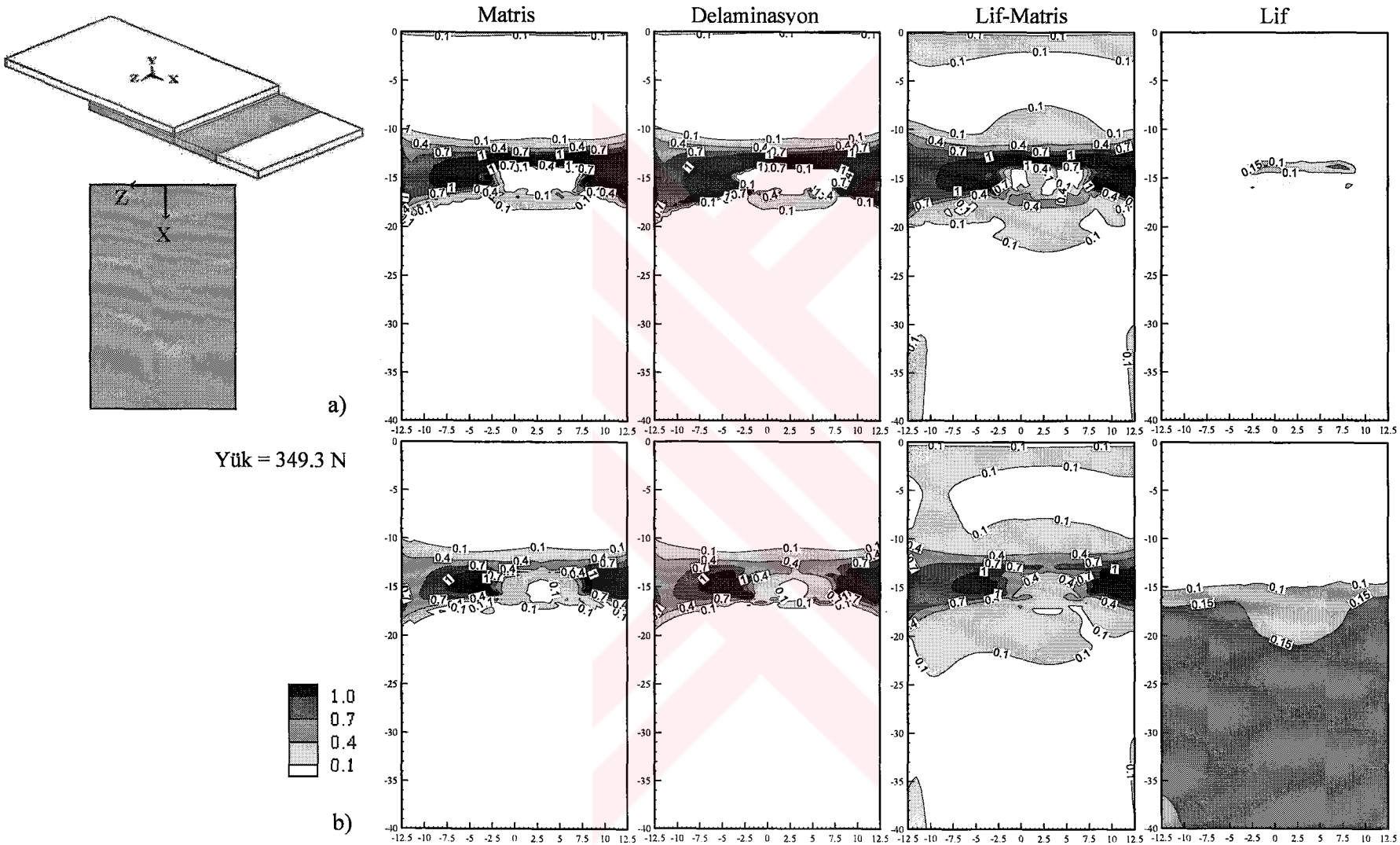
Görüldüğü gibi 0° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yüküne maruz kalması durumunda, Tsai-Wu kırılma kriteri Hashin kriterine göre hasarı erken tahmin etmektedir, fakat kopma yükü Hashin kriterinin tahmin ettiği kopma yükünden daha küçüktür. Ayrıca iki kriterde hasar mekanizması gelişimi biraz farklıdır. Üst plakanın 1 ve 2 numaralı katmanlarında Hashin hasarın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda başladıktan sonra bindirme bölgesinin içine doğru yayıldığını tahmin ederken Tsai-Wu kırılma kriteri yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda başladıktan sonra

plakanın serbest kısmına doğru ilerlediğini tahmin etmektedir. 0° lik kompozit bindirme bağlantısının dayanımında lif yönlenmesinin etkisini göz önüne alacak olursak lifler dört nokta eğme yükü karşında matrise göre daha dayanıklı olduğu için yük, matrisi ve matrisle aynı niteliğe sahip epoksi yapıştırıcıyı zorlamaktadır. Yapıştırıcı yükün etkisi ile zayıflamaktadır ve bu nedenle plakaların hasarı yapıştırıcıya yakın katmanlarda bindirme bölgesine doğru yayılmaktadır. Bu durumda Hashin kriterinin tahmin ettiği hasarların gerçeğe daha yakın olduğu görülmektedir.

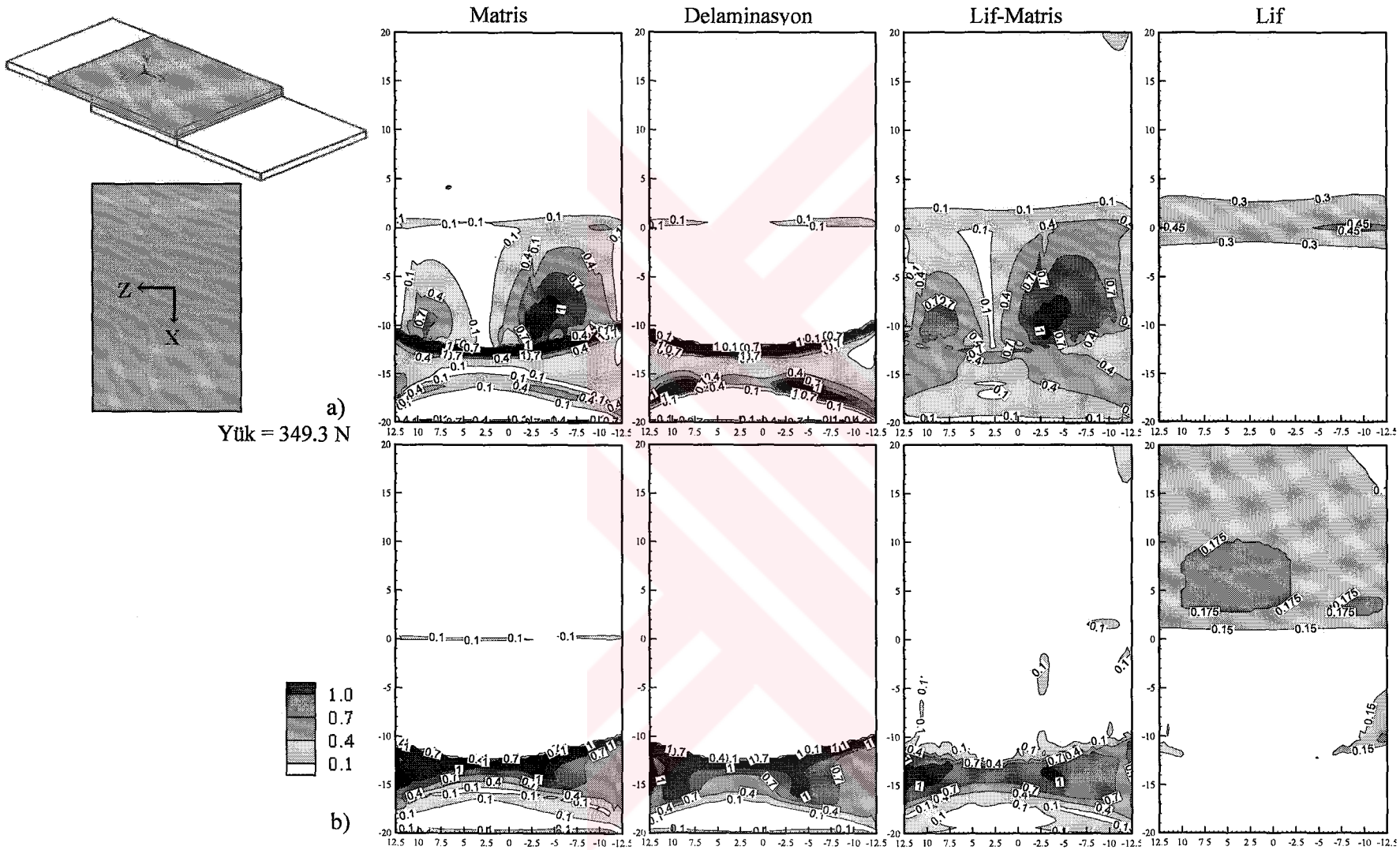
Şekil 4.60-63'de 349.3 N da 0° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altında hasar olan bütün katmanlarında Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımı görülmektedir. Bu şekillerde 1'den büyük değerlere sahip elemanların olduğu yerler hasarlı bölgelerdir. Hasarlı bölgelerin malzeme özellikleri sıfıra yakın değerlere sahiptir. Bu nedenle buradaki elemanlar yükü taşıyamayacağı için hasarlı bölgelerin yakınında 1'e yakın değerlere sahip elemanlara doğru yük aktarılmaktadır. Yük arttıkça da bu elemanlardan hasar hızla yayılacaktır. Alt plakanın Hashin hasar indekslerinde 349.3 N da ilk 8 katmanda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında 1'i aşan değerlere sahip bölgeler mevcuttur. Üst plakada aynı şekilde ilk 8 katmanda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında 1'i aşan değerlere sahip bölgeler mevcuttur. 0° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü ile üç nokta eğme yükü altında hasar davranışını kıyaslayacak olursak, üç nokta eğme yükü altında 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hasarı daha fazla yayılmaktadır ve bağlantı daha küçük yükte kopmaktadır. Oysaki dört nokta eğme yüküne bağlantı daha fazla dayanmaktadır. Sebebi, bölüm 3 de Şekil 3-30 ve 31'de verilen kesme kuvveti ve eğilme momenti diyagramlarından görüldüğü gibi üç nokta eğme testinde bindirme (yapışma) bölgesinde kesme kuvveti sabit ve eğilme momenti en yüksek değerine ulaşırken dört nokta eğme testinde kesme kuvveti sıfır ve eğilme momenti sabittir.



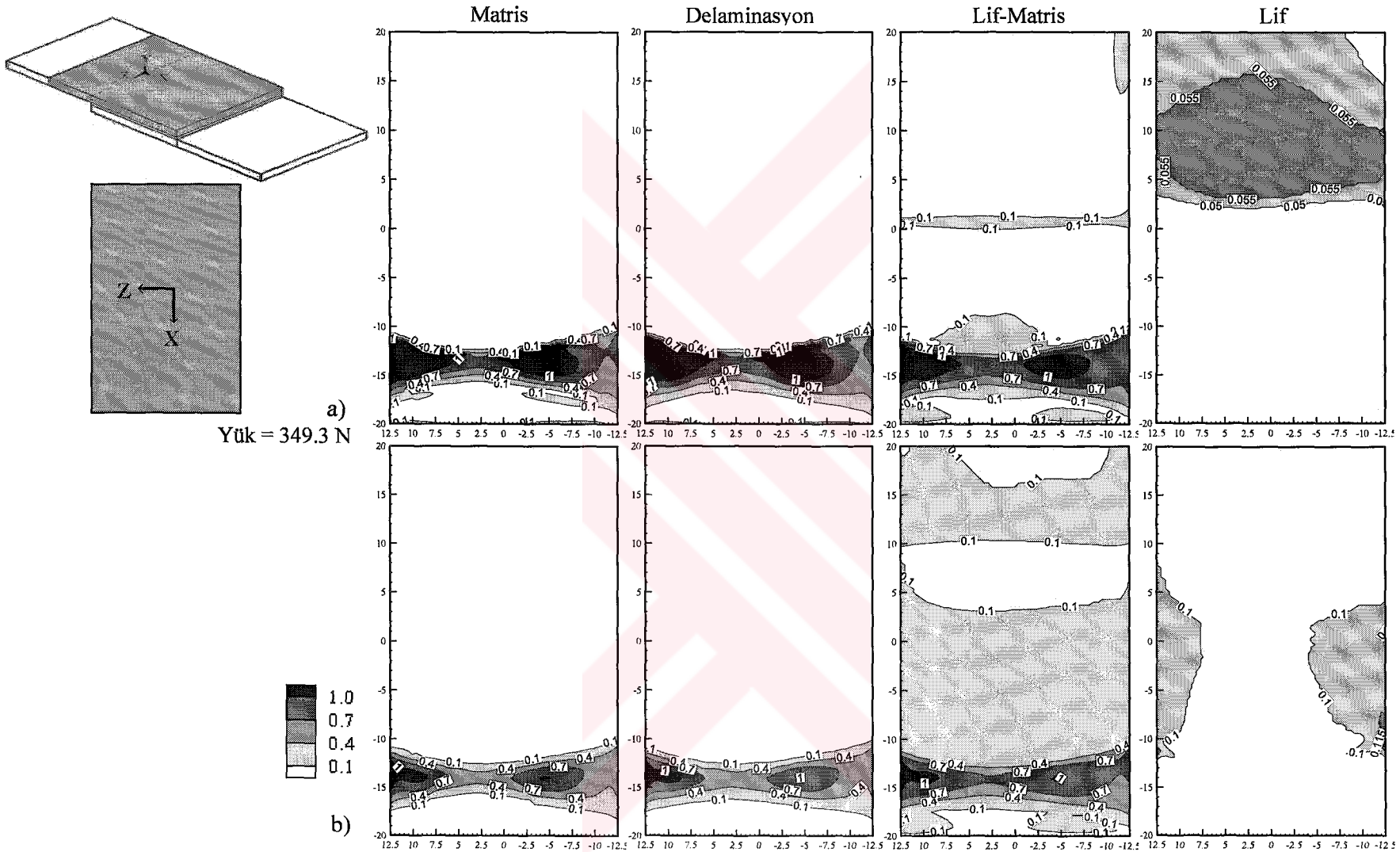
Şekil 4-60 Dört nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



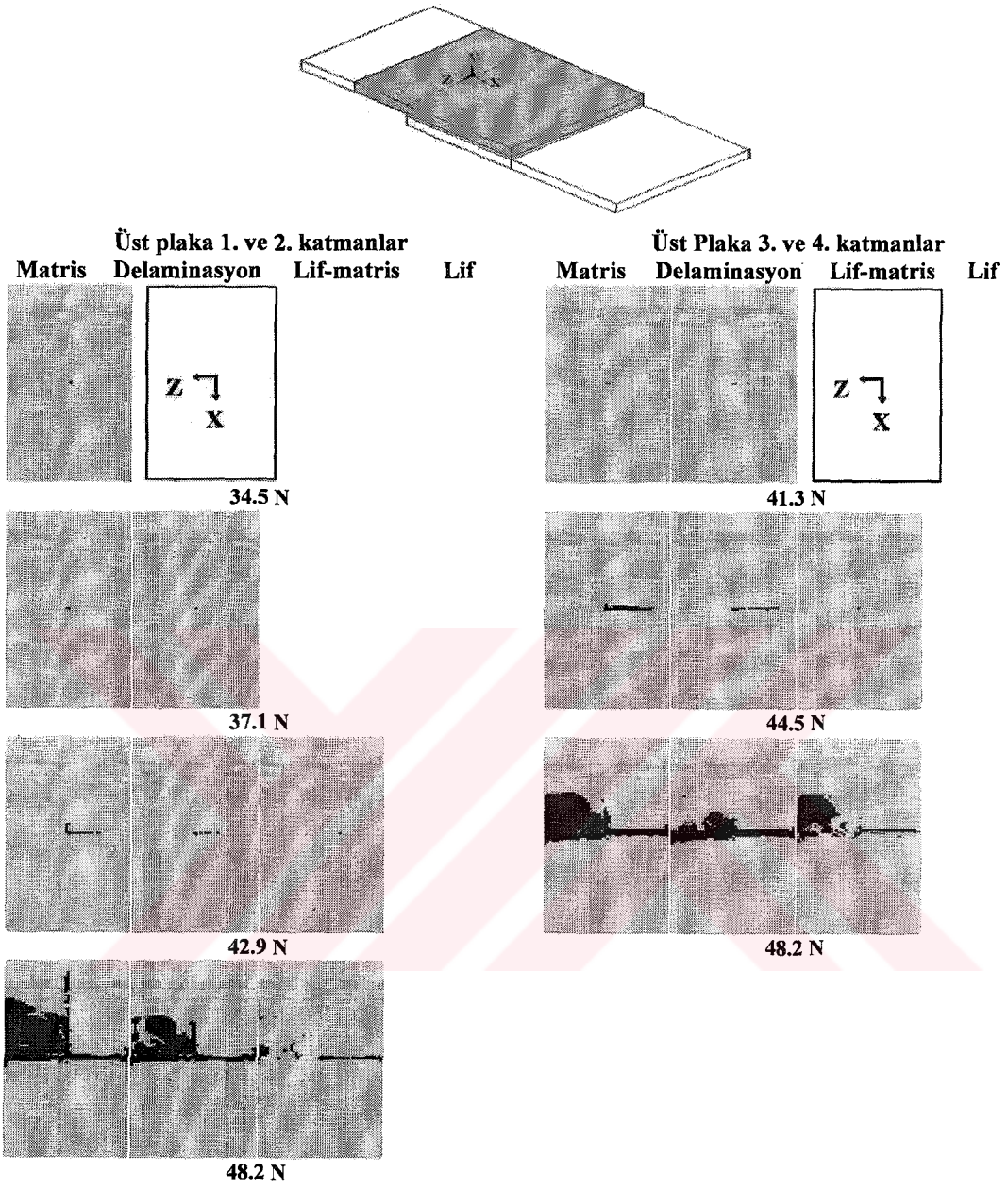
Şekil 4-61 Dört nokta eğme durumunda 0° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-62 Dört nokta eğme durumunda 0° lik üst plakanın a) 1 ve 2. b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



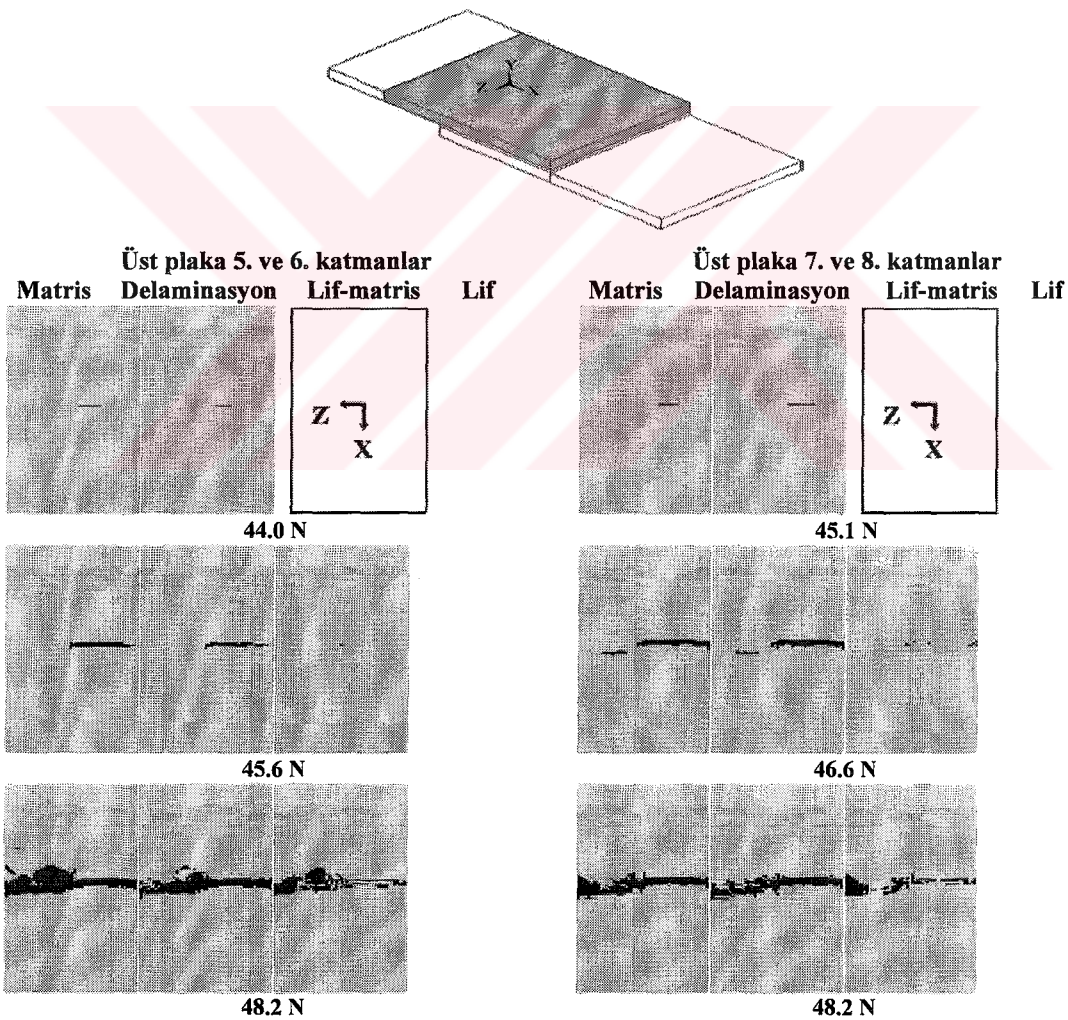
Şekil 4-63 Dört nokta eğme durumunda 0° lik üst plakanın a) 5 ve 6. b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-64 Dört nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında üst plakanın 1, 2, 3 ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

45° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altında Hashin kırılma kriterinin tahmin ettiği hasarlar için Şekil 4.64-66'ya baktığımızda Tsai-Wu kırılma kriterinin tahmin ettiği gibi alt plakada hiç hasar görülmemektedir (Şekil 3-27). Üst plakada ise ilk hasar 1 ve 2 numaralı katmanlarda matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamaktadır (Şekil 4-64). Tsai-Wu kırılma kriterinde ise hasar yine üst plakada yapıştırıcıya yakın olan 1.

ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamıştı. Fakat Hashin kriterinde 34.5 N da başlayan ilk hasar Tsai-Wu kriterinde daha düşük yükte, 26.5 N da görülmüştü. İki kriterinde tahmin ettiği hasarlarda özellikle Hashin de matris hasar modunda yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısmın solunda biraz daha fazla hasar yayılması mevcuttur. Yani hasar matristen lif eksenine paralel şekilde gelişmektedir. Daha sonra 1. ve 2. katmanlarda 37.1 N da delaminasyon hasar modu, 42.9 N da da lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır ve hasarlar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda yayılmaktadır. Bu katmanlar 48.2 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında tamamen kopar.

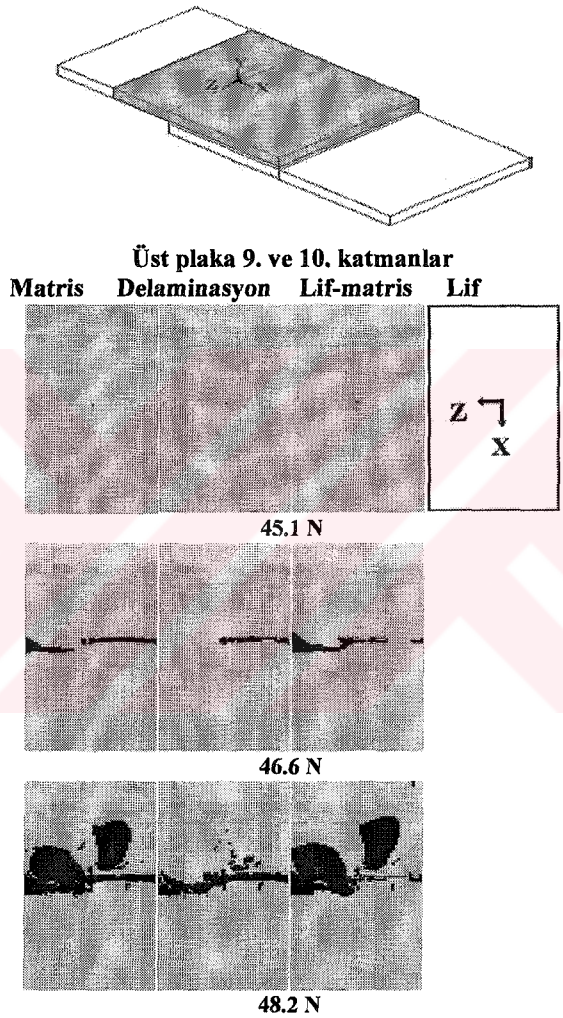


Şekil 4-65 Dört nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında üst plakanın 5, 6, 7 ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

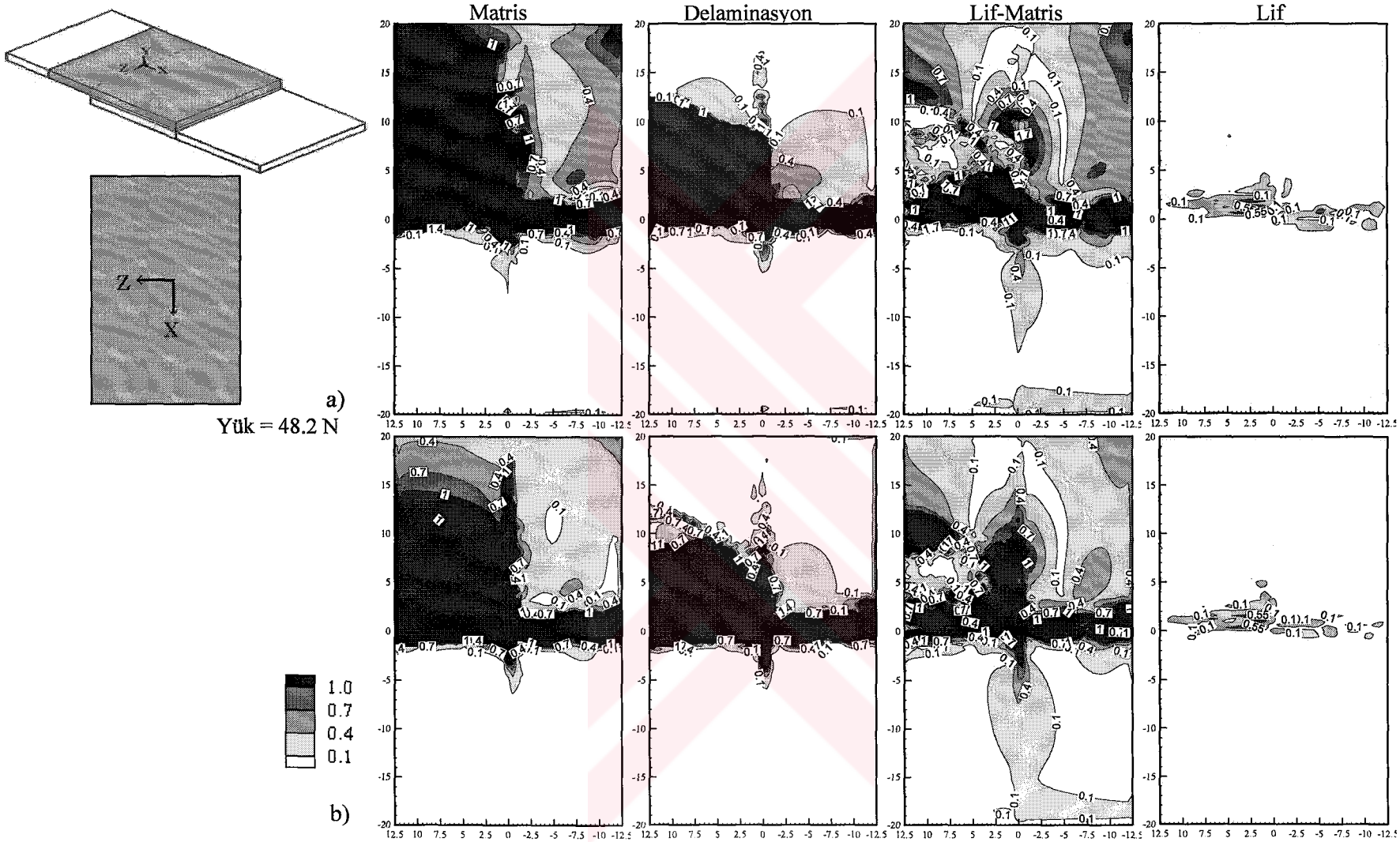
Üst plakada 3. ve 4. katmanlarda hasar matris ve delaminasyon hasar modlarında 41.3 N da yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlamaktadır ve 44.5 N da lif-matris ayrılması hasar modu ortaya çıkarak 48.2 N da bu katmanlar matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında kopmaktadır (Şekil 4-64). Üst plaka 1. ve 2. katmanlarda olduğu gibi matris hasar modunda yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısmın solunda lif eksenine paralel şekilde gelişmektedir. 5. ve 6. katmanlarda ise hasar 44 N da, 7. ve 8. katmanlarda ise 45.1 N da matris ve delaminasyon modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlamakta ve sonrada yük artışıyla birlikte lif-matris ayrılması hasar modu ortaya çıkarak 48.2 N da bu katmanlar matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında kopmaktadır (Şekil 4-65). 9. ve 10. katmanlarda 45.1 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında hasar başlamakta ve yük artışıyla bu bölgede yayılarak 48.2 N da kopmaktadır (Şekil 4-66).

Şekil 4.67-69, 45° lik kompozit bindirme bağlantısının 48.2 N da üst plakanın tüm katmanlarının Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımını göstermektedir. Üst plakada matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında 1'i aşan değerler mevcutken lif kopması hasar modunda 1'i aşan değerler mevcut değildir. Ayrıca yapıştırıcıya yakın olan katmanların hasarları yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmalarından dolayı dıştaki katmanlara göre daha fazladır. Sadece 9. ve 10. katmanların hasarı 1. ve 2. katmanlarınki gibi geniş bölgeye yayılmış durumdadır. Bunun sebebi de üst plakada bu katmanların yükün olduğu yere yakın olmasıdır. 45° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme ile üç nokta eğme yükleri altında Hashin kırılma kriterinin tahmin ettiği hasarlar birbirine benzer tarzdadır. Aralarındaki fark sadece kopma yüklerindedir fakat fazlada bir fark bulunmamaktadır (Üç nokta eğmede 47.7 N, dört nokta eğmede 48.2 N). Üç nokta eğme testinde olduğu gibi dört nokta eğme testinde de 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hasarının genel olarak bindirme bölgesinde yayıldığını görmekteyiz. Fakat 45° lik kompozit bindirme bağlantısında hasar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ve bu bölgeden plakanın serbest olan kısmına doğru lif eksenine paralel şekilde yayılmıştır. Bunun sebebi, 0° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yüküne 45° lik bağlantıdan daha dayanıklı olmasıdır. 0° lik kompozit bindirme bağlantısı daha dayanıklı olduğu için eğme yükünden yapıştırıcı daha fazla etkilenmektedir ve

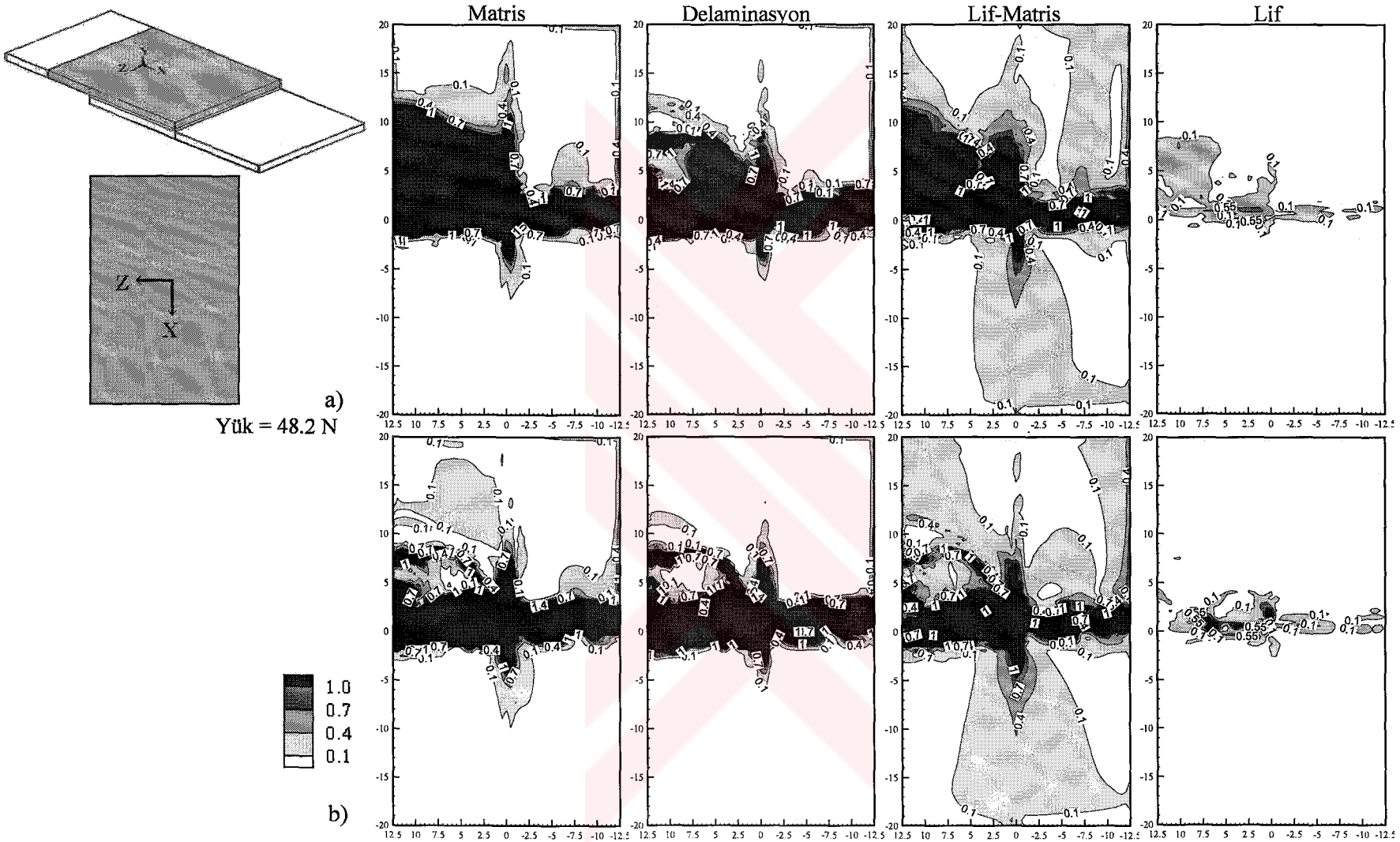
yapıştırıcı hızlı bir şekilde zayıflamaktadır. Yapıştırıcının zayıflamasından dolayı da bindirme bölgesinde plakaya yük aktarılmaktadır ve böylece bindirme bölgesinde plakanın hasarları daha fazla bölgeye yayılmaktadır. Oysa 45° lik kompozit bindirme bağlantısı daha dayanıksız olduğu için yapıştırıcı serbest uçlarındaki gerilme yığılmaları plakayı bu kısımlardan zayıflatmakta ve kopmasına neden olmaktadır.



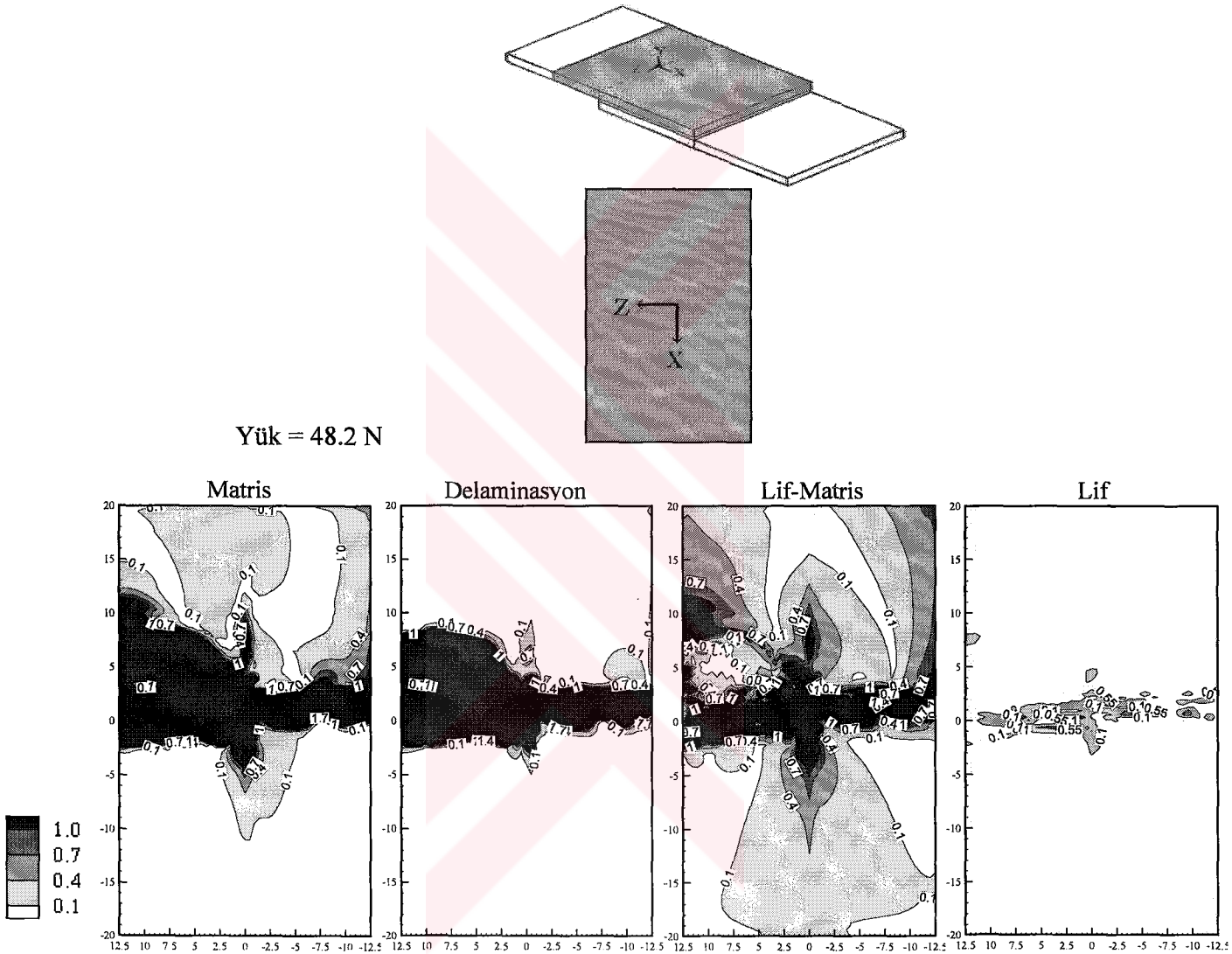
Şekil 4-66 Dört nokta eğme yükü altında 45° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında üst plakanın 9. ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi



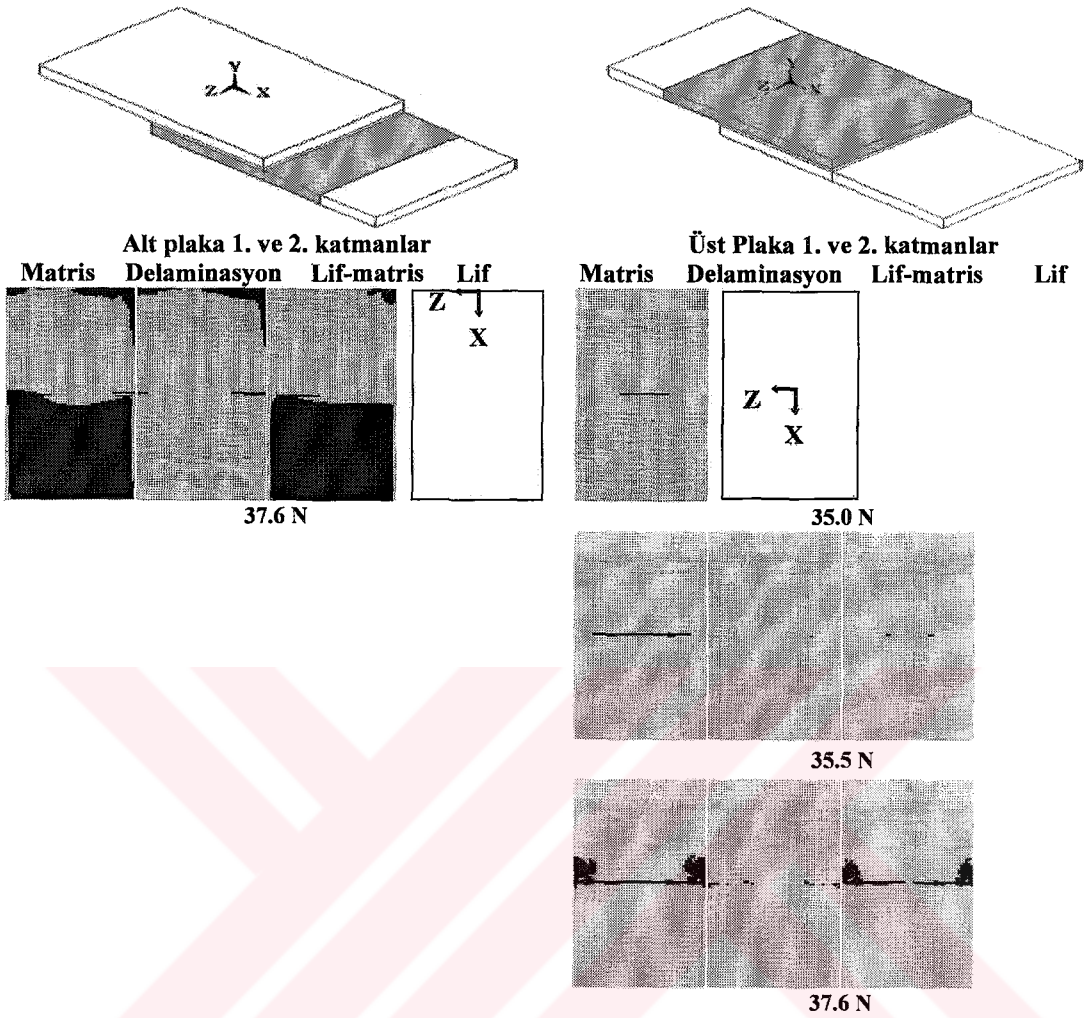
Şekil 4-67 Dört nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın a) 1 ve 2. b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-68 Dört nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın a) 5 ve 6. b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



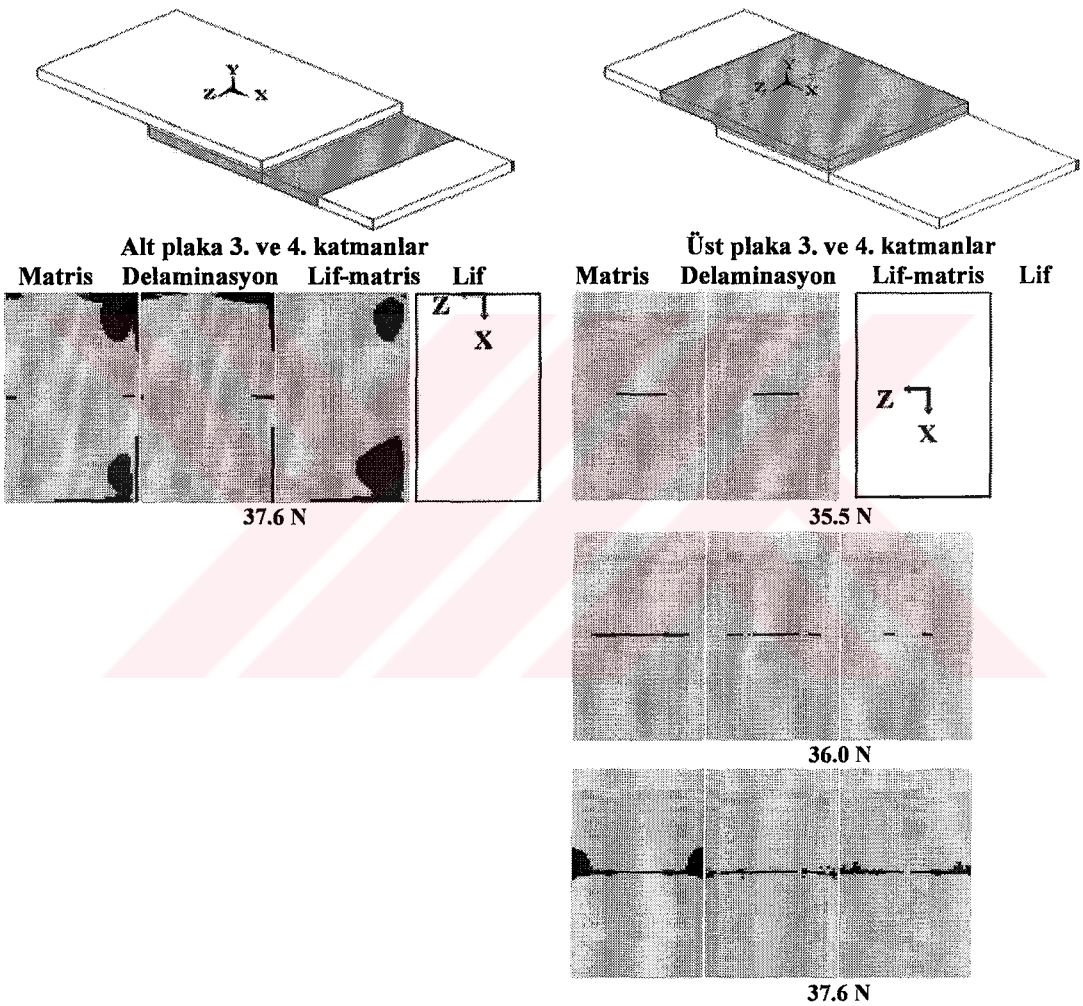
Şekil 4-69 Dört nokta eğme durumunda 45° lik üst plakanın 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri



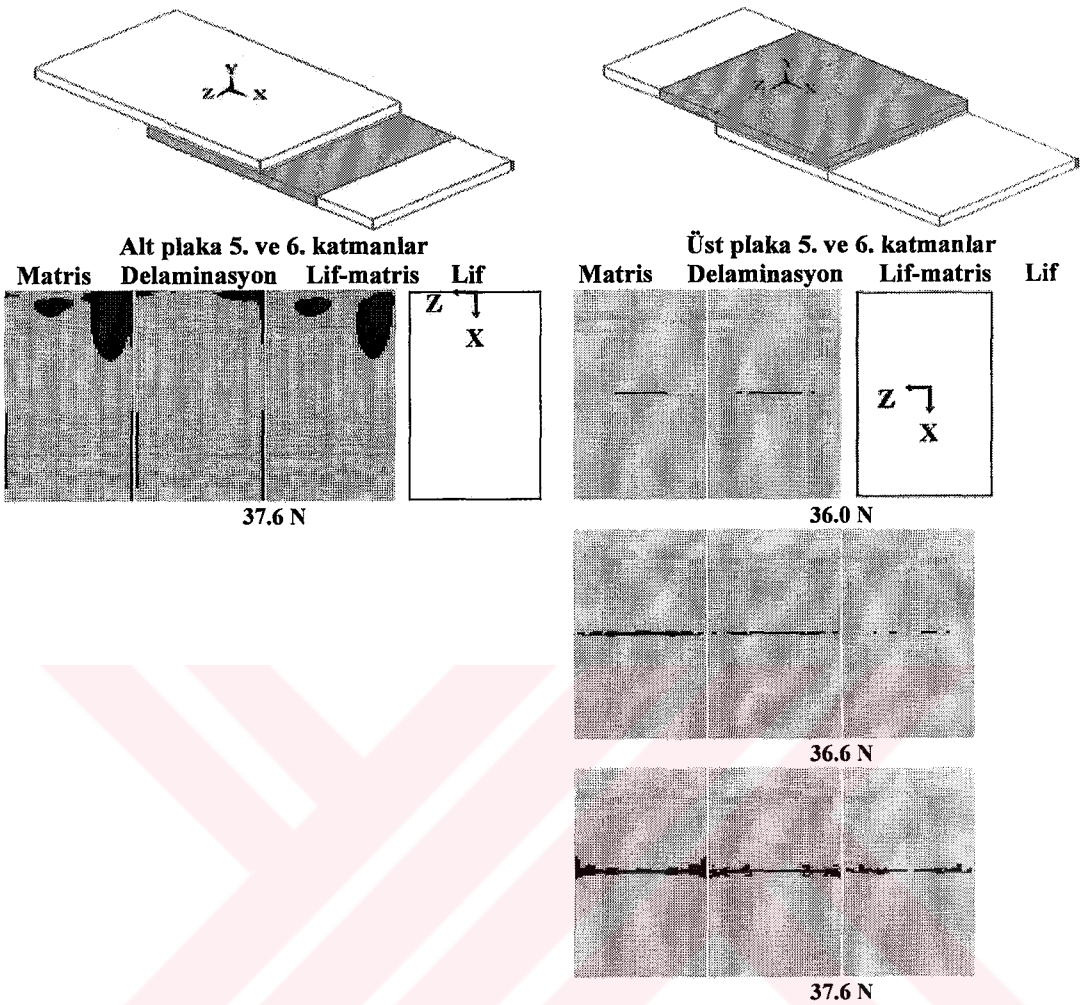
Şekil 4-70 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 1. ve 2. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

90° yönlü kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altında ilk hasarı 35 N da üst plakanın yapıştırıcıya yakın olan 1 ve 2 numaralı katmanlarında matris hasar modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlamaktadır (Şekil 4-70). Tsai-Wu kırılma kriterinin tahminine göre yine üst plakada yapıştırıcıya yakın olan 1. ve 2. katmanlarda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında 28.73 N da başladığı görülmektedir (Şekil 3-27). Hashin kriteri hasarı Tsai-Wu kriterine göre daha yüksek yüklerde tahmin ettiği bu lif açısına sahip kompozit bindirme bağlantısında da görülmektedir. Üst plakanın 1. ve 2. katmanlarında hasar matriste ilerlerken 35.5 N da delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modu yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ortaya çıkmaktadır. Bu

katmanlar 37.6 N da matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında tamamen koparken delaminasyon hasar modunun matris ve lif-matris ayrılması hasar modlarına göre daha az yayıldığı şekilden görülmektedir (Şekil 4-70). 90° lik kompozit bindirme bağlantısının dayanımı zayıf olduğu için yük matrisi daha fazla etkilemektedir ve bu nedenle matris ve lif-matris ayrılması hasar modları delaminasyon modundan daha fazla yayılmaktadır.



Şekil 4-71 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 3. ve 4. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

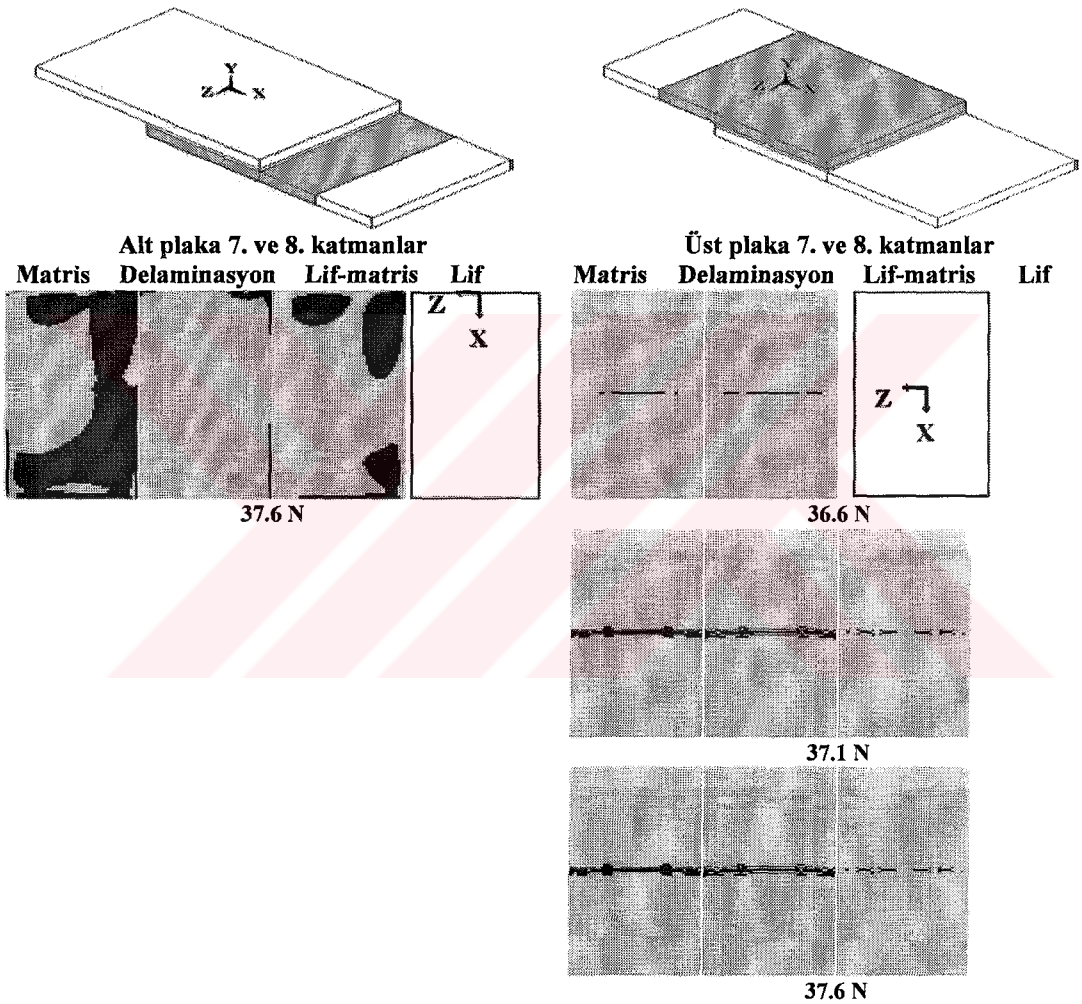


Şekil 4-72 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 5. ve 6. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

Üst plaka 1. ve 2. katmanlarında hasar ilerlerken, alt plakanın 1. ve 2. katmanlarda ise son kopma yükü olan 37.6 N da plakanın ucunda yani üst plaka serbest ucuna tekabül eden kısımda ve plakanın serbest tarafında matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında ortaya çıkmaktadır (Şekil 4-70).

3. ve 4. katmanların hasarı için Şekil 4-71'e baktığımızda; üst plakada 35.5 N da hasar, matris ve delaminasyon modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta ve yük arttıkça da lif-matris ayrılması hasar modu da ortaya çıkmaktadır. Hasarlar yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılmakta ve 37.6 N da katmanlar kopmaktadır. Alt plakaya baktığımızda, 37.6 N da uçta yani üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ve bindirme bölgesi haricindeki kısmın

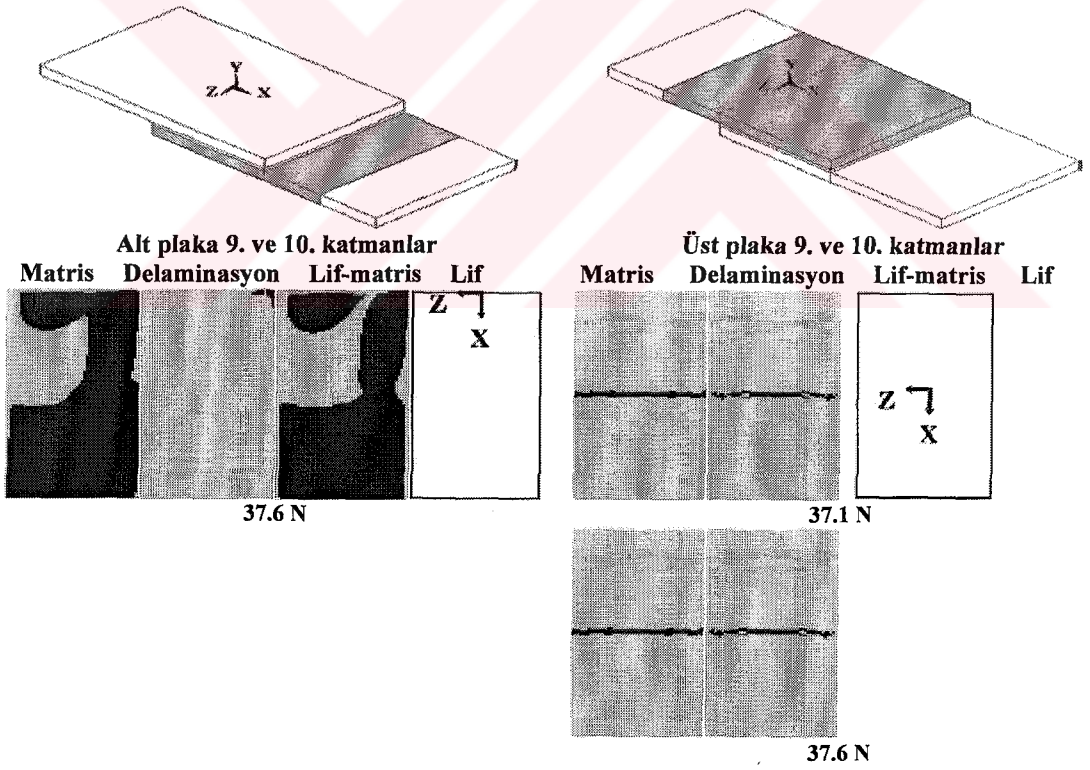
sağ yanında hasar oluşmaktadır. Şekil 4-72'yi incelediğimizde; üst plakada 5. ve 6. katmanlarda 36 N da hasar, matris ve delaminasyon modlarında yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmın ortasında başlamakta ve yük artışıyla lif-matris ayrılması hasar modu 36.6 N da meydana gelmektedir. Alt plakada, hasar 37.6 N da uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ve yanlarda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modları tarzında görülmektedir.



Şekil 4-73 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 7. ve 8. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

7. ve 8. katmanlarda; üst plakada hasar 36.6 N da matris ve delaminasyon hasar modlarında, yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlamakta ve yük artışıyla birlikte lif-matris ayrılması hasarı ortaya çıkmaktadır (Şekil 4-73). Alt plakada ise, 37.6 N da hasar önceki katmanlarda olduğu gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna

tekabül eden kısımda ve bindirme bölgesi haricindeki kısımda matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında görülmektedir. 9. ve 10. katmanların hasarı için Şekil 4-74'e baktığımızda; üst plakada hasar 37.1 N da matris ve delaminasyon hasar modlarında, yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başlamaktadır. Alt plakaya baktığımızda ise, 37.6 N da hasar önceki katmanlarda olduğu gibi uçta üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda ve plakanın serbest tarafında matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında görülmektedir. Bütün katmanlarda oluşan hasarı göz önüne aldığımızda, üst plakada hasarın iyice ilerlemesi ile son kopma yükünde alt plakaya yük aktarılmaktadır ve alt plakada hasarlar daha fazla bölgeye yayılmaktadır. Ayrıca Tsai-Wu kriteri 90° lik kompozit bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altında alt plakada hasar tahmin etmemiştir (Şekil 3-27). Hashin kriteri Tsai-Wu kriterine göre daha yüksek yüklerde hasarı tahmin ettiği için alt plakada da hasarlar tahmin etmiştir.

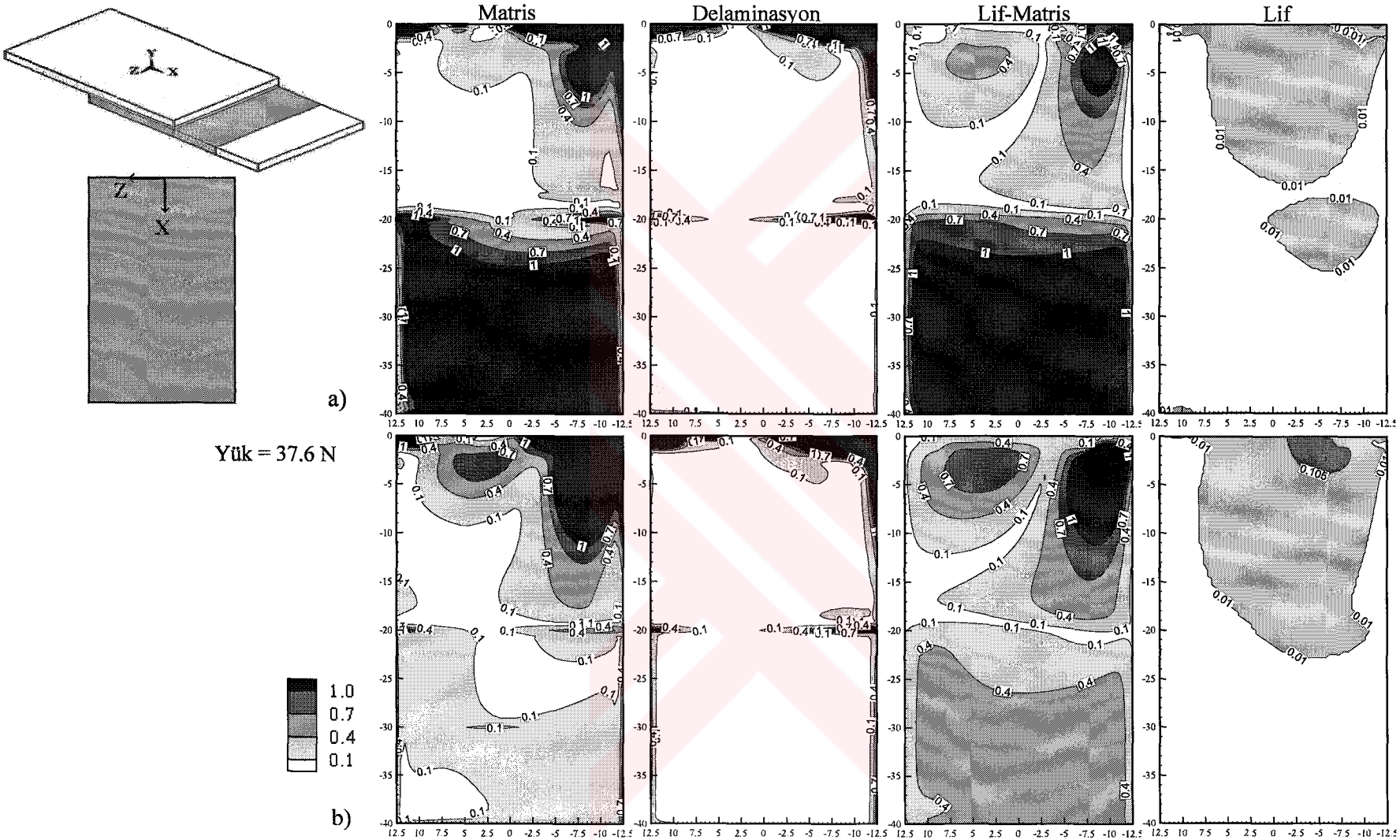


Şekil 4-74 Dört nokta eğme yükü altında 90° yönlü plakalardan oluşan kompozit bindirme bağlantısında alt ve üst plakaların 9. ve 10. katmanlarında Hashin kırılma kriterine göre hasar oluşumu ve gelişimi

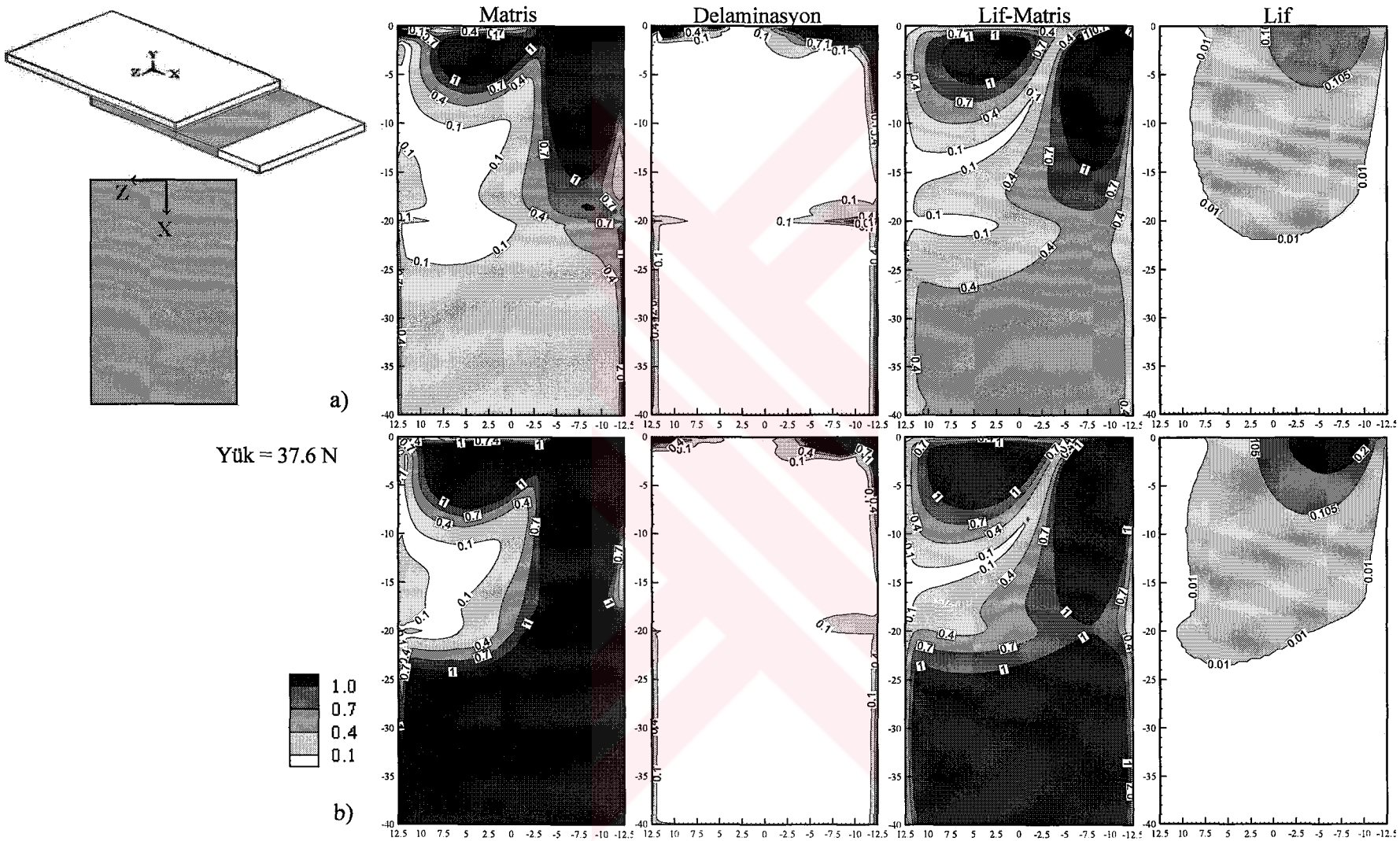
Üst plakanın üst yüzeyi basma alt yüzeyi de çekmeye maruz kaldığı için üst plakada alt yüzeyde bulunan yapıştırıcıya yakın katmanların hasarı üst yüzeydeki katmanların hasarından daha geniş bir bölgeye yayılmıştır. 90° yönlü kompozit bindirme bağlantısının üç nokta eğme ve dört nokta eğme testinde oluşan hasarlar genel olarak aynı tarzdadır. Aralarındaki tek fark son kopma yükündedir. Daha öncede belirtildiği gibi dört nokta eğme testinde kesme kuvvetinin bindirme bölgesinde sıfır olması nedeniyle dört nokta eğme testinde kopma yükü daha yüksektir.

Üç nokta eğme testinde olduğu gibi dört nokta eğme testinde de 0° lik kompozit bindirme bağlantısının hasarı bindirme bölgesinde yayılmaktadır. Fakat 45 ve 90° lik kompozit bindirme bağlantılarında hasar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda yayılmıştır. Bunun sebebi, 0° lik kompozit bindirme bağlantısı daha dayanıklı olduğu için eğme yükünden yapıştırıcı daha fazla etkilenmektedir ve hızlı bir şekilde zayıflamaktadır. Yapıştırıcının zayıflamasından dolayı da bindirme bölgesinde plakaya yük aktarılmaktadır ve böylece bindirme bölgesinde plakanın hasarları daha fazla bölgeye yayılmaktadır.

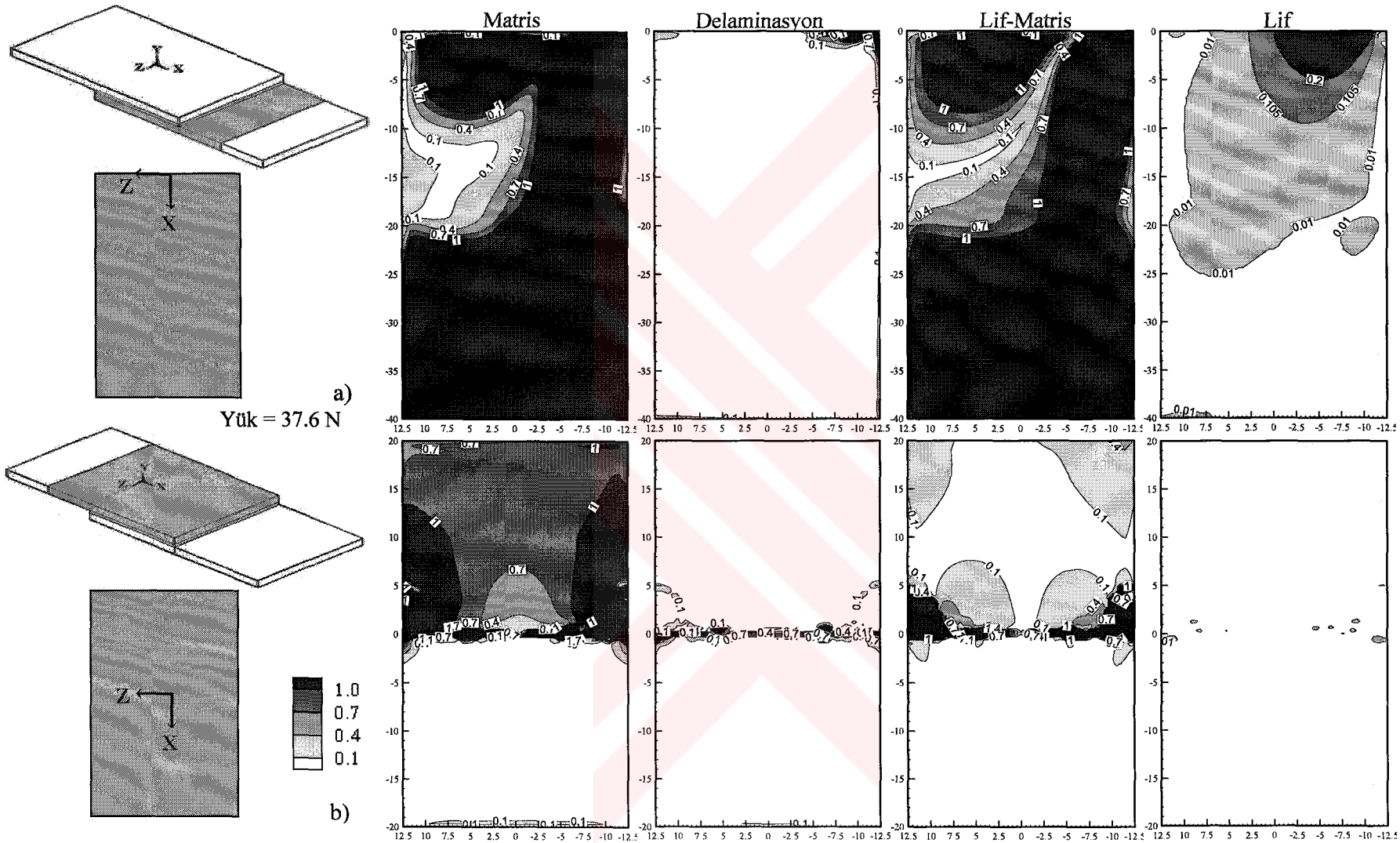
Şekil 4.75-79'da 90° lik kompozit bindirme bağlantısının 37.6 N dört nokta eğme yükü altında hasar olan bütün katmanlarda Hashin hasar indeks değerlerinin dağılımı görülmektedir. Alt plakada oluşan hasarlara baktığımızda, matris ve lif-matris ayrılması hasar modlarında plakanın uç kısmında ve plakanın serbest olduğu kısımda hasar geniş bir bölgede gelişmiştir. Delaminasyon hasar modunda ise plakanın uç kısmında hasar gelişmiştir. Alt plakada hasarlar üst plakaya göre daha fazla yayılmıştır. Sebebi üst plakada hasarlar geliştikten sonra son yükte alt plakaya yük aktarılmaktadır. Üst plakada hasarlar yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda gelişmiştir. Yapıştırıcıya yakın olan katmanlarda dıştaki katmanlara göre daha fazla bölgeye yayılmış hasarlar mevcuttur. Üst plakanın alt yüzeyi yani yapıştırıcıya yakın olan katmanlar çekmeye maruz kaldığı için bu katmanlarda hasar dıştaki katmanlara göre daha fazla yayılmıştır.



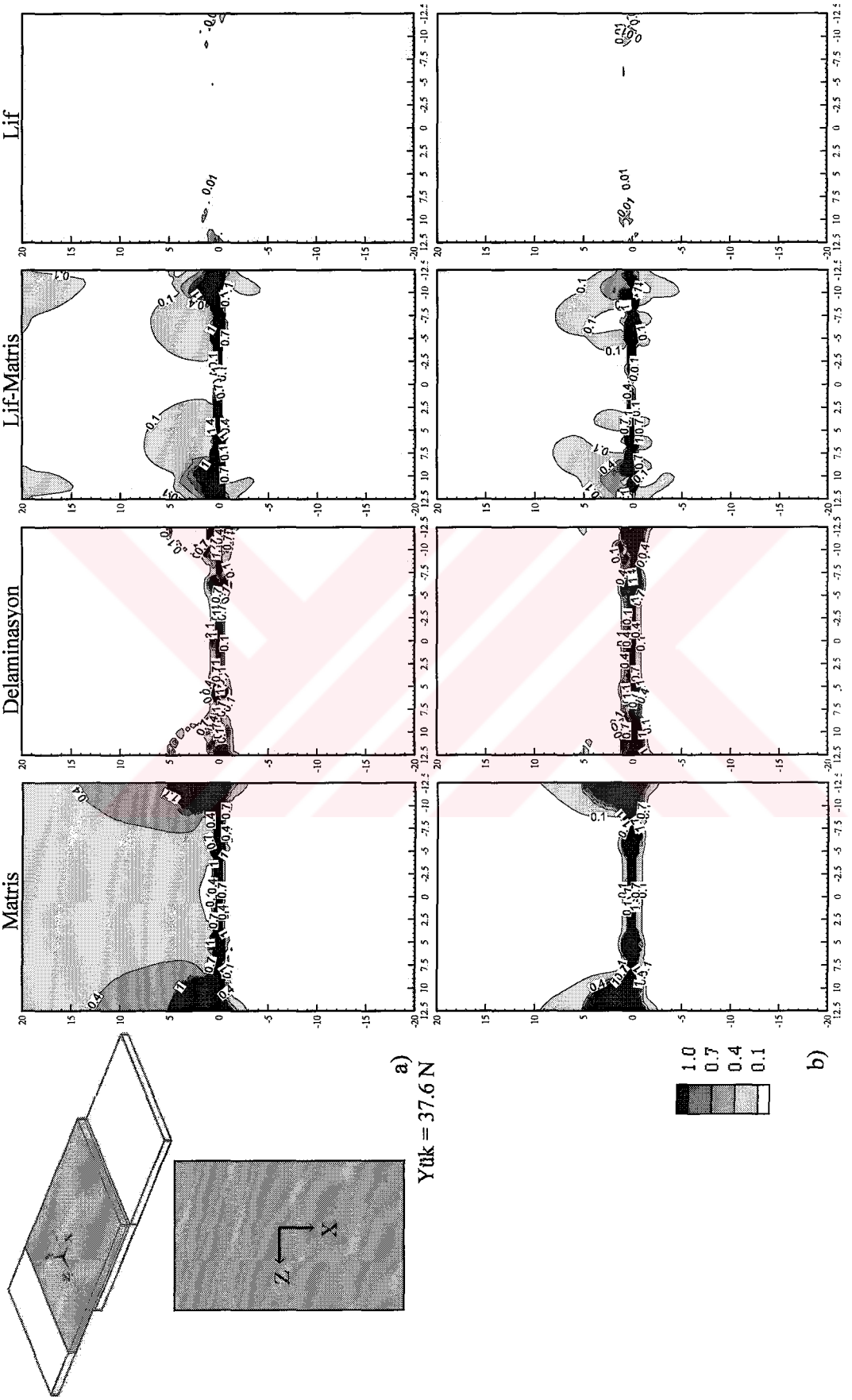
Şekil 4-75 Dört nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 1 ve 2 b) 3 ve 4. katmanının Hashin hasar indeksleri



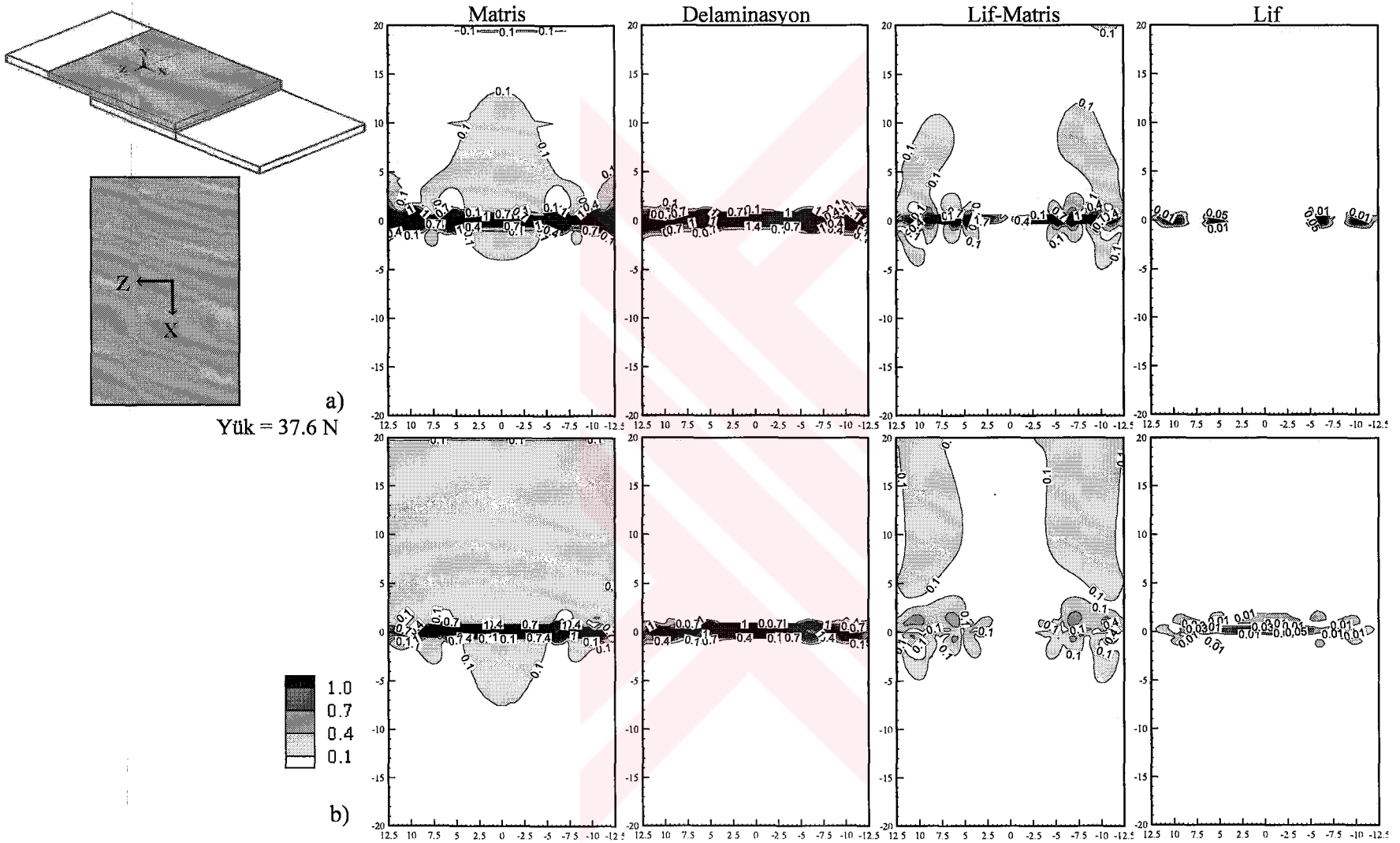
Şekil 4-76 Dört nokta eğme durumunda 90° lik alt plakanın a) 5 ve 6 b) 7 ve 8. katmanının Hashin hasar indeksleri



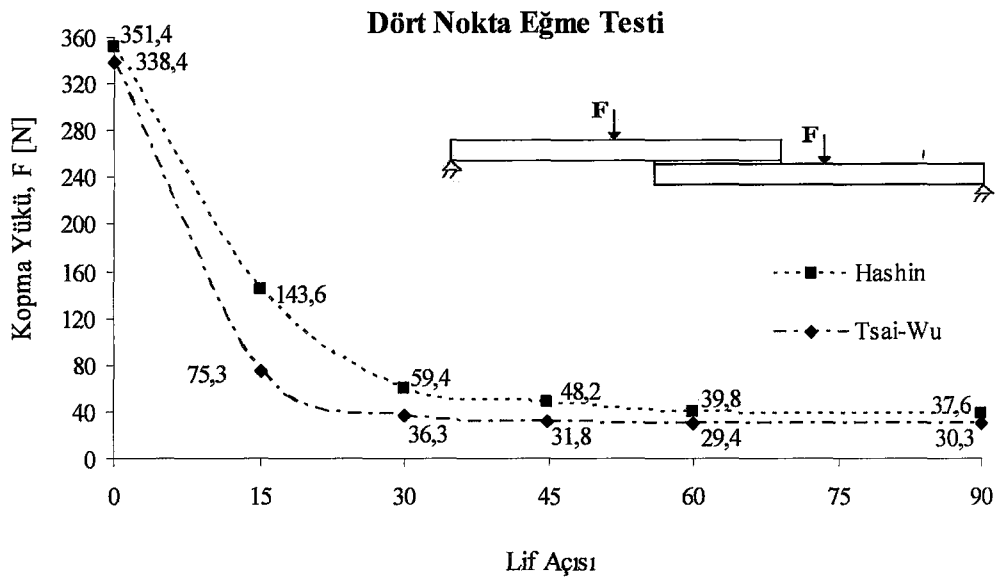
Şekil 4-77 Dört nokta eğme durumunda 90° lik a) alt plakanın 9 ve 10 b) üst plakanın 1 ve 2. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-78 Dört nokta eğme durumunda 90° lik üst plakanın a) 3 ve 4. b) 5 ve 6. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-79 Dört nokta eğme durumunda 90° lik üst plakanın a) 7 ve 8. b) 9 ve 10. katmanının Hashin hasar indeksleri



Şekil 4-80 Dört nokta eğme durumunda bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimi

Dört nokta eğme yükü altında kompozit bindirme bağlantılarında lif açısının değişimi ile kopma yükünün değişimi Şekil 4-80'de verilmiştir. Bu şekilde hem Tsai-Wu hem de Hashin kriterine göre kopma yükleri mevcuttur. Bu yükler incelendiğinde, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının dört nokta eğme yüküne dayanımı çekme ve üç nokta eğme yükünde olduğu gibi bindirme bağlantısında ki kompozit plakaların lif yönelim açısının değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Tsai-Wu kriteri ile karşılaştırıldığında, Hashin kriterine göre kompozit bindirme bağlantılarının daha büyük yüklerde koptuğu görülmektedir. Ayrıca bu grafikler E_1 elastik modülünün lif açısına göre değişim grafiği (Şekil 3-13) ile aynı tarzda olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5

HASARIN DENEYSEL İNCELENMESİ

5.1 Giriş

Bu çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantılarının çekme, üç nokta eğme ve dört nokta eğme yükleri altında davranışları hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Önceki bölümlerde teorik çalışmalar sunulmuştur ve bu bölümde de deneysel olarak yapılan çalışmalar sunulacaktır.

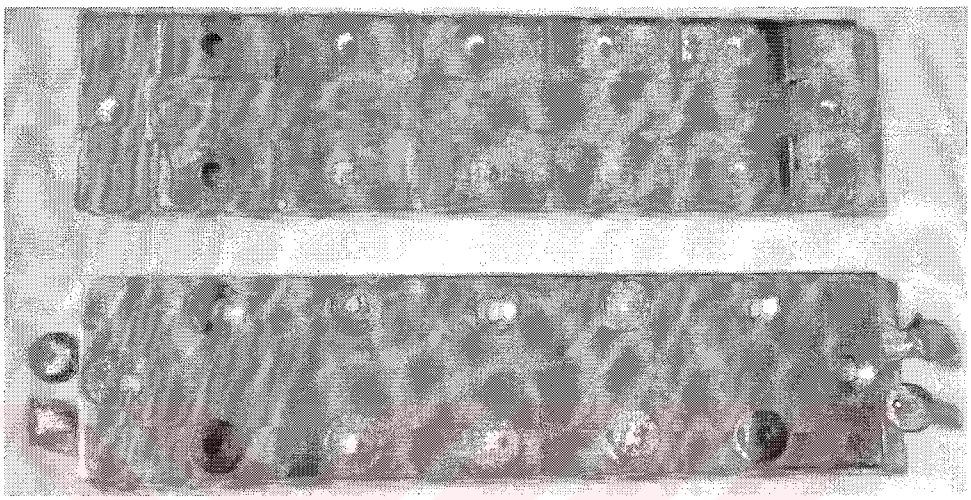
Deneysel çalışmalarda, Erciyes Üniversitesi Araştırma Fonu'nun FBT-04-24 kodlu projesi destekli olarak yurt dışından getirtilen Zoltek firmasına ait PANEX 35 karbon lif ve West System 105B/206 B epoksi reçineden oluşan değişik lif açılarına sahip karbon kompozit plakalar ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturulan tek bindirme bağlantılarını çekme, üç nokta eğme ve dört nokta eğme testlerine tabi tutarak hasar davranışları incelenmiştir. Testlerin sonucunda SEM (Scanning Electron Microscope) yardımıyla kırılma yüzeyleri incelenmiştir.

5.2 Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Üretimi

Kompozit tek bindirme bağlantılarını elde etmek için ilk olarak kompozit plakaların üretilmesi gerekmektedir. Plakaları üretebilmek için, Zoltek firmasına ait 150gr/m^2 ağırlığa sahip PANEX 35 tek yönlü karbon lif ve West System 105B/206 B epoksi reçine kullanılmıştır.

Kompozit plakalar elle kalıplama yöntemi ile Şekil 5-1'deki kalıp kullanılarak üretilmiştir. Tahta ve polimerik bir malzeme olan mikadan yapılmış kalıplar denenmiş, fakat reçinenin sertleşmesi esnasında plakanın istenilen geometride olmasını sağlamak için kalıp çelik malzemeden yapılmıştır. Karbon lifler epoksi reçine ile birleştirildikten

sonra plakaların istenilen kalınlıkta olmasını sağlamak için pres makinesi temin edilemediğinden gerekli basıncı oluşturabilmek maksadıyla alt ve üst kalıplar civatalar ile sıkılmıştır. Ayrıca kalıpta, fazla epoksi reçineleri atabilmek için yolluklar tasarlanmıştır.



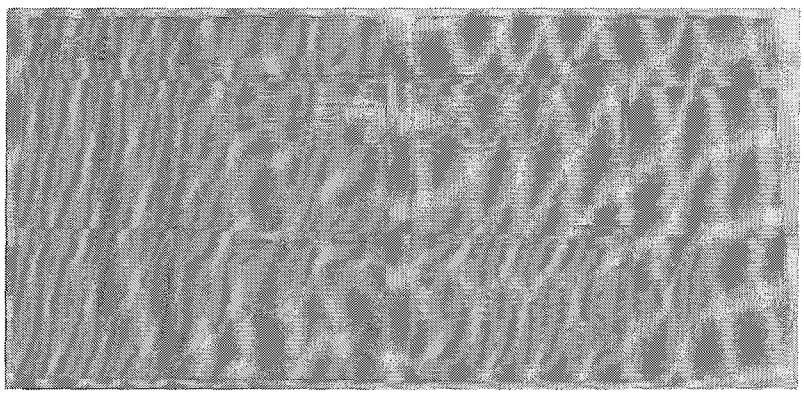
Şekil 5-1 Kompozit plaka üretim kalıbı

Elle kalıplama yöntemi, ilk modern kompozit parçaların üretiminde kullanılan tekniktir. Keçe, örgü ve kumaş formundaki takviyeleri açık bir kalıba yatırıp üzerine reçine emdirilerek uygulanır. Ön çalışma olarak kalıpların yüzeyleri zımparalanır ve düzgün bir yüzey elde edilir. Daha sonra yüksek kaliteli bir yüzey elde etmek için, kalıp cilalanarak zımpara ile giderilemeyen boşluklar doldurulur. Cila kuruduktan sonra kalıp yüzeyi iyice parlatılır ve yüzeye kalıp ayırıcı sürülür. Kalıp ayırıcı, kompozit plakayı kalıptan çıkarırken epoksi reçinenin kalıba yapışmasını engelleyip kalıptan kolayca çıkmasını sağlamaktadır.

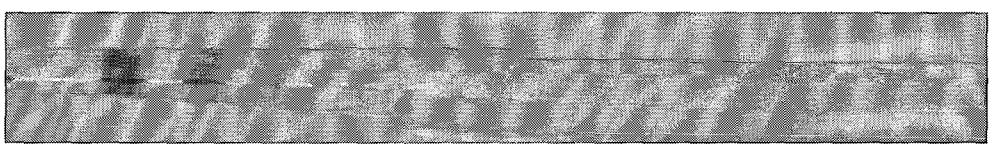
Kalıp ayırıcı sürülmüş olan kalıp, kurumaya bırakılınca epoksi reçine ve reçinenin sertleşmesini sağlayan epoksi katılaştırıcı 5:1 oranında bir kapta iyice karıştırılır. Kalıp yüzeyindeki kalıp ayırıcı kuruduktan sonra ilk olarak reçine kalıp yüzeyine ince bir film tabakası şeklinde sürülür. Kalıp yüzeyine uygulanan bu reçinenin amacı nihai kompozit parçanın yüzeyini korumaktır. Reçinenin üzerine daha önceden istenilen lif açısına göre kesilmiş lifler yerleştirilir ve epoksiyi iyice emmesini sağlamak için liflere bir fırça yardımıyla baskı uygulanır. Daha sonra tekrar bir epoksi reçine tabakası liflerin üzerine sürülür. Epoksi reçine, kalıbın içinde iyice yayıldıktan sonra diğer katmanı oluşturmak

için yeni lifler yerleştirilir. Bu liflere de epoksi reçine iyice yedirildikten sonra istenilen katman sayısına göre bu işlem tekrarlanır. Son katman atıldıktan sonra alt ve üst kalıplar birleştirilerek civatalar iyice sıkılır ve kalıp oda sıcaklığında 8 ila 12 saat sertleşmeye bırakılır. Kalıplanmış parça normal olarak oda sıcaklığında sertleşir, ancak sertleşmeyi hızlandırmak için ısı uygulamak da mümkündür. Sertleşme reçine içindeki sertleştirici tarafından başlatılan kimyasal reaksiyonla gerçekleştirilir. Bu yöntemin, basit aletler kullanıldığından yatırım maliyeti düşüktür.

Kompozit plakaları birleştirmede Ciba ÖZEL Kimyevi Maddeler A.Ş. tarafından üretilen AV 5308/HV 5309-1 ticari kodlu çift bileşenli Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Bindirme bağlantısını oluşturmak için Şekil 5-2'de görülen kalıplar kullanılmıştır. Kalıbın amacı yapıştırıcı kalınlığının 0.5 mm olmasını sağlamaktır. Bu kalıpların bir tanesinde kompozit plakanın kalınlığı kadar T oyuk diğerinde ise kompozit plaka kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığı toplamı kadar T oyuk açılmıştır. Kompozit plakaların bindirme bölgesine sertleştiricisi ile karıştırılmış Araldite epoksi yapıştırıcı spatula ile sürüldükten sonra T oyukların baş kısımları üst üste, ayak kısımları da ters gelecek şekilde kalıplar birleştirilir. Yaklaşık 1 saat yapıştırıcının biraz sertleşmesi beklenir ve kalıplar çıkarılarak bindirme bağlantısının bindirme bölgesinde biriken yapıştırıcılar temizlenir. Daha sonra bağlantı 8 ila 12 saat kurumaya bırakılır. Elde edilen bağlantıda Araldite yapıştırıcı 48 saat de ancak tam kür olabilmektedir.



Şekil 5-2 Bindirme bağlantısı oluşturma kalıbı

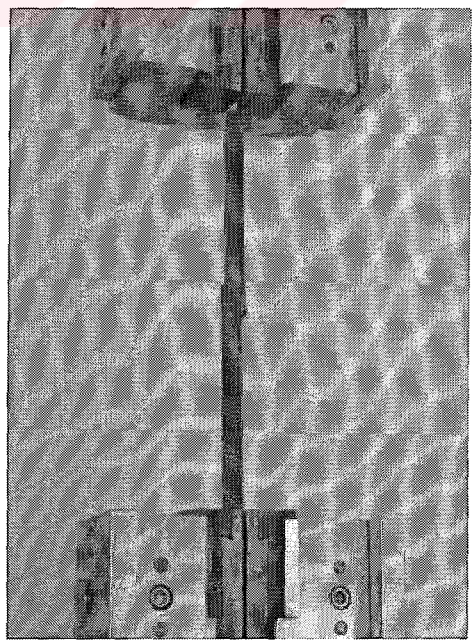


Şekil 5-3 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit bindirme bağlantısı

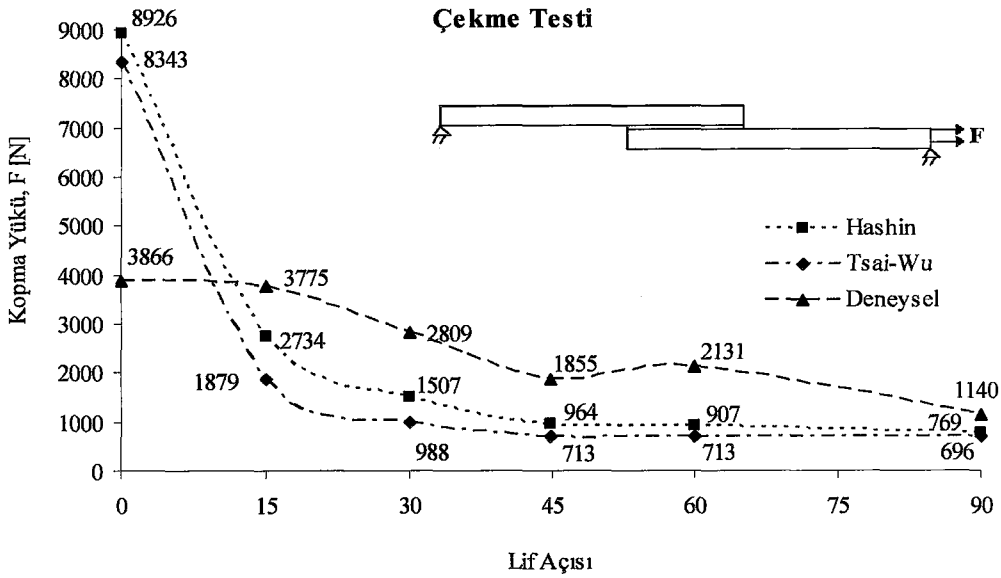
Üretilen yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit tek bindirme bağlantıları (Şekil 5-3) 50 kN kapasiteli ZWICK/Z050 test cihazında 0.5 mm/sn hız ile çekme, üç nokta eğme ve dört nokta eğme testlerine tabi tutulmuştur.

5.3 Tek Yönlü Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Çekme Deneyi Sonuçları

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit tek bindirme bağlantısının 50 kN kapasiteli ZWICK/Z050 test cihazında çekme testi esnasında bir görüntüsü Şekil 5-4'de verilmiştir. Değişik lif açılarına sahip (0, 15, 30, 45, 60, 90°) tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının 2'şer numune ile ayrı ayrı çekme testleri yapılmıştır ve son kopma yüklerinin her bir lif açı değerine göre ortalamaları alınarak tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme testi sonucunda kopma yüklerini gösteren grafik çizilmiştir (Şekil 5-5). Bu grafik incelendiğinde; 0° lif açısına sahip bindirme bağlantısında Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin tahmin ettiği kopma yükleri deneylerden elde edilen kopma yükünden daha yüksektir. 15-90° lif açısına sahip bindirme bağlantılarında ise deneysel kopma yükleri Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin tahmin ettiği kopma yüklerinden daha yüksektir. Yüksek olmasının sebebi, teoride malzeme özelliklerini düşürme modelinde, malzemenin mekanik özelliklerini aniden çok küçültmekten ileri gelmektedir.



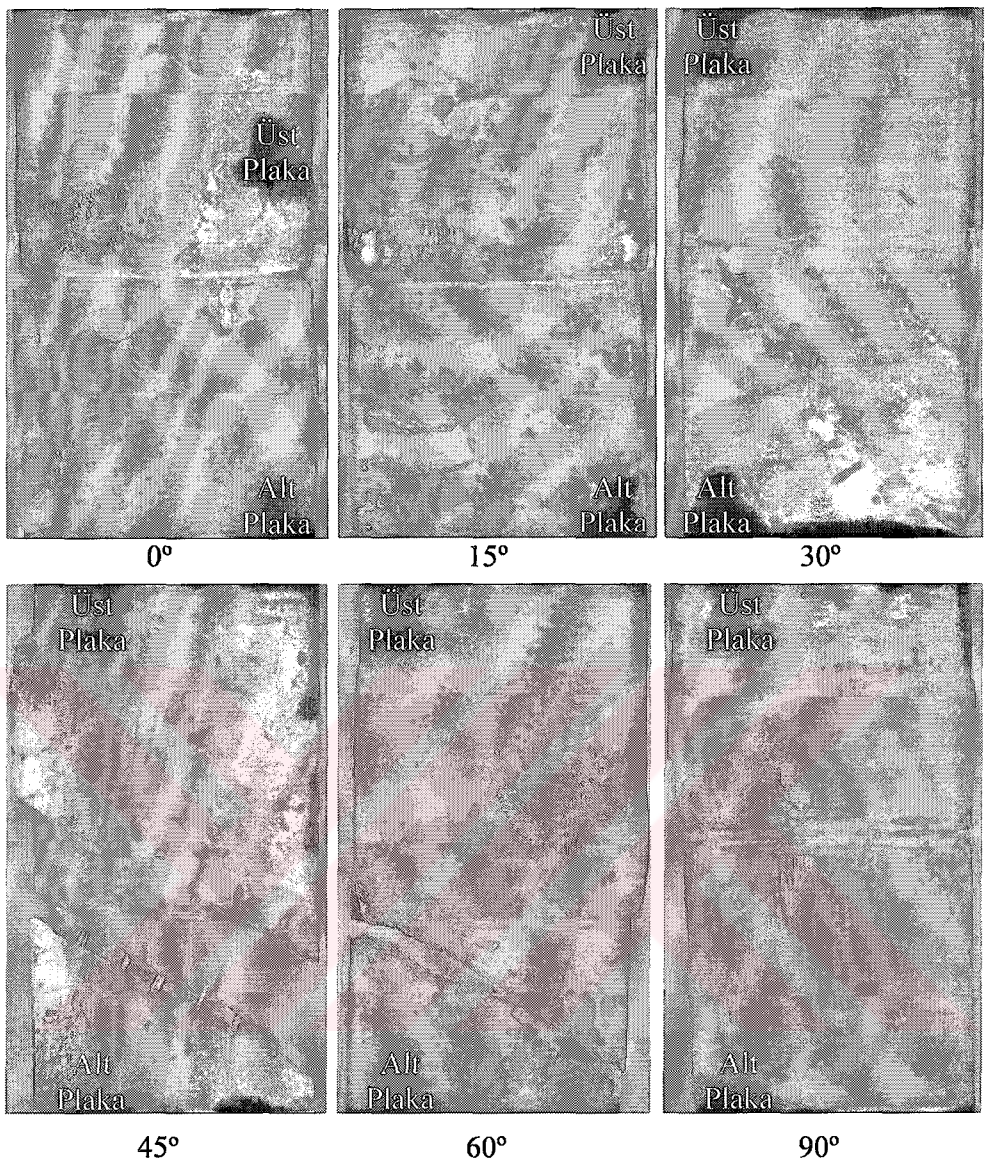
Şekil 5-4 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantısının çekme testi



Şekil 5-5 Çekme yükü altında tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimleri

0 ve 15° lik bindirme bağlantıları çekme deneyinde yapıştırıcıdan kopmuştur (Şekil 5-6). Oysa ki Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterleri kullanılarak yapılan teorik hasar tahminlerine göre bütün açılarda kopma plakalardan olmuştur (Şekil 3.8-10, 4.2-4). Analizlerde yapıştırıcı ve plakaların nonlineer davranışları hesaba katılmadığı ve sadece kompozit plakaların hasarı incelendiği için deneylerde yapıştırıcıdan olan kopmalar tahmin edilememiştir.

30, 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantılarında çekme deneyinde kopma, alt plakadan yapıştırıcı serbest ucu civarından lif eksenine paralel olmuştur (Şekil 5-6). Aynı şekilde teorik olarak Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinde 45 ve 90° lik bindirme bağlantılarında alt plakada yapıştırıcı serbest ucu civarında lif eksenine paralel kopmalar tahmin edilmiştir (Şekil 3.9-10, 4.5-19). Bu durumda aralarındaki tek fark kopma yüklerindedir. Şekil 5-5'deki grafikten de görüldüğü gibi 45° lik bindirme bağlantısının çekme yükü altında Tsai-Wu kırılma kriteri kopmayı 713 N da, Hashin kırılma kriteri kopmayı 964 N da tahmin ederken deneylerde 1855 N da kopma olmuştur.



Şekil 5-6 Çekme deneyinde kompozit tek bindirme bağlantılarının kırılma yüzeyleri

Kırılma yüzeylerine (Şekil 5-6) baktığımızda 45° lik bindirme bağlantısında kopmanın yapıştırıcının içinden plakanın serbest ucuna doğru lif eksenine paralel olarak kopmanın olduğu görülmektedir. 45° lik bindirme bağlantısının çekme yükü altında hasar tahminlerinde yapıştırıcı serbest ucunun ortasında hasarlar başlamaktadır (Şekil 3-9, 4.8-11). Bu durum göstermektedir ki; 45° lik bindirme bağlantısının deneyinde alt plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmın ortasında gerilme yığılmalarının matrisi zorlamıştır. Ortadan zorlama olduğu içinde yarısı bindirme bölgesinin içine diğer yarısı da plakanın serbest tarafına gelecek şekilde lif eksenine paralel matristen kopma olmuştur. Kopmanın matristen olması Hashin kırılma kriterinde açıkça tahmin edilmiştir

(Şekil 4.8-11). Hashin kriterine göre matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modları gelişmiştir. Özellikle matris ve lif-matris ayrılması hasar modları deneydeki lif eksenine paralel matristen kopmayı açıklamaktadır. Sadece yük düşük tahmin edilmiştir. Bu durum teoride malzeme özelliklerini düşürme modelinde, malzemenin mekanik özelliklerini aniden çok küçültmekten ileri gelmektedir. İlaveten yapıştırıcının ve kompozit plakalarının lineer elastik kabul edilmesi sonucu deneylerde plakaların yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda yapıştırıcı-yapışan ara yüzeyinde başlayan hasarların matrise geçtikten sonra aniden ilerlemeyip matrisin plastik davranış sergileyip uygulanan yükü kopma olana kadar biraz daha taşıması da deneylerde elde edilen kopma yükünün teorikte tahmin edilenden yüksek olmasına sebep olmaktadır.

90° lik bindirme bağlantısının kopmasını incelediğimizde (Şekil 5-6), deneyde 90° lik bindirme bağlantısı alt plakadan yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan kopmuştur. Teorikte ise, Hashin (Şekil 4.15-19) ve Tsai-Wu (Şekil 3-10) kırılma kriterleri 90° lik bindirme bağlantısının çekme yükü altında alt plakada hasarın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başladığını ve bu hat boyunca iyice yayıldıktan sonra üst plakada hasarlar meydana geldiğini tahmin etmiştir. Hashin kırılma kriterinin tahmininde matris ve lif-matris ayrılması hasar modları etkindir (Şekil 4.15-19). Tsai-Wu ve Hashin kriterlerinin tahminleri deneylerin sonucu ile uymaktadır. Deneyde matristen lif eksenine paralel kopma olması Hashin kriterinin tahminini daha doğrulamaktadır. Tek fark kopma yükündedir ve teorikte tahmin edilen kopma yükleri deneydekinden düşüktür. Tsai-Wu kırılma kriteri kopmayı 696 N da, Hashin kırılma kriteri 769 N da tahmin ederken deneylerde 1140 N da kopma olmuştur (Şekil 5-5). Sebebi malzeme özelliklerini düşürme modeli ile yapıştırıcının ve kompozit plakaların lineer elastik kabul edilmesidir.

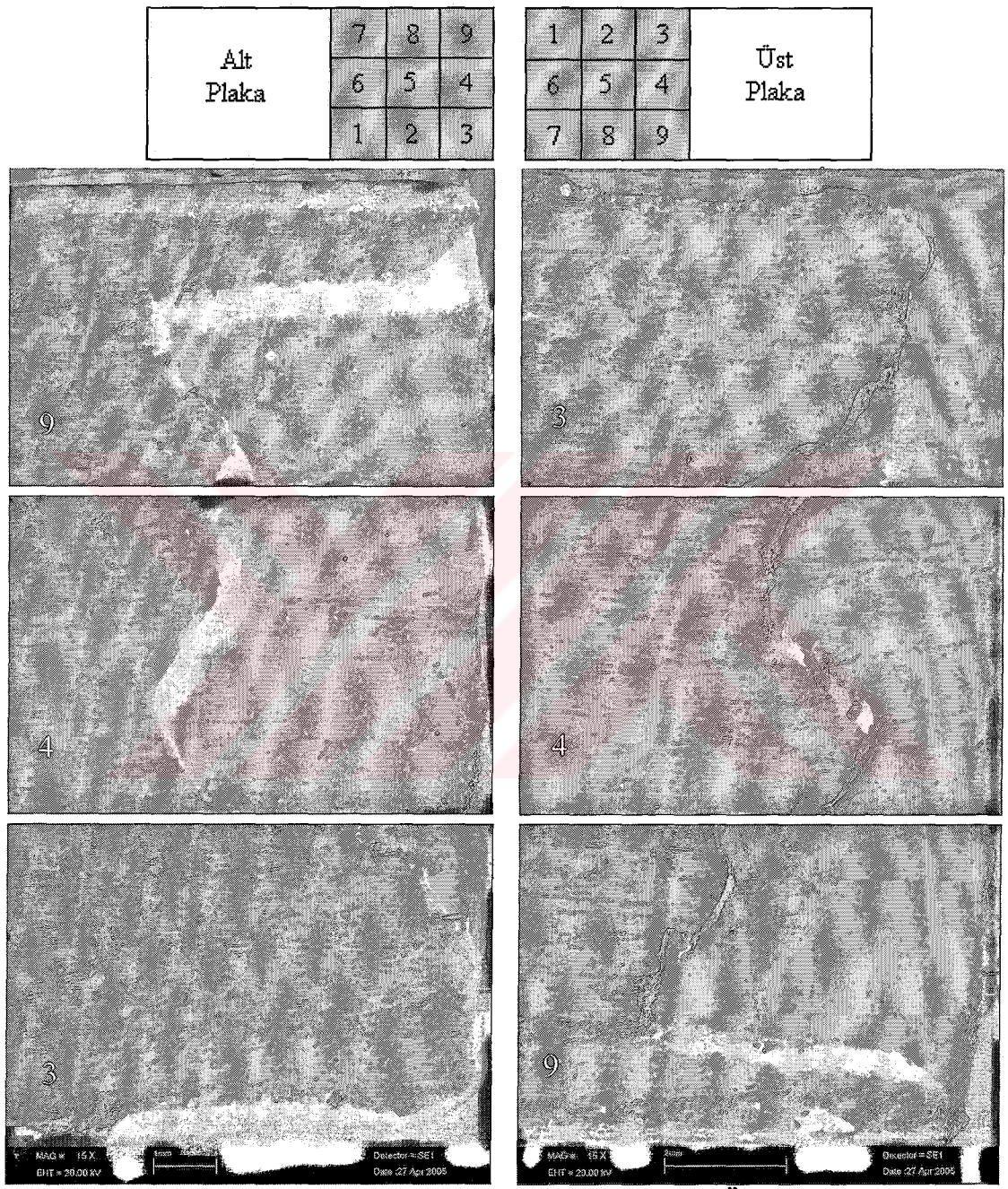
0 ve 15° lik bindirme bağlantılarında liflerin dayanıklı olmasından dolayı çekme yükü yapıştırıcıya daha fazla etki etmektedir. Bu nedenle çekme deneyinde 0 ve 15° lik bindirme bağlantılarında kopma yapıştırıcıdan olmuştur. Teoride 0° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme testinde Tsai-Wu kırılma kriteri hasarın alt plakada yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda başlayıp iyice yayıldığını ve üst plakada da son yükte uç kısımda çok az bölgede geliştiğini tahmin etmiştir (Şekil 3-8). Hashin hasar kriteri ise hasarı matris modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül

eden kısmında başlayıp bindirme bölgesinin içine doğru ilerleyip bindirme bölgesinde tamamen yayılmıştır (Şekil 4.2-4). Özellikle alt plakanın yapıştırıcıya yakın olan katmanlarında yayılma daha fazla olmuştur. Teorik analizlerde yapıştırıcının dayanımı göz önüne alınmadığı ve özellikle yapışanların kırılmaları incelendiği için 0 ve 15° lik bindirme bağlantılarında yapıştırıcılardan olan kopma tahmin edilememiştir.

0° lik bindirme bağlantılarının çekme deneyinde kopma resimlerini (Şekil 5-6) incelediğimizde, yapıştırıcıda kopma alt plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda yapışan yapıştırıcı ara yüzeyinden üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısma kadar ara yüzey boyunca devam etmiştir. Üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısma yakın yerde yapıştırıcının içine girip tekrar ara yüzey boyunca kopma olmuştur. 15° lik bindirme bağlantısının çekme deneyinde kopma resimlerini (Şekil 5-6) incelediğimizde ise hasar alt plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda yapışan yapıştırıcı ara yüzeyinde başlayıp biraz ilerledikten sonra yapıştırıcının içine daha sonrada yapışanın ilk katmanına girmiştir. Tekrar yapıştırıcı içinden ara yüzey boyunca devam edip üst plakanın yapıştırıcı serbest ucuna ulaşmıştır (Şekil 5-7). Bu iki bindirme bağlantısındaki hasar ilerleme mekanizmasından anlaşıldığı üzere 0° lik bindirme bağlantısını çekmeye dayanımı en yüksek olduğu için bu bağlantıda yük tamamen yapıştırıcıya binerken 15° lik bindirme bağlantısında çekme yüküne dayanım daha az olduğu için yapıştırıcıdaki hasar yapışana da etki etmektedir ve bindirme bölgesinin ortasında yapışanın ilk katmanından da kopma olmaktadır (Şekil 5-8).

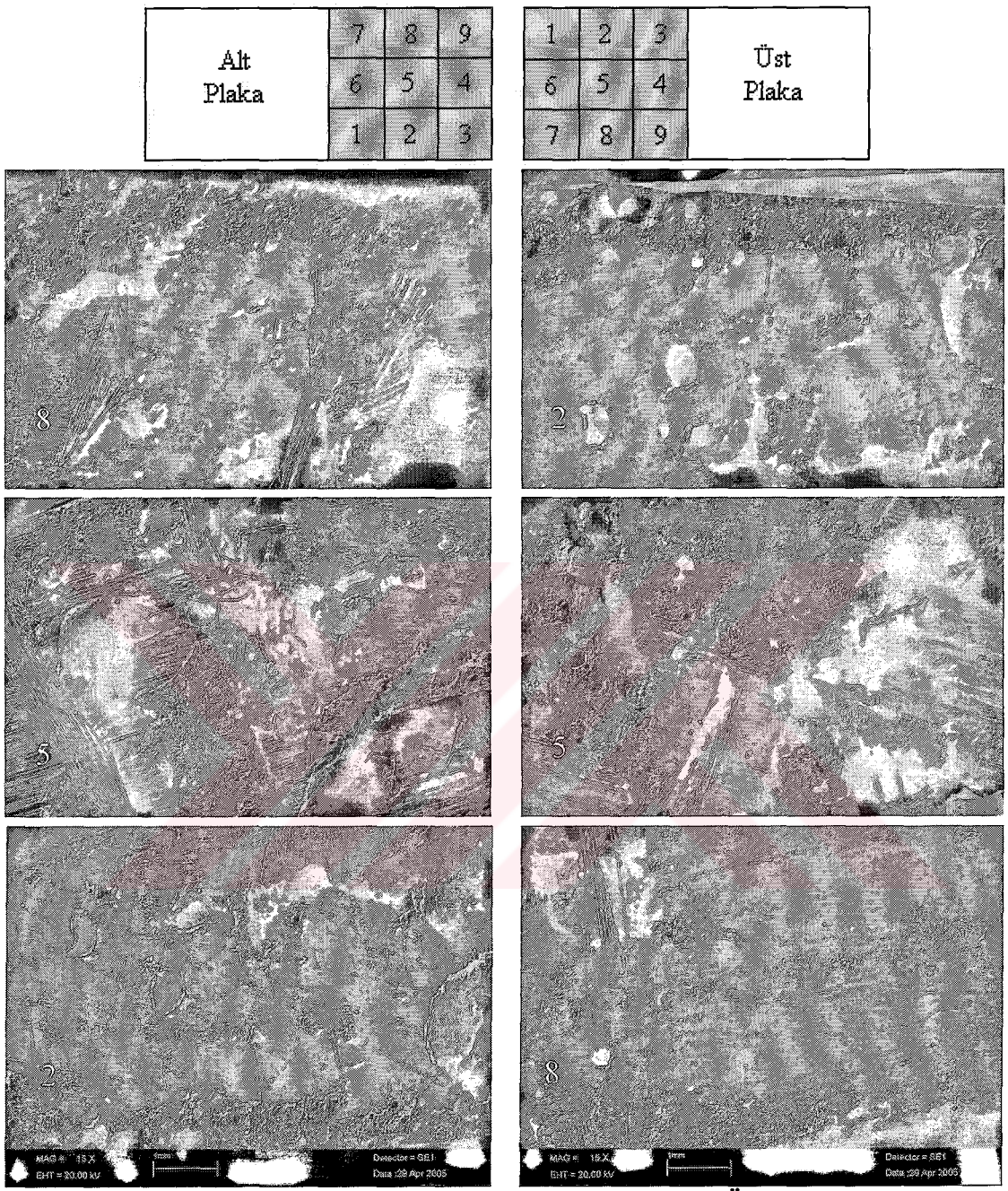
SEM analizlerinde yapıştırıcı incelenirken bindirme bölgesi dokuz bölgeye ayrılmıştır ve ayrıntılı bir şekilde bu bölgeler irdelenmiştir. 0° lik bindirme bağlantısının Şekil 5-7'de alt ve üst plakada yapıştırıcının koptuğu 3, 4 ve 9 nolu bölgelerin SEM resimleri görülmektedir. Bu resimlerde alt plakanın uç kısmında yapıştırıcı kopmuş ve kopan yapıştırıcı üst plakada kalmıştır. 0° lik bindirme bağlantısının SEM resimlerinden de görüldüğü gibi 0° lik bindirme bağlantısında kopma, liflerin dayanımının çok olmasından dolayı yapıştırıcıdan olmaktadır. 15° lik bindirme bağlantısının SEM resimlerini incelediğimizde ise plakaların 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinde yapıştırıcı ile birlikte yapışanlarında hasarlı olduğu görülmektedir. Şekil 5-8'de 15° lik bindirme bağlantısının alt ve üst plakalarında hasarın yapışanın içine giren bölgelerinin resimleri

verilmiştir. 15° lik bindirme bağlantısının dayanımı 0° lik bağlantınınkinden daha düşük olduğu için hasar yapıştırıcıdan yapışana geçmektedir.



a) Alt plaka b) Üst plaka

Şekil 5-7 0° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)

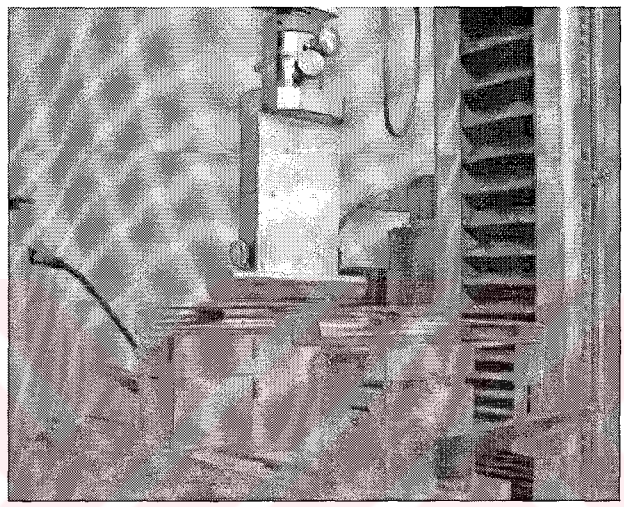


a) Alt plaka b) Üst plaka

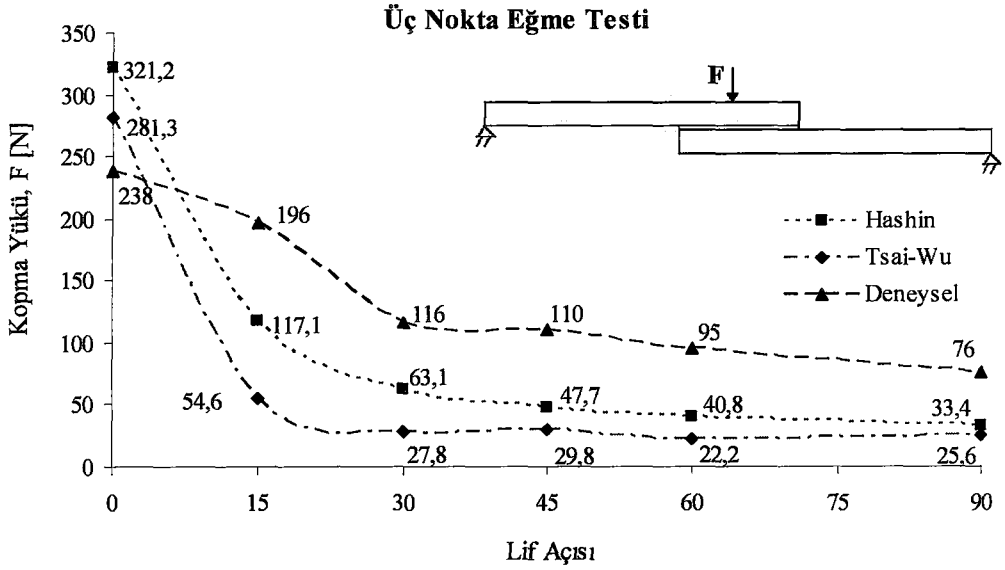
Şekil 5-8 15° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)

5.4 Tek Yönlü Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit tek bindirme bağlantısının üç nokta eğme testi çekme testi gibi ZWICK/Z050 test cihazında yapılmıştır (Şekil 5-9). Üç nokta eğme testinde de 0, 15, 30, 45, 60 ve 90° lik kompozit tek bindirme bağlantıları 2'şer adet numune ile ayrı ayrı test edilmiştir.



Şekil 5-9 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantısının üç nokta eğme testi



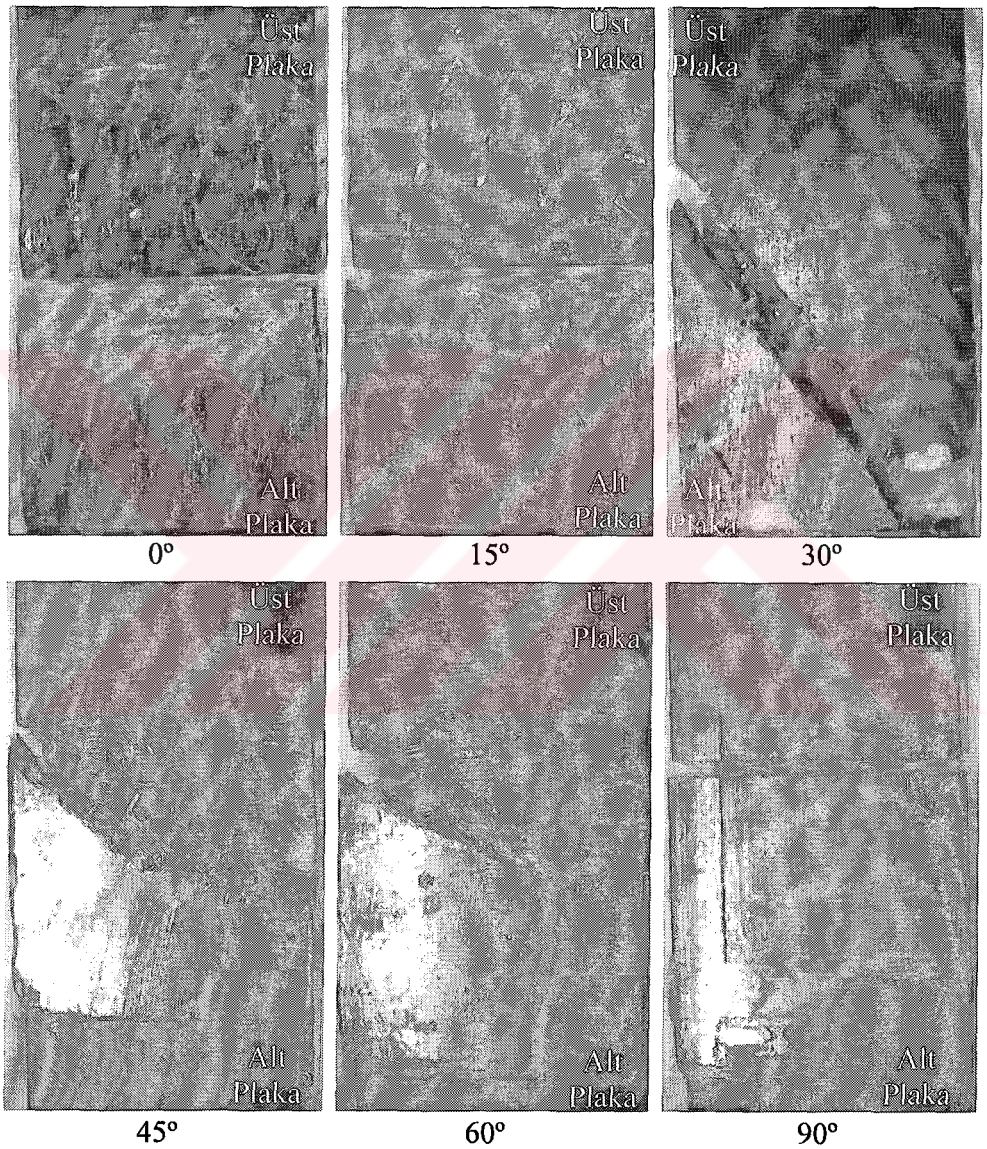
Şekil 5-10 Üç nokta eğme yükü altında tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimleri

Üç nokta eğme testi sonucunda son kopma yüklerinin her bir lif açısına göre ortalamalarının grafiği Şekil 5-10'da verilmiştir. Grafikte; 0° lif açısına sahip bindirme bağlantısında Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin tahmin ettiği kopma yükleri deneylerden elde edilen kopma yükünden daha yüksek iken 15-90° lif açısına sahip bindirme bağlantılarında deneysel kopma yükleri Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin tahmin ettiği kopma yüklerinden daha yüksektir. Bunun sebebi, teoride malzeme özelliklerini düşürme modelinde malzemenin mekanik özelliklerinin aniden çok küçültülmesi ile yapıştırıcı ve kompozit plakaların lineer elastik kabul edilmesidir.

Çekme deneylerinde olduğu gibi, üç nokta eğme deneylerinde 0 ve 15° lik bindirme bağlantıları yapıştırıcıdan koparken 30, 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantıları ise üst plakadan yapıştırıcı serbest ucu civarından lif eksenine paralel kopmuştur (Şekil 5-11). Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin teorik hasar tahminlerine göre bütün açılarda kopma plakalardan olmuştur (Şekil 3.17-18, 4.26-56). Özellikle hasar üst plakada başlayıp gelişirken alt plakada son yüklerde hasar oluşmuştur. Bu durumda teorik olarak 30, 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantılarının hasarı tahmin edilmiştir. Analizlerde yapıştırıcı ve plakalarda lineer elastik kabullerle teorik tahminler yapıldığı için ve sadece kompozit plakaların hasarı incelendiği için deneylerde yapıştırıcıdan olan kopmalar tahmin edilememiştir.

0 ve 15° lik bindirme bağlantılarının üç nokta eğme deneyinde de kopmanın yapıştırıcıdan olmasının sebebi, liflerin dayanıklı olması ve eğme yükünün yapıştırıcıya daha fazla etki etmesidir. 0° lik bindirme bağlantısının teorik tahmininde, Tsai-Wu kırılma kriteri hasarın üst plakada yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda başlayıp iyice yayıldığını ve alt plakada da son yükte uç kısımda çok az bölgede geliştiğini tahmin etmiştir (Şekil 3-17). Hashin hasar kriteri ise hasarı üst plakada matris modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlayıp bindirme bölgesinin içine doğru ilerleyip matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında bindirme bölgesinde tamamen yayıldığını ve son yükte bindirme bölgesinin ortasında lif kopması hasar modu ortaya çıktığını tahmin etmiştir (Şekil 4.26-30). Ayrıca son yüke doğru alt plakada yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda hasarlar başlamış ve son yükte matris, delaminasyon, lif-matris ayrılması ve lif kopması hasar modlarında kopmuştur. Bu iki kırılma kriterinin tahmini de gösteriyor ki, 0 ve 15° gibi

dayanımı yüksek lif açılarına sahip bindirme bağlantılarında bindirme bölgesinin ortasına uygulanan eğme yükü yapıştırıcıyı daha fazla etkilemektedir ve bu nedenle yapıştırıcı hasar görmektedir. Teorik analizlerde yapıştırıcının dayanımı göz önüne alınmadığı ve özellikle yapışanların kırılmaları incelendiği için 0 ve 15° lik bindirme bağlantılarında yapıştırıcılardan olan kopma tahmin edilememiştir.



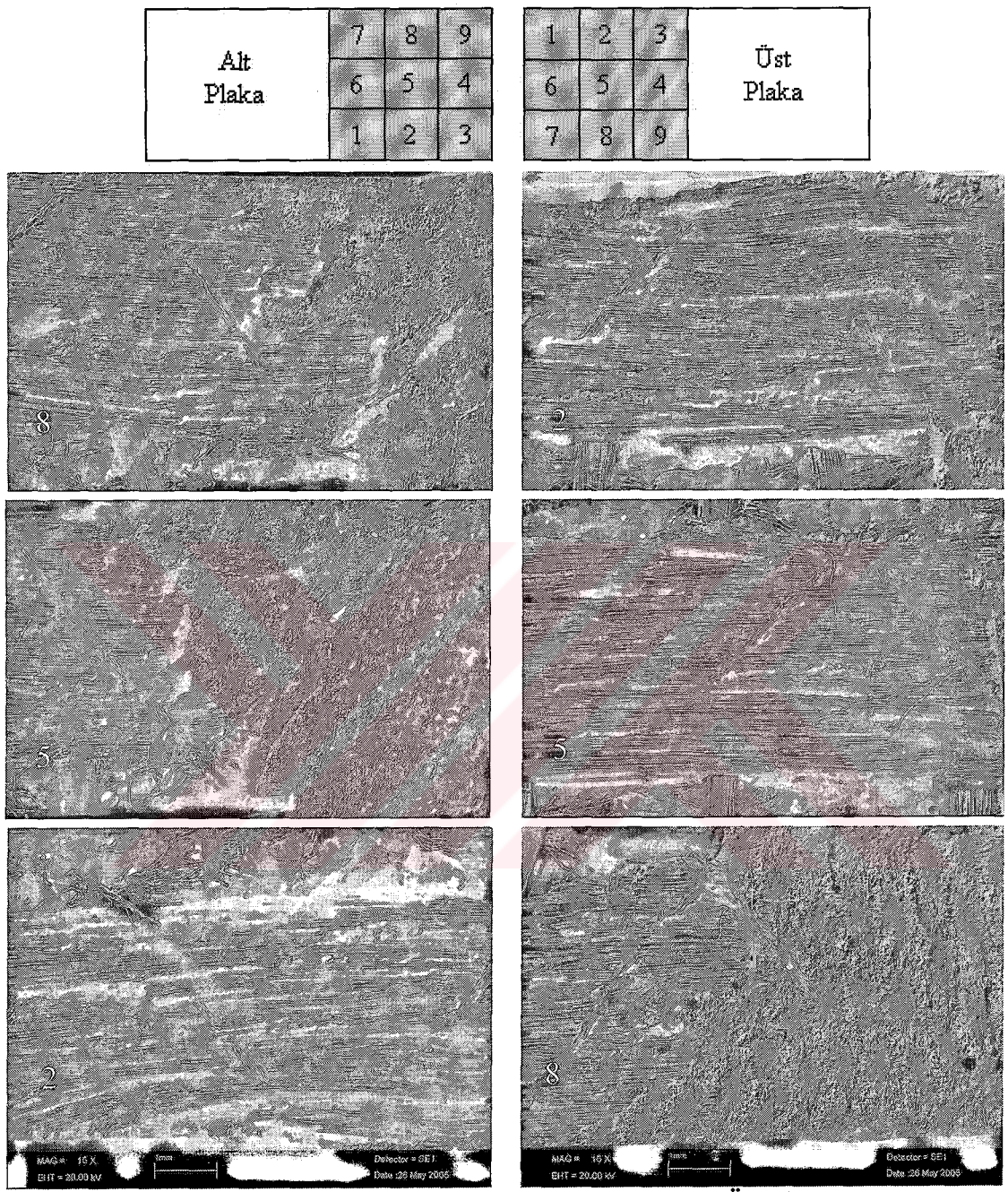
Şekil 5-11 Üç nokta eğme testinde kompozit tek bindirme bağlantılarının kırılma yüzeyleri

0° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme testi sonucu kopma resmini (Şekil 5-11) incelediğimizde, alt plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmından bindirme bölgesinin yarısına kadar üst plakanın uç kısmının parçaları mevcuttur. Kopma, üst plaka yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda yapıştırıcı yapışan ara yüzeyinde oluşurken hasar bindirme bölgesinin ortasında yapışana girmiştir ve uç kısma kadar yapışanın içinden devam etmiştir. 15° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme deneyinde ise hasar, üst plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmında yapıştırıcı yapışan ara yüzeyinde başladıktan sonra yapışanın içine girerek üst plakanın uç kısmına kadar yapışanın içinde devam etmiştir. Bu iki bindirme bağlantısındaki hasar ilerleme mekanizmasından çıkan sonuç, 0° lik bindirme bağlantısını eğmeye dayanımı en yüksek olduğu için bu bağlantıda hasar yapıştırıcı yapışan ara yüzeyi ile birlikte bindirme bölgesinin yarısından itibaren yapışana girerken 15° lik bindirme bağlantısında dayanım daha az olduğu için bindirme bölgesinde hasar hemen hemen yapışanın içine nüfuz etmiştir (Şekil 5-11). 0 ve 15° lik bindirme bağlantılarının SEM resimleri Şekil 5.12-13'de verilmiştir. 0° lik bindirme bağlantısının Şekil 5-12'de alt ve üst plakaların bindirme bölgesi ortasında 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin SEM resimleri görülmektedir. 0° lik bindirme bağlantısında 2, 5 ve 8 nolu bölgeler hasarın yapıştırıcıdan yapışana ilerlediği bölgelerdir. Bu bölgelerin SEM resimleri incelendiğinde, hasarın ancak ilk katmanın matris ve liflerine zarar verdiği görülmektedir. Bu zarar sadece plakanın en üstündeki matris tabakasını sıyırmakla olmuştur. 15° lik bindirme bağlantısının SEM resimlerini incelediğimizde, üst plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında yapıştırıcı-yapışan ara yüzeyinden başlayan hasar hemen yapışanın ilk katmanına girmektedir ve uç kısma kadar yapışanda devam etmektedir (Şekil 5-13). Şekil 5-13'de 15° lik bindirme bağlantısının hasarın yapıştırıcı-yapışan ara yüzeyinden yapışana geçtiği 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin SEM resimleri verilmiştir.

45° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme testi için Tsai-Wu kırılma kriteri kopmayı 29.8 N da, Hashin kırılma kriteri kopmayı 47.7 N da tahmin ederken deneylerde 110 N da kopma olmuştur. Tsai-Wu kırılma kriterinin tahminine göre; üst plakada yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda hasar başlayıp bu hat boyunca ilerlemektedir (Şekil 3-18). Bu durumda Tsai-Wu kriterinin tahmini yetersiz kalmaktadır. Bunun sebebi de Tsai-Wu kriterinin hasarı modlara ayırmamasıdır. Hasarı modlara ayıran Hashin kriterinin tahminine göre, hasar ilk olarak üst plakada matris modunda yapıştırıcı serbest

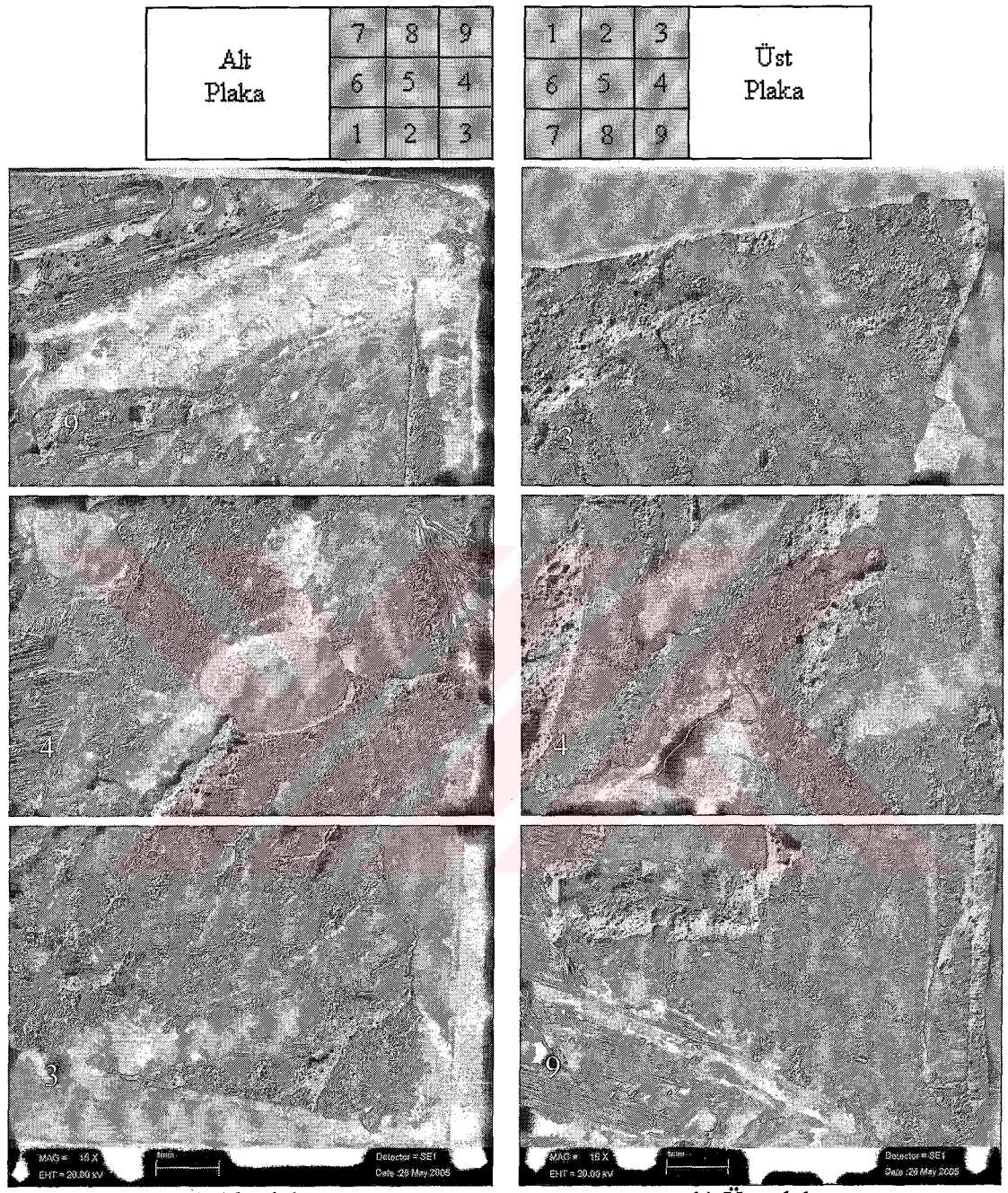
ucuna denk gelen kısımda başlamaktadır. Daha sonra delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında görülen hasar bu üç modda da gelişerek özellikle üst plakada yapıştırıcıya yakın olan 1. ve 2. katmanlarda matris modunda lif eksenine paralel olacak şekilde yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısmın sol tarafında yayılmaktadır (Şekil 4.36-40). Hashin kriterinin tahmin ettiği üst plakada yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısmın sol tarafında yoğunlaşan hasar kopmanın bu kısımdan matristen başlayacağını göstermektedir. 45° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme deneyinde de kopma, üst plakanın serbest ucuna denk gelen kısımdan bindirme bölgesinin içine doğru lif eksenine paralel şekilde olmuştur (Şekil 5-11). Böylece Hashin kriteri kopmanın başlangıcı tahmin etmiştir. Daha sonraki çalışmalarda hem yapıştırıcı hem de yapışanların nonlineer özellikleri göz önüne alınarak Hashin kırılma kriteri ile gerçeğe daha yakın sonuçlar tahmin edilebilir.

Üç nokta eğme deneyinde 90° lik bindirme bağlantısı üst plakadan yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan kopmuştur. Teorikte, Tsai-Wu kırılma kriteri 90° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme yükü altında hasarın sadece üst plakada, yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda başladığını ve bu hat boyunca iyice yayıldığını tahmin etmektedir (Şekil 4-19). Tsai-Wu kriteri 90° lik bindirme bağlantısının üç nokta eğme yükü altında hasarını tahmin etmiştir. Hashin kriterinde ise üst plakada matris modunda hasarın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda başlamıştır ve Tsai-Wu kriterinde olduğu gibi bu hat boyunca matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında yayılmıştır (Şekil 4.46-50). Hashin kriterinin tahmininde alt plakada son yükte uç kısımda delaminasyon, matris ve lif-matris ayrılması modlarında hasar oluşmaktadır. Hashin kırılma kriterinin tahmininde matris ve lif-matris ayrılması hasar modları etkin olduğu için deneyde matristen lif eksenine kopma olması Hashin kriterinin tahminini doğrulamaktadır. Tek fark kopma yüklerindedir ve teorikte tahmin edilen kopma yükleri deneydekinden düşüktür. Tsai-Wu kırılma kriteri kopmayı 25,6 N da, Hashin kırılma kriteri 33,4 N da tahmin ederken deneylerde 76 N da kopma olmuştur (Şekil 5-10). Sebebi malzeme özelliklerini düşürme modeli ile yapıştırıcı ve kompozit plakaların lineer elastik kabul edilmesidir.



a) Alt plaka b) Üst plaka

Şekil 5-12 0° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)

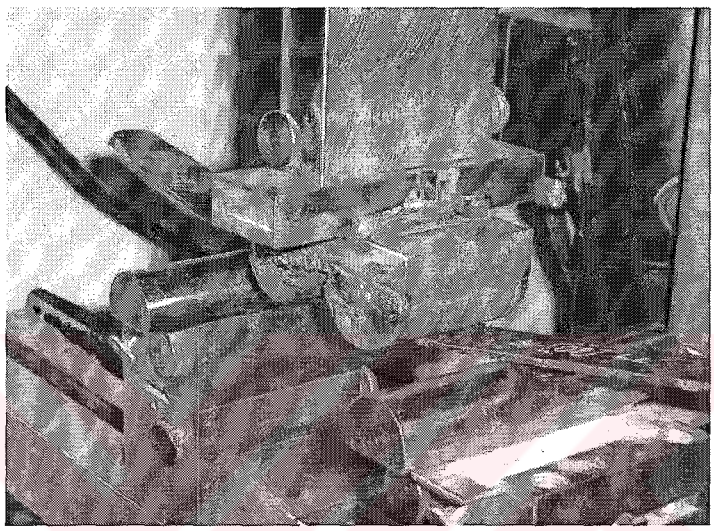


a) Alt plaka b) Üst plaka

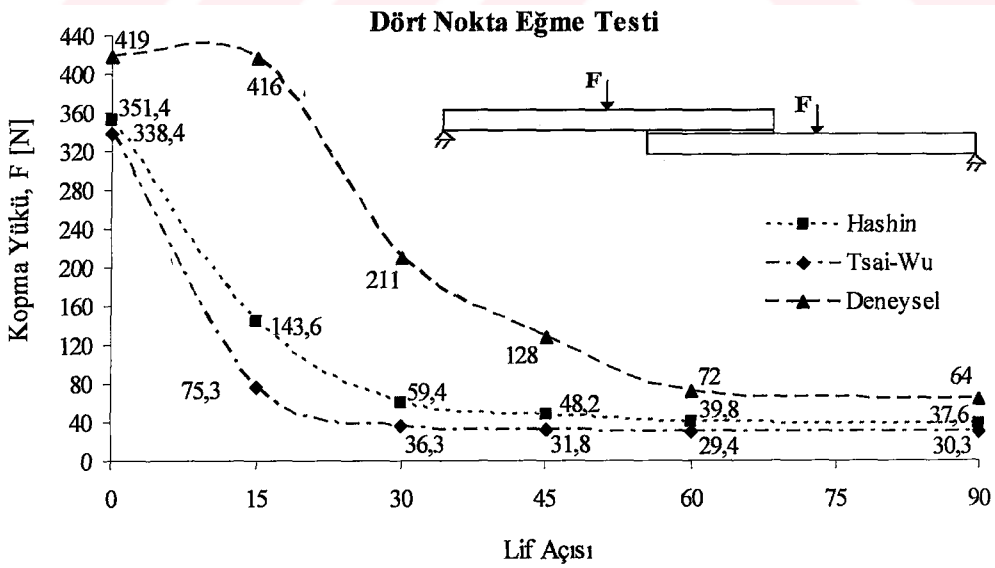
Şekil 5-13 15° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)

5.5 Tek Yönlü Kompozit Tek Bindirme Bağlantılarının Dört Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

ZWICK/Z050 test cihazında 0, 15, 30, 45, 60 ve 90° lik kompozit tek bindirme bağlantıların 2'şer adet numune ile ayrı ayrı dört nokta eğme testleri yapılmıştır (Şekil 5-14).



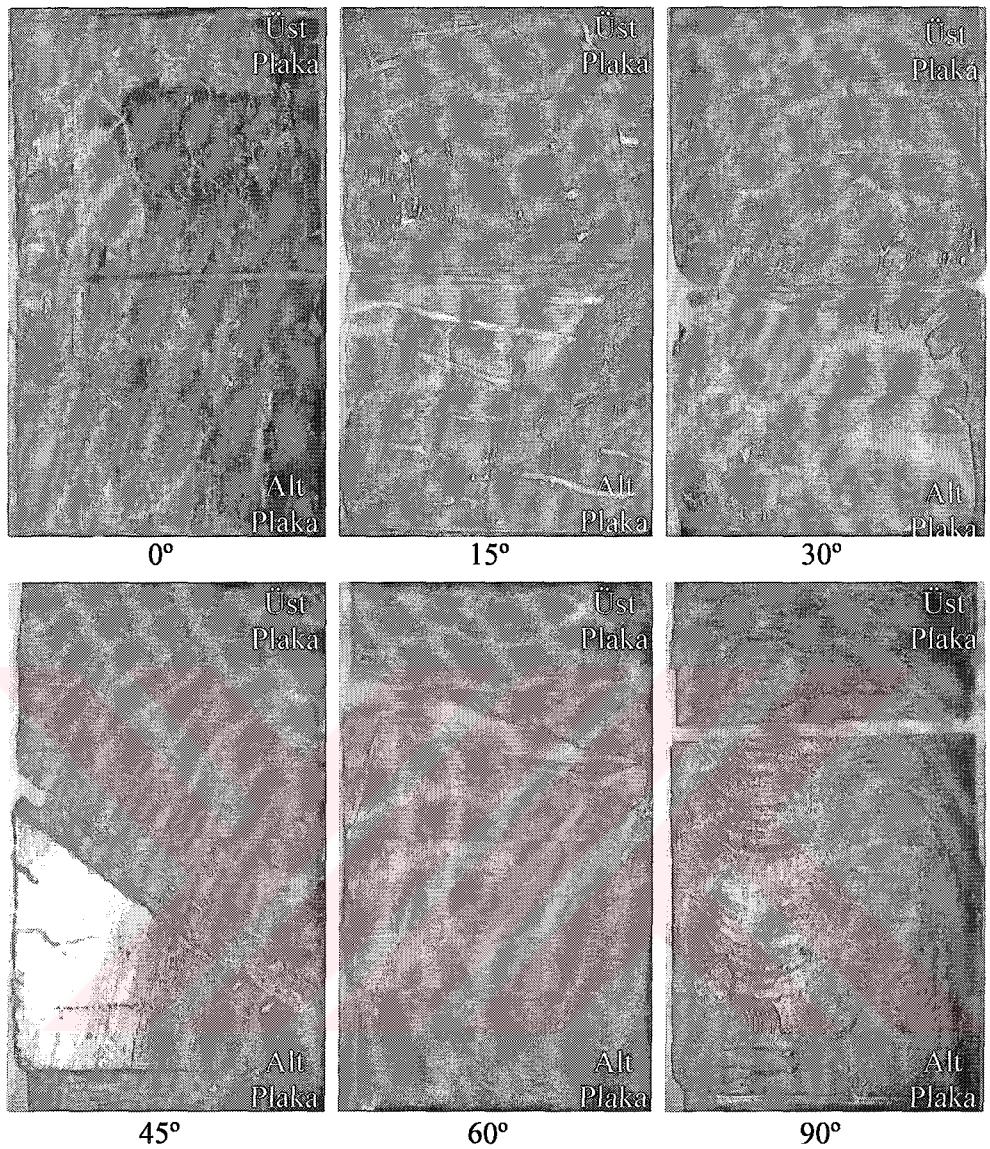
Şekil 5-14 Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantısının dört nokta eğme testi



Şekil 5-15 Dört nokta eğme yükü altında tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının lif açısına göre kopma yükü değişimleri

Şekil 5-15'de verilen grafik, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit tek bindirme bağlantılarının dört nokta eğme testi sonucunda son kopma yüklerinin her bir lif açısına göre değişimini göstermektedir. Tüm bindirme bağlantılarının deneysel kopma yükleri Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin tahmin ettiği kopma yüklerinden daha yüksektir. Teoride malzeme özelliklerini düşürme modelinde, malzemenin mekanik özelliklerinin aniden çok küçültülmesinden ve yapıştırıcının ve plakaların lineer elastik kabul edilmesinden dolayı bağlantılar deneylerde daha yüksek yüklerde kopmuştur.

Dört nokta eğme deneylerinde 0, 15 ve 30° lik bindirme bağlantıları yapıştırıcıdan koparken 45 ve 60° lik bindirme bağlantıları üst plakadan yapıştırıcı serbest ucu civarından lif eksenine paralel kopmuştur (Şekil 5-16). 45 ve 60° lik bindirme bağlantılarından farklı olarak 90° lik bindirme bağlantısı üst plakada yükün uygulandığı yerden (Şekil 3-26) kopmuştur. Hashin ve Tsai-Wu kırılma kriterlerinin teorik hasar tahminlerine göre bütün açılarda kopma plakalardan yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımdan olmuştur (Şekil 3.25-26 ve 4.57-79). Özellikle hasar üst plakada başlayıp gelişirken alt plakada son yüklerde plakanın uç kısmında hasar oluşmuştur. Bu durumda teorik olarak 45 ve 60° lik bindirme bağlantılarının hasarı tahmin edilmiştir. Analizlerde yapıştırıcı ve plakalarda lineer elastik kabullerle teorik tahminler yapıldığı için ve sadece kompozit plakaların hasarı incelendiği için deneylerde 0, 15 ve 30° lik bindirme bağlantılarının yapıştırıcıdan olan kopmaları tahmin edilememiştir. Bunun sebebi, bu lif açılı bindirme bağlantılarında liflerin dayanıklı olması ve eğme yükünün yapıştırıcıya daha fazla etki etmesidir. Üç nokta eğme deneyinde 30° lik bindirme bağlantısı plakadan koparken dört nokta eğme deneyinde yapıştırıcıdan kopması bu bindirme bağlantısını oluştururken yapışma işlemindeki hatadan kaynaklanmaktadır. Şekil 5-16'da 30° lik bindirme bağlantısının kırılma yüzeyini incelediğimizde, alt plakanın sağ ucunda yapıştırıcının plakaya tam nüfuz etmediği görülmektedir. Normalde 30° lik bindirme bağlantısında yapıştırıcı dört nokta eğme deneyinde üç nokta eğme deneyinden daha az etkilenmesi gerekir. Çünkü Şekil 3-30'da görüldüğü gibi dört nokta eğme durumunda bindirme bölgesinde kesme kuvveti sıfır olduğu için kayma gerilmelerinin etkisi ihmal edilebilecek seviyededir.



Şekil 5-16 Dört nokta eğme testinde kompozit tek bindirme bağlantılarının kırılma yüzeyleri

45° lik bindirme bağlantısı dört nokta eğme yükü altında 128 N da Şekil 5-16'da görüldüğü gibi üst plakadan yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan bindirme bölgesinin içine doğru lif eksenine paralel olarak kopmuştur. Tsai-Wu kırılma kriteri 45° lik bindirme bağlantısının üst plakadan yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısım boyunca 31.8 N da kopma olacağını tahmin etmiştir (Şekil 3-26). Hashin kırılma kriteri ise 45° lik bindirme bağlantısının üst plakadan matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımdan 48.2 N da kopacağını tahmin etmiştir. Fakat Hashin kriterinin tahminin de özellikle matris

modunda yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmın sol tarafında lif eksenine paralel olarak hasarın yoğunlaştığını tahmin etmiştir (Şekil 4.64-66). Bu durumda Hashin kriteri deneyde üst plakadan yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan bindirme bölgesinin içine doğru lif eksenine paralel olarak kopmanın başlangıcını tahmin etmiştir. Daha sonraki çalışmalarda hem yapıştırıcı hem de yapışanların nonlineer özellikleri göz önüne alınarak Hashin kırılma kriteri ile gerçeğe daha yakın sonuçlar tahmin edilebilir.

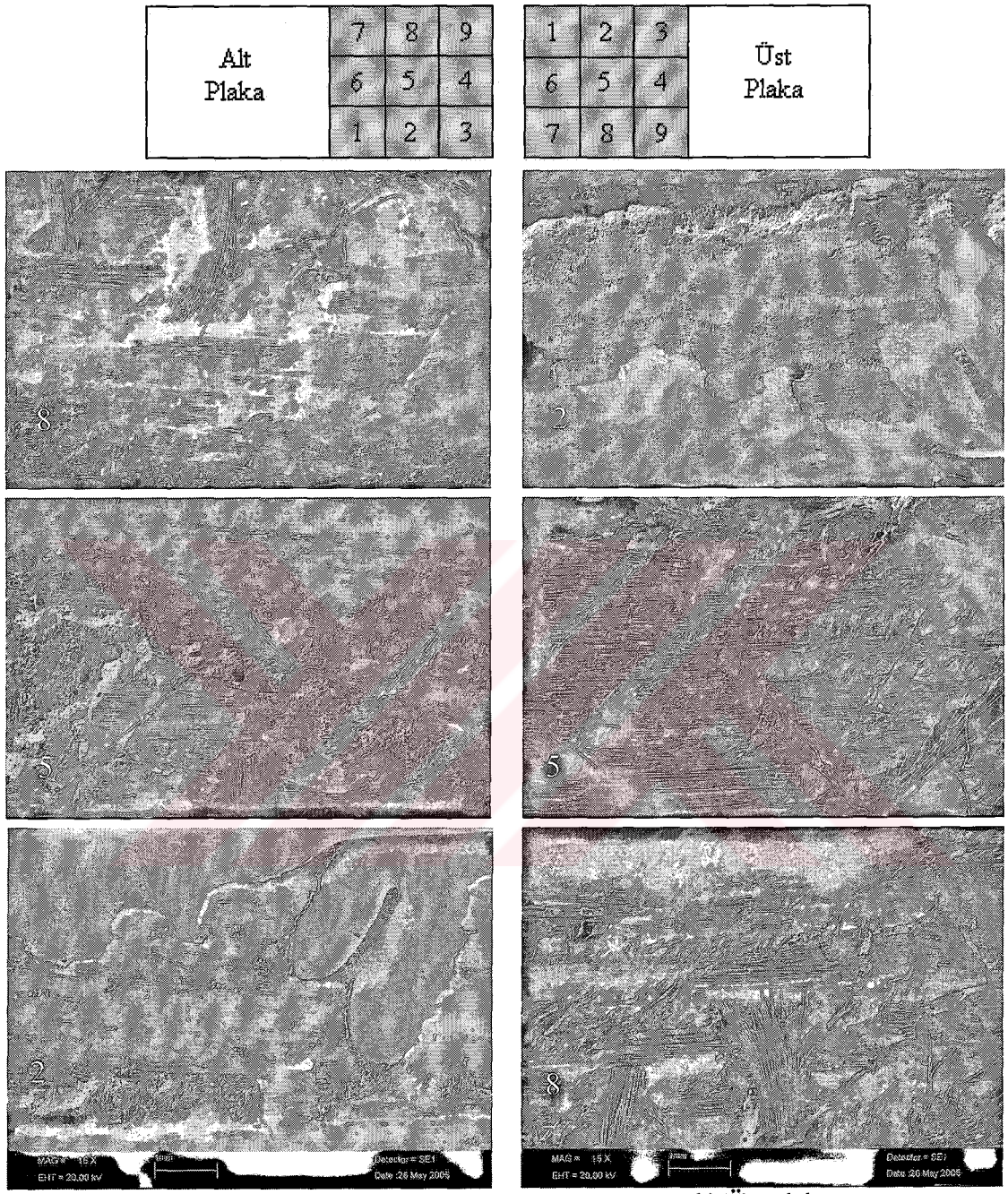
90° lik bindirme bağlantısının dört nokta eğme yükü altında yükü altında hasarını Tsai-Wu kırılma kriteri üst plakada yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmın ortasında başlayıp bu hat boyunca yayıldığını tahmin etmiştir (Şekil 3-26). Hashin kriteri hasarın matris modunda yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımda başladığını ve matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarında yapıştırıcı serbest ucu boyunca yayılıp 37.6 N da koptuğunu tahmin etmiştir (Şekil 4.70-74). Ayrıca son yükte alt plakada matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması modlarında plakanın uç kısmında ve serbest tarafında hasarlar tespit etmiştir. Oysa ki, 90° lik bindirme bağlantısının dört nokta eğme deneyinde bağlantı yükün uygulandığı yerden kopmuştur. Bunun nedeni; 90° lik lif açısına sahip bindirme bağlantılarının dayanımının en düşük olması ve bindirme bölgesinde kesme kuvvetinin sıfır olması ile eğme yükünün yapıştırıcıdan çok uygulandığı yerde plakaya etki etmesidir.

0° lik bindirme bağlantısının dört nokta eğme yüküne maruzken oluşan hasarın teorik tahmininde, Tsai-Wu kırılma kriteri üst plakada yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda hasarın başlayıp iyice yayıldığını ve alt plakada da son yüke yakın uç kısımda çok az bölgede geliştiğini tahmin etmiştir (Şekil 3-25). Hashin hasar kriteri ise hasarı üst plakada matris modunda kompozit yapışanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında başlayıp bindirme bölgesinin içine doğru ilerleyip matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında bindirme bölgesinde yayıldığını tahmin etmiştir (Şekil 4.57-59). Ayrıca son yüke doğru alt plakada yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısım da hasarlar başlamış ve son yükte matris, delaminasyon ve lif-matris ayrılması hasar modlarında bağlantı kopmuştur. Teorik tahminler gösteriyor ki, 0, 15 ve 30° gibi dayanımı yüksek lif açılarına sahip bindirme bağlantılarında dört nokta eğme yükleri yapıştırıcıyı daha fazla etkilemektedir. Teorikte, yapışanların kırılmaları ile birlikte yapıştırıcının dayanımını düşünerek ve kompozit yapışanlar ile yapıştırıcının nonlineer

özelliklerini de dikkate alarak tek bindirme bağlantılarında kopma gerçeğe daha yakın tahmin edilebilir.

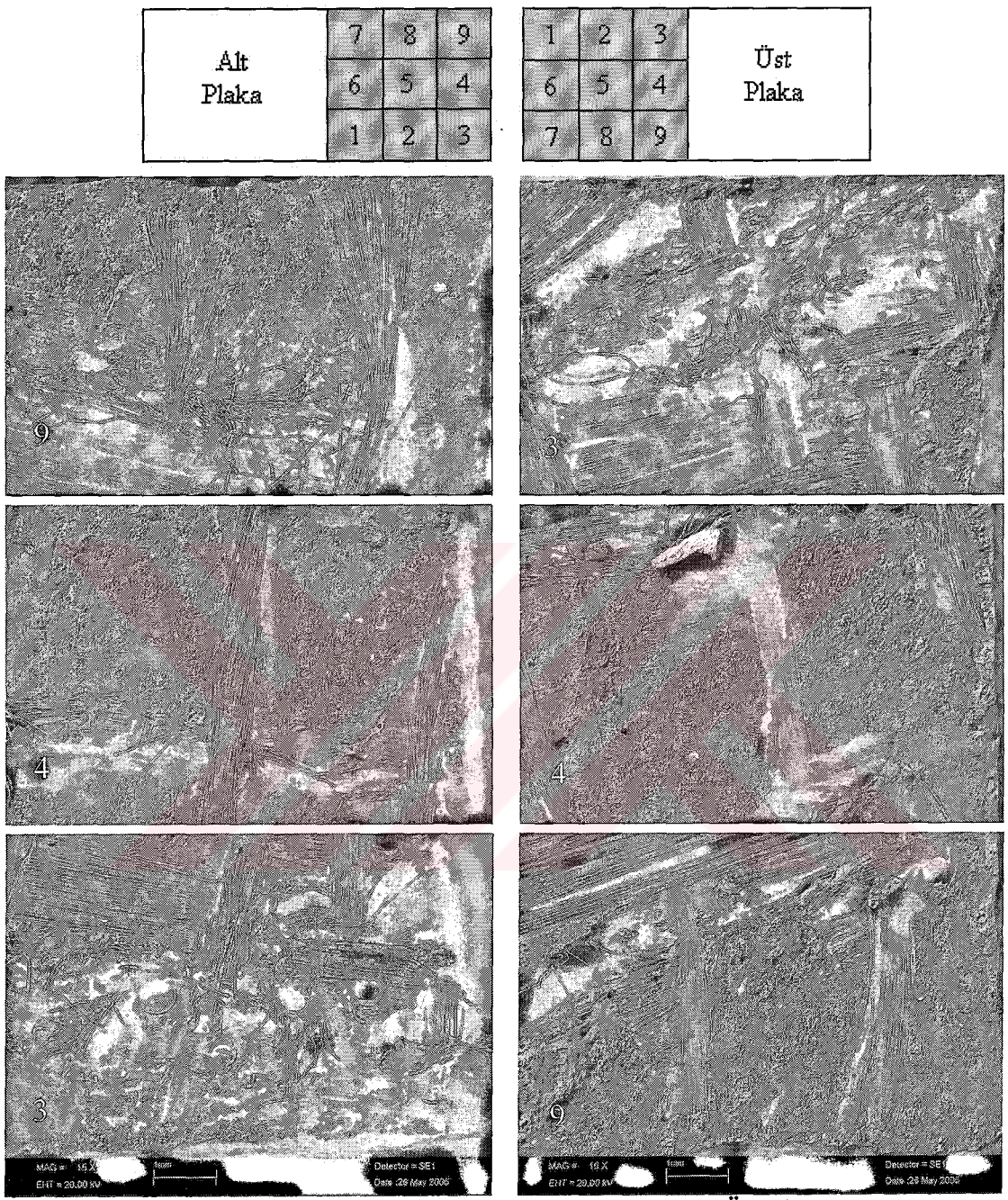
0° lik bindirme bağlantısının dört nokta eğme testi sonucu Şekil 5-16'daki kopma resmini incelediğimizde, bindirme bölgesinin sol tarafında yapıştırıcının yapışana iyi nüfuz etmemesinden dolayı yük bindirme bölgesinin sağ tarafına daha fazla etki yapmıştır. Üst plakanın uç kısmında kopma yapışan-yapıştırıcı ara yüzeyinde olmuştur. Üst plakanın bindirme bölgesinin ortasında yapışana giren hasar yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmın sağ tarafına kadar yapışandan ilerlemiştir. Şekil 5-17'de 0° lik bindirme bağlantısının alt ve üst plakalarının bindirme bölgesi ortasında 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin SEM resimleri görülmektedir. 0° lik bindirme bağlantısında 2, 5 ve 8 nolu bölgeler hasarın yapıştırıcıdan yapışana ilerlediği bölgelerdir. Bu bölgelerin SEM resimleri incelendiğinde, hasarın plakanın en üstündeki matris tabakasını sıyırdığı görülmektedir.

15° lik bindirme bağlantısının dört nokta eğme deneyinde hasar, üst plakanın yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısmında yapıştırıcı yapışan ara yüzeyinde başladıktan sonra yapışanın içine girerek üst plakanın uç kısmına kadar yapışanın içinde devam etmiştir (Şekil 5-16). 15° lik bindirme bağlantısının 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin SEM resimlerini incelediğimizde, hasarın yapışanda üç nokta eğme deneyindeki gibi derine girmediği görülmektedir (Şekil 5-18). Dört nokta eğme testinde bindirme bölgesinde kesme kuvveti sıfır olduğu için yük yapıştırıcıya üç nokta eğme testindeki gibi etki etmediğinden hasar yapışana da fazla zarar vermemiştir. 30° lik bindirme bağlantısında ise hasar üst plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında yapışma kusurlarından dolayı hasar yapışan-yapıştırıcı ara yüzeyinde başlamış ve ara yüzeyden ilerleyerek alt plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısmında yapışana girmiştir (Şekil 5-16). Şekil 5-19'da 30° lik bindirme bağlantısının yapışanın hasar gördüğü 1, 6 ve 7 nolu bölgelerinin SEM resimleri verilmiştir. Bu resimlerden de görüldüğü gibi üst plakanın yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda hasar yapışana girmiştir.



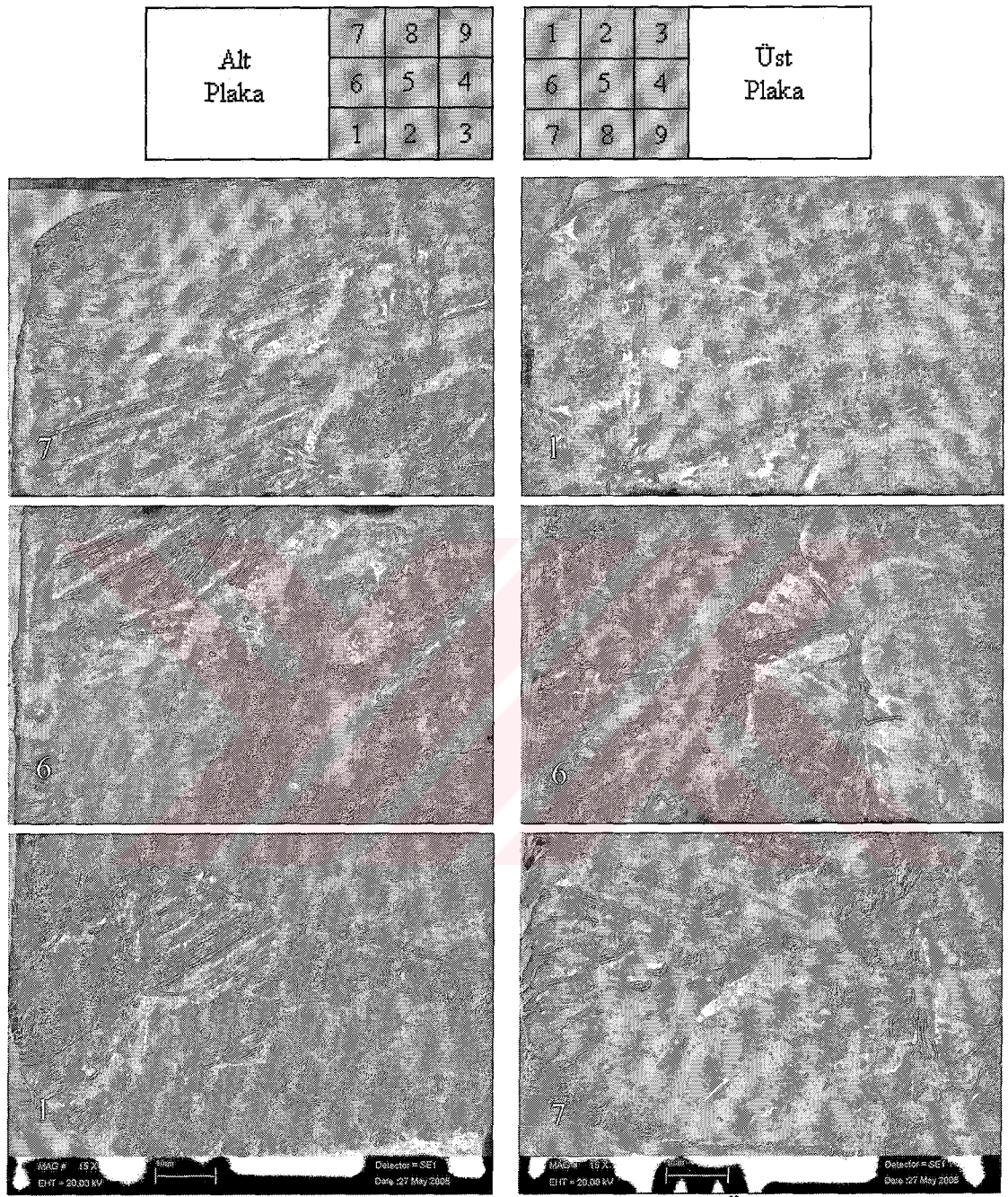
a) Alt plaka b) Üst plaka

Şekil 5-17 0° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 2, 5 ve 8 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)



a) Alt plaka b) Üst plaka

Şekil 5-18 15° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 3, 4 ve 9 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)



a) Alt plaka b) Üst plaka

Şekil 5-19 30° lik bindirme bağlantısında a) alt plakanın b) üst plakanın 1, 6 ve 7 nolu bölgelerinin kırılma yüzeyleri (15x)

BÖLÜM 6

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek yönlü kompozit tek bindirme bağlantılarının hasar davranışlarını tespit etmek amacıyla çekme ve eğme yükleri altında bindirme bölgesi civarında ilk hasar oluşumu ve bu hasarın gelişimi incelenmiştir. Hasar analizinde sürekli ortamlar mekaniğine dayanan *meso-scale yaklaşımı* kullanılarak hasar modeli oluşturulmuş ve sonlu elemanlar metodu yardımıyla probleme uygulanmıştır. Bağlantının geometrisinden dolayı ortaya çıkan lineersizlikler ve kullanılan malzemenin elastik-plastik özellikleri dikkate alınmamakla birlikte yapıştırıcı elastik ve büyük plastik şekil değiştirmelere dayanır kabul edilmiştir. Kompozit tek bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerini belirlemek için üç önemli deney olan çekme, üç nokta ve dört nokta eğme deneylerinin yapılabilmesi için tek yönlü karbon lifler ile epoksi reçine birleştirilerek istenilen lif açılarına sahip kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen bu plakalar ile Araldite 2015 yapıştırıcı kullanılarak tek bindirme bağlantıları imal edilip 50 kN kapasiteli test cihazında çekme, üç nokta eğme ve dört nokta eğme testleri yapılmıştır. Test sonucunda kırılma yüzeyleri SEM yardımıyla incelenerek hasar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Hasar analizlerinde kompozit malzemelerin kırılma kriterlerinden Tsai-Wu ve Hashin kriterleri kullanılmıştır. Kompozit kırılma kriterleri, kompozit yapının maruz kalabileceği yükler altında nasıl bir hasar davranışı sergileyeceğini önceden tahmin ederek bu davranışa göre yapıyı daha dayanıklı tasarlamak için kullanılır. Bu kriterlerin farklılığı hasarı ele alış biçimindedir. Tsai-Wu kırılma kriteri hasarı global olarak ele alır ve bir polinominal denklem yardımıyla hasarı tahmin etmeye çalışır. Hashin kırılma kriteri ise hasarı, yapı bileşenlerinde matris ve lifte oluşabilecek olumsuzluklara göre modlara ayırarak tahmin eder. Bu olumsuzlukların en önemlileri matris çatlakları, katmanların birbirinden ayrılması, matrisin liften sıyrılması ve lif kopmasıdır.

Bu iki hasar kriteri ile 0, 15, 30, 45, 60 ve 90° lik lif açılarına sahip kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme, üç nokta eğme ve dört nokta eğme testleri sonucunda plakaların yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımlarında gerilme yığılmalarından dolayı hasar oluştuğu tahmin edildi. Bu kriterler ile çekme testinde hasarların özellikle alt plakada, eğme testlerinde ise üst plakada daha fazla yayıldığı tahmin edildi. Tsai-Wu kırılma kriteri tüm bağlantılarda hasarı plaka yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımda tahmin ederken Hashin kırılma kriteri yapıştırıcıya yakın olan katmanlarda matris hasar modunda yapıştırıcı serbest ucuna denk gelen kısımda sol tarafta lif açısına paralel olacak şekilde yoğunlaştığını tahmin etti. Özellikle 45° lik bindirme bağlantılarında bu durum daha belirgin olarak ortaya çıktı.

Teorikte bu tahminler yapılırken kompozit tek bindirme bağlantılarının çekme deneyinde 0 ve 15° lik bindirme bağlantıları yapıştırıcıdan 30, 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantıları ise teorik tahmindeki gibi alt plakadan koptu. Üç nokta eğme deneyinde çekme deneyindeki gibi 0 ve 15° lik bindirme bağlantıları yapıştırıcıdan 30, 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantıları ise üst plakadan koptu. Dört nokta eğme deneyinde ise 0, 15 ve 30° lik bindirme bağlantıları yapıştırıcıdan koparken 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantıları ise üst plakadan koptu. 30, 45, 60 ve 90° lik bindirme bağlantılarının deneylerinde kopma, yapıştırıcı serbest ucuna gelen kısımdan lif eksenine paralel olarak matristen olmuştur.

Deneylerde plakalardan kopan bağlantıların plakaların yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan kopması teorik tahminlerde Tsai-Wu ve Hashin kriterlerinin tahmin ettiği bu bölgelerde hasar yayılmasını doğrulamıştır. Özellikle 45° lik bindirme bağlantılarında tüm deneylerde bağlantıların plakaların yapıştırıcı serbest ucuna tekabül eden kısımdan lif eksenine paralel matristen kopması Hashin kırılma kriterinin bindirme bağlantıları için hasar başlangıcını tahmin etme konusunda yaptığı tahminleri doğrulamaktadır. Fakat teorikte tahmin edilen kopma yükleri deneylerdeki kopma yüklerinden daha düşük çıkmıştır. Bu duruma sebep hasar analizinde malzeme özelliklerinin aniden çok küçültülmesi ve bindirme bağlantılarının bileşenleri olan plakaların ve yapıştırıcının lineer elastik kabul edilmesidir.

Yapıştırıcıdan kopan bindirme bağlantıları ise değişik lif açılı kompozit bindirme bağlantıları içinde dayanımı en yüksek olan bağlantılar olduğu için uygulanan yükün

yapıştırıcıya daha fazla etki etmesine sebep olmaktadır ve bu nedenle 0, 15 ve 30° lik bindirme bağlantıları yapıştırıcıdan kopmuştur. Bu durumda kompozit yapışanların ve yapıştırıcının nonlineer özelliklerinin hasar analizinde dikkate alınması ile daha gerçekçi neticeler elde edilebilecektir.

Takip eden çalışmalarda kompozit bindirme bağlantıların, kompozit yapışanların ve yapıştırıcının hem geometrik bakımdan hem de bağlantıyı oluşturan malzemelerden kaynaklanan lineersizlikler dikkate alınarak hasar analizleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yapıcı A., Şahin Ö. S., ([30,-30]s) Fiber Takviyeli Tabakalı Termoplastik Kompozit Levhalarda Delik-Kenar Arasında Oluşan Elasto-Plastik Gerilmeler, Mühendis ve Makine, 519, 2003.
2. Kam T.Y., Lai F.M., Experimental and Theoretical Predictions of First-Ply Failure Strength of laminated Composite Plates, Int. J. of Solids and Structures, 36, 2379-2395, 1999.
3. Engin A., "Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bindirme Bağlantılarında Hasar Bölgesi Oluşumu ve Gelişiminin İncelenmesi", Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2003.
4. Volkersen O., Die Nietkraftverteilung in Zugbeansprunchten Nietverbindungen Mit Konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, 15, 41-47, 1938.
5. Goland M. and Reissner E., The Stresses in Cemented Joints, Transactions of ASME, J. of Applied Mechanics, 11(3), A17-A27, 1944.
6. Benson N.K., Influence of Stress Distribution on Joint Strength, Adhesion-Fundamentals and Practice, UK Ministry Technology, Mclaren, London, 191, 1969.
7. Hart-Smith L.J., McDonnell-Douglas Co. Report No: 6059A, California, 1972.
8. Hart-Smith L.J., Adhesive Bonded Single Lap Joints, NASA, CR122236, 1973.
9. Hart-Smith L.J., NASA CR112236, Langley Research Centre, Virginia, 1973.
10. Hart-Smith L.J., NASA CR122237, Langley Research Centre, Virginia, 1973.
11. Hart-Smith L.J., NASA CR122238, Langley Research Centre, Virginia, 1973.
12. Hart-Smith L.J., NASA CR 2218, Langley Research Centre, Virginia, 1974.
13. Hart-Smith L.J., Developments in Adhesives - 2, A.J. Kinloch (Ed.), 1-44, Elsevier Applied Science, London, 1981.

14. ESDU 78042, Shear Stresses in the Adhesives in Bonded Joints, Single Step Double Lap Joints Loaded in Tension, Engineering Sciences Data Unit, London, 1979.

15. ESDU 79016, In Elastic Shear Stresses and Strains in the Adhesive Bonding Lap Joints Loaded in Tension or Shear, Engineering Sciences Data Unit, London, 1979.

16. Haris J.A., Adams R.D.,The Impact Strength of Adhesive Lap Joints, Proceedings of the International Symposium Adhesive Joints, Kansas City, 611-626, 1982.

17. Adams R.D., Haris J.A., The Influence of Local Geometry on Strength of Adhesive Joints, International Journals of Adhesion and Adhesives, 7(2), 69-80, 1987.

18. Apalak M.K., Engin A., Geometrically Non-Linear Analysis of Adhesively Bonded Double Containment Cantilever joints, Journal of Adhesion Science Technology, 11(9), 1153-1195, 1997.

19. Turvey G.J., An Initial Flexural Failure Analysis of Symmetrically Laminated Cross-Ply Rectangular Plates, International Journals of Solid Structures., 16, 451-463, 1980.

20. Turvey G.J., Flexural Failure Analysis of Angle-Ply Laminates of GFRP and CFRP, Journal of Strain Analysis, 15, 43-49, 1980.

21. Turvey G.J., A Study of the Onset of Flexural Failure Analysis in Cross-Ply Laminated Strips, Fibre Science Technology, 13, 325-336, 1980.

22. Turvey G.J., Initial Flexural Failure of Square, Simply Supported, Angle-Ply Plates, Fibre Science Technology, 15, 47-63, 1981.

23. Reedy J.N., Pandey A.K., A First-Ply Failure Analysis of Composite Laminates, Computers and Structures, 25, 371-393, 1987.

24. Reedy Y.S.N., Reedy J.N., Linear and Non-Linear Failure Analysis of Composite laminates with Transverse Shear, Composite Science Technology, 44, 227-255, 1992.

25. Kılıc, H., Haj-Ali, R., Progressive Damage and Nonlinear Analysis of Pultruded Composite Structures, Composites Part B, 34, 235-250, 2003.

26. Kılıc, H., Haj-Ali, R., Elastic-Degrading Analysis of Pultruded Composite Structures, Composites Structures, 60, 43-55, 2003.

27. Haj-Ali, R., Kılıc, H., Non-linear Behavior of Pultruded FRP Composite, Composites Part B, 33, 173-191, 2002.

28. Haj-Ali, R., Kılıc, H., Nonlinear Constitutive Models for Pultruded FRP Composites, Mechanics of Materials, 35, 791-801, 2003.

29. Kwon Y.W., Berner J.M., Micromechanics Model for Damage and Failure Analyses of Laminated Fibrous Composites, Engineering Fracture Mechanics, 52(2), 231-242, 1995.

30. Jones F.R., Micromechanics and Properties of Fiber Composites, Composite Materials in Aircraft Structures, , 69-92, 1990.

31. Hashin Z., Rosen B.W., The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials, Journal of Applied Mechanics, 21, 223-232, 1964.

32. Crocombe A.D., Global Yielding as a Failure Criterion for Bonded Joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 9(3), 167-178, 1989.

33. Suo Z., Failure of Brittle Adhesive Joints, Appl. Mech. Rev., 5(2), 276-279, 1990.

34. Lee S.M., An in-situ Failure Model for Adhesive Joints, Journal of Adhesion, 18, 1-15, 1985.

35. Ferlund G., Papini M., McCammond D., Spelt J.K., Fracture Load Predictions for Adhesive Joints, Composites Science Technology, 51, 587-600, 1994.

36. Sheppard A., Kelly D., Tong L., A Damage Zone Model for The Failure Analysis of Adhesively Bonded Joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 18, 385-400, 1998.

37. Owens J.F.P., Lee-Sullivan P., Stiffness Behaviour Due to Fracture in Adhesively Bonded Composite to Aluminium Joints I. Theoretical Model, International Journal of Adhesion and Adhesives, 20, 39-45, 2000.

38. Owens J.F.P., Lee-Sullivan P., Stiffness Behaviour Due to Fracture in Adhesively Bonded Composite to Aluminium Joints II. Experimental, International Journal of Adhesion and Adhesives, 20, 39-45, 2000.

39. Cheuk P.T., Tong L., Wang C.H., Baker A., Chalkley P., Fatigue Crack Growth in Adhesively Bonded Composite-Metal Double lap Joints, Composite Structures, 57, 109-115, 2002.

40. Cheuk P.T., Tong L., Failure of Adhesive Bonded Composite Lap Shear Joints with Embeded Precrack, Composite Science and Technology, 62, 1079-1095, 2002.

41. Kayupov M., Dzenis Y.A., Stress Concentrations Caused by Bond Cracks in Single Lap Adhesive Composite Joints, Composite Structures, 54, 215-220, 2001.

42. Qin M., Dzenis Y.A., Analysis of Single Lap Adhesive Composite Joints with Delaminated Adherends, Composites Part B, 34, 167-173, 2003.

43. Chen B., Dillard D.A., Numerical Analysis of Directionally Unstable Crack Propagation in Adhesively Bonded Joints, International Journal of Solids and Structures, 38, 6907-6924, 2001.

44. Spootswod S.M., Palazotto A.N., Progressive Failure Analysis of A Composite Shell, Composite Structures, 53, 117-131, 2001.

45. Ambur R.D., Jaunky N., Hilburger M., Dàvila C.G., Progressive Failure Analyses of Compression-Loaded Composite Curved Panels With and Without Cutout, Composite Structures, 65, 143-155, 2004.

46. Jones R.M., Mechanics of Composite Materials, Hemisphere Publishing Copporation, New York, 1975.

47. Chawla K. K., Composite Materials, Second Edition, Springer Press, New York, 1998.

48. Hull D., An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge, 1981.

49. Datoo M. H., Mechanics of Fibrous Composites, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1991.

50. Daniel I. M. and Ishai O., Engineering Mechanics of Composite Materials, Second Edition, Oxford University Press, 2005.

51. Şahin Y., Kompozit Malzemelere Giriş , Gazi Üniversitesi, Ankara, 2000.

52. Reedy J.N, Mechanics of Laminated Composite Materials (Theory and Analysis), CRC Press, Boca Raton, 1997.

53. Güneş R., "Çok Katmanlı ve Fonksiyonel Kademelendirilmiş Kompozit Plakalarda Isıl Artık Gerilmelerin Analizi" Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005.
54. Lin W., Hu H., Nonlinear Analysis of Fiber-Reinforced Composite Laminates Subjected to Uniaxial Tensile Load, Journal of Composite Materials, 36, 1429-1450, 2002.
55. Ochoa O. O., Reedy J. N., Finite Element Analysis of Composite Laminates, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston and London, 1992.
56. Crocombe A.D., The Nonlinear Stress and Failure Analysis of Adhesive Tests, PhD Thesis, University of Bristol, 1981.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Ankara'da doğdu. İlköğrenimimi Konya 23 Nisan İlkokulu'nda, orta öğrenimimi Kayseri 50.Yıl Dedeman Ortaokulu'nda, liseyi de Ankara Anadolu Meteoroloji Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü bünyesinde Trabzon Havaalanı'nda memuriyete başladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. İki sene hem Trabzon Havalimanı'nda çalışıp hem de Makine Mühendisliği lisans eğitimine devam etti. 2000 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 3. sınıfına yatay geçiş yaptı. Aynı zamanda Kayseri Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'ne tayin oldu ve Erkilet 12. Havaüssü'nde çalışmaya başladı. 2002 yılında Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden dördüncülük ve İYİ derece ile mezun oldu. Aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaya başladı. Halen Kayseri Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nde mühendis olarak çalışmakta ve yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

Adres:
Beyazşehir Mah. 823.Sokak Çağrı Apt.
No: 13/31 38350
Kocasinan / KAYSERİ

E-Mail: 1030115351@erciyes.edu.tr