

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇÖZÜLEBİLEN BAĞLANTILI KOMPOZİT
PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ**

Kadir TURAN

**Tez Yöneticisi
Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ, 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇÖZÜLEBİLEN BAĞLANTILI KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ

Kadir TURAN

Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 18-06-2009 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

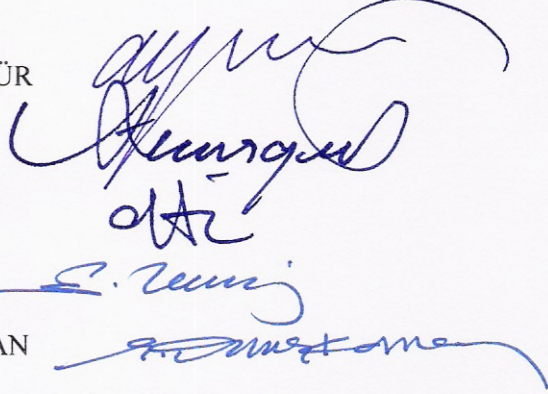
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

Üye: Prof.Dr. Aydın TURGUT

Üye: Prof.Dr. Yusuf CALAYIR

Üye: Doç. Dr. Şemsettin TEMİZ

Üye: Yrd. Doç.Dr. Mete Onur KAMAN



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET

Doktora Tezi

ÇÖZÜLEBİLEN BAĞLANTILI KOMPOZİT PLAKALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ

Kadir TURAN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

2009, Sayfa : 171

Çözülebilir bağlantılı kompozit plakaların mekanik davranışlarının analizi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çift tesirli pim bağlantılarının kullanıldığı çalışmada epoksi reçine matrisli ve tek yönlü karbon fiberler ile takviye edilmiş dört tabakalı kompozit levhalar kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmada fiber takviye açısının, tabaka diziliminin, geometrik parametrelerin (E/D, W/D) ve hasar yükünün değişimine bağlı olarak mekanik davranışlar incelenmiştir. Simetrik ($[0^\circ/\theta^\circ]_s$) ve anti – simetrik ($[0^\circ/\theta^\circ]_2$) tabaka dizilimine sahip levhalar için θ fiber takviye açısı 0° 'den başlamak üzere 90° 'ye kadar 15° 'lik aralıklarla değiştirilmiştir. Geometrik parametreler; pim deliği merkezi ile levha kenarı arasındaki uzunluğun (E), pim deliği çapına (D) oranı $E/D = 1 - 5$ ve levha genişliği (W) ile pim deliği çapının oranı ise $W/D = 2 - 5$ şeklinde seçilerek çözüm yapılmıştır. Sayısal çalışma, üç boyutlu sonlu eleman tipi (Solid 46) seçilerek ANSYS programında, ilerlemeli hasar analizi metodu kullanılarak yapılmıştır. Sayısal sonuçlar APDL kodları kullanılarak yazılmış olan alt programın Ansys programıyla birlikte çalıştırılması ile elde edilmiştir. İlerlemeli hasar analizi metodunda Hashin hasar teorisi, malzeme indirgeme kuralları ile birlikte kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışmalar sonucunda mekanik davranışların geometrik parametrelere, fiber takviye açısına ve tabaka dizilimine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Hasar oluşumunu ve tipini etkileyen en önemli parametrenin geometrik parametre (E/D) olduğu görülmüştür. Elde edilen sayısal ve deneysel çalışma sonuçları grafikler ile verilerek gerekli irdelemeler yapılmıştır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasındaki yaklaşım oranının literatürde yer alan çalışma değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Tabakalı kompozit levhalar, Çözülebilir bağlantılar, Sonlu elemanlar metodu , İlerlemeli hasar analizi metodu.

ABSTRACT

PhD. Thesis

MECHANICAL BEHAVIOR ANALYSIS OF RESOLVABLE JOINTS COMPOSITE PLATES

Kadir TURAN

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

2009, Page : 171

Mechanical behaviors of resolved joints composite plates were investigated by using both experimental and numerical methods. Four layered laminated composite plates, consisted of epoxy matrix resin reinforced uni – directional carbon fiber were used. Connection type double lap pin joint was used. The effects of fiber orientation angle, ply arrangements, geometrical variable and failure load variation on the mechanical behaviors were investigated. Variation of fiber orientation angle and ply arrangement were analyzed in the symmetric ($[0^\circ/\theta^\circ]_s$) and anti-symmetric ($[0^\circ/\theta^\circ]_2$) laminae configurations. Fiber orientation angle, θ , varies from 0° to 90° with 15° increments. The distance of the free edge of the plate (E) to the diameter (D) of the hole ($E/D=1-5$) and the width of rectangular plate (W) to the diameter of the hole $W/D=(2-5)$ were used as the parametric geometrical variables. Numerical study was performed by using prograssive failure analysis method by preparing three dimensional element (Solid 46) with ANSYS finite element programme. In the numerical results, initially, APDL codes were written and then these codes were run in ANSYS program and satisfactory results were obtained. In the prograssive failure analysis method, Hashin failure theory was used with material property degradation rules. Results of numerical and experimental analysis showed that the variation of mechanical behaviors depended on the geometrical parameters, fiber orientation angle and ply arrangements. It is seen that (E/D) geometrical variable is the most important parameter which affects the failure fomation and types. Obtained results from numerical and experimental studies were presented with graphs and required discussions were done. Agreement between the results of numerical and experimental study was well-matched with the those in literature.

Keywords: Laminated composite plates, Fastened joints, Finite element method, Prograssive failure analysis method.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın oluşmasında her türlü yardımı gösteren, çalışmaya büyük katkı sağlayan ve bana çalışmalarında yol gösteren Tez Danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Mustafa GÜR Hocam' a sonsuz teşekkür eder saygılar sunarım.

Engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve her türlü konuda büyük desteğini gördüğüm Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof.Dr. Aydın TURGUT Hocam' a teşekkür eder ve saygılar sunarım.

Tezin ilerlemesinde ilgisini benden esirgemeyen Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Öğretim Üyeleri Sayın Prof.Dr. Yusuf CALAYIR Hocam' a, Sayın Yrd.Doç.Dr. Muhammet KARATON Hocam' a ve sağlamış olduğu Laboratuar ve Teknik donanımlardan dolayı Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof.Dr. Ali İNAN Hocam' a teşekkür eder ve saygılar sunarım.

Çalışmalarında bana yol gösteren Mekanik Ana Bilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Yrd.Doç.Dr. Mete Onur KAMAN Hocam' a ve yardımlarından dolayı Sayın Uzman Dr. M. Yavuz SOLMAZ' a sonsuz teşekkür ederim.

Deney numunelerinin hazırlanmasında ilgisi ve emeği bulunan Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuar Teknisyenlerine teşekkür ederim.

Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Bölüm Başkanı Sayın Yrd.Doç.Dr. Erol KILIÇKAP Hocam' a ve Mekanik Anabilim Dalı Başkanı Sayın Yrd.Doç.Dr. Tamer ÖZBEN Hocam' a ve Tüm Öğretim Üye ve Elemanlarına teşekkür ederim.

Tez konusunun belirlenmesinde yardımcı olan, literatüre kazandırdıkları çalışmalarından yararlandığım ve laboratuar imkanlarından istifade ettiğim Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Ana Bilim Dalı Başkanı Sayın Prof.Dr. Onur SAYMAN ve Mekanik Ana Bilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU Hocalarıma ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür eder saygılar sunarım.

Tez çalışmasında kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve üretilmesini sağlayan FÜBAP' a ve İzoreel A.Ş.' ne ayrıca ANSYS programının temini konusunda yardımcı olan FİGES A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bana varlıkları ile manevi destek olan Eşim Gülay TURAN' a ve çocuklarıma sonsuz teşekkür ederim.

Kadir TURAN
Makine Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
	No:
ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XVII
SİMGELER LİSTESİ	XVIII
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ	16
4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ	22
4.1. Gerilme Analizi	22
4.1.1. Fiber takviye açısının gerilme – şekil değiştirme bağıntılarına etkisi	27
4.1.2. Tabakalı kompozit malzemelerde gerilme analizi	29
4.2. Sonlu Elemanlar Metodu İle Gerilme Analizi	35
4.3. Hasar Analizi	39
4.3.1. Maksimum Gerilme Hasar Teorisi	40
4.3.2. Tsai - Hill Hasar Teorisi	41
4.3.3. Tsai- Wu Hasar Teorisi	42
4.3.4. Hashin Hasar Teorisi	42
5. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ	46
5.1. Çekme Deneyleri	47
5.1.2. Fiber takviye doğrultusunda çekme deneyi	47
5.1.2. Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekme deneyi	49
5.2. Basma Deneyi	50
5.3. Kayma Deneyi	52
6. ÇÖZÜLEBİLİR BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE MEKANİK DAVRANIŞLARIN DENEYSEL OLARAK TESPİTİ	56
6.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması	56

6.2. Deneyde Kullanılan Materyal ve Metot	58
6.3. Deney sonuçları	61
6.3.1. $[0^\circ]_4$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	62
6.3.2. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	65
6.3.3. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	68
6.3.4. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	71
6.3.5. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	74
6.3.6. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	77
6.3.7. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	80
6.3.8. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	83
6.3.9. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	86
6.3.10. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	89
6.3.11. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	92
6.3.12. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	95
6.3.13. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Tabaka Dizilimine Sahip Levhaya Ait Deney Sonuçları	98
6.3.14. DeneySEL Çalışma Sonuçlarının Karşılaştırması	101
6.4. DeneySEL Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi	112
6.4.1. Geometrik Parametrelerin Mekanik Davranışa Etkisi	112
6.4.2. Fiber Takviye Açısı ve Tabaka Diziliminin Mekanik Davranışa Etkisi	113
7. ÇÖZÜLEBİLİR BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ SAYISAL ANALİZİ	115
7.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	116
7.1.1. Sonlu elemanlar modelinde sınır şartlarının uygulanması	118
7.2. Çözülebilir Bağlantılı Tabakalı Kompozitlerde Gerilme Analizi	123
7.2.1. Pim deliği etrafında fiber takviye açısı değişimine bağlı olarak gerilme analizi	124
7.2.2. Pim deliği etrafında E/D oranının değişimine göre gerilme analizi	125
7.2.3. Pim deliği etrafında W/D oranının değişimine göre gerilme analizi	127
7.3. Tabakalı Kompozitlerde İlerlemeli Hasar Analizi	128
7.3.1. Dairesel delikli tabakalı kompozit levhalarda hasar analizi	129
7.3.2. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi	131

7.3.3. Hasar İlerleme Metodunun Doğrulanması için Çözümlerin	
Karşılaştırılması	137
7.4. Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Başlangıcı ve İlerlemesinin	
Sayısal Çözümü	141
7.5. Sayısal Olarak Hesaplanan Hasar Yüklerinin Deneysel Çalışma Sonuçları ile	
Karşılaştırması	151
8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	164
9. KAYNAKLAR.....	166

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
	No
Şekil 3.1. Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi.....	16
Şekil 3.2. Tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı şekilleri.	18
Şekil 3.3. Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmesi muhtemel hasar tipleri....	20
Şekil 4.1. Tek yönde takviye edilmiş kompozit yapılarda malzeme özelliklerinin üç simetri düzleminin gösterilmesi.....	22
Şekil 4.2 . Fiber takviye doğrultusunda (1) yapılan yükleme durumu.....	26
Şekil 4.4. Fiber takviye doğrultusu ve yüklemeler.....	27
Şekil 4.4. Farklı fiber takviye açılarına sahip tabakalardan oluşturulmuş kompozit yapı...	30
Şekil 4.5. Kirchoff deformasyon hipotezine göre plakanın kenarında deformasyona uğrayan ve deforme olmamış kenarlar.....	31
Şekil 4.7. : Normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, eğilme ve burulma momentleri uygulanarak yüklenmiş olan tabakalı kompozit malzeme.....	33
Şekil 4.8. Dört düğümlü izoparametrik eleman.....	36
Şekil 4.9: Kompozit tabakada fiber takviye doğrultusuna göre oluşan gerilmeler.....	40
Şekil 5.1. Fiber takviye doğrultusunda çekme deneylerinde kullanılan $[0^{\circ}]_4$ tabaka dizilimine sahip numune.....	47
Şekil 5.2. Strain – gauge rozetin numuneye yapıştırılmış hali.....	48
Şekil 5.3. $[0^{\circ}]_4$ tabakalı kompozit malzemede fiber doğrultusunda yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.....	49
Şekil 5.4 : Fiber takviye doğrultusunda çekme deneylerinde kullanılan $[90^{\circ}]_4$ tabaka dizilimine sahip numune.....	49
Şekil 5.5: $[90^{\circ}]_4$ tabakalı kompozit malzemede fibere dik doğrultuda yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.....	50
Şekil 5.6. $[0^{\circ}]_4$ ve $[90^{\circ}]_4$ tabakalı kompozit malzemelerin basma testlerinde kullanılan numuneler.....	51
Şekil 5.7 : $[0^{\circ}]_4$ tabakalı kompozit malzemede fiber doğrultusunda yapılan basma deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.....	51
Şekil 5.8 : $[90^{\circ}]_4$ tabakalı kompozit malzemede fibere dik doğrultuda yapılan basma deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.....	52
Şekil 5.9: Kayma modülünü bulmak için hazırlanan numune ve strain – gaugelerin yapıştırılmış hali.....	53

Şekil 5.10: $[0^0]_4$ tabakalı kompozit levhadan üretilmiş olan kayma deneyi numunesi.....	53
Şekil 5.11: Kayma deneyi sonucunda $[0^0]_4$ tabakalı kompozit levhanın yük – uzama grafiği.....	54
Şekil 6.1. Çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit malzemenin geometrik parametreler ve yükleme doğrultusu.....	56
Şekil 6.2. Matkap ucu ve plaka üzerine açılmış delik.....	57
Şekil 6.3. Çekme test cihazı.....	59
Şekil 6.4. Deney numunelerini çekme cihazına bağlayan ara parçanın resmi.....	59
Şekil 6.5. Deneyisel çalışma esnasında çekme cihazını kontrol eden bilgisayarda ekrana yansıyan ara yüz.....	60
Şekil 6.6. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	62
Şekil 6.7. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	62
Şekil 6.8. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	63
Şekil 6.9. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	63
Şekil 6.10. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	63
Şekil 6.11. $[0^0]_4$ levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.	64
Şekil 6.12. $[0^0/15^0]_s$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	65
Şekil 6.13. $[0^0/15^0]_s$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	65
Şekil 6.14. $[0^0/15^0]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	66
Şekil 6.15. $[0^0/15^0]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	66
Şekil 6.16. $[0^0/15^0]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	66
Şekil 6.17. $[0^0/15^0]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.	67

Şekil 6.18. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	68
Şekil 6.19. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	68
Şekil 6.20. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	69
Şekil 6.21. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	69
Şekil 6.22. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	69
Şekil 6.23. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.	70
Şekil 6.24. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	71
Şekil 6.25. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	71
Şekil 6.26. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	72
Şekil 6.27. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	72
Şekil 6.28. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	72
Şekil 6.29. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.	73
Şekil 6.30. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	74
Şekil 6.31. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	74
Şekil 6.32. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	75
Şekil 6.33. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	75
Şekil 6.34. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.	75

Şekil 6.35. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	76
Şekil 6.36. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	77
Şekil 6.37. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	77
Şekil 6.38. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	78
Şekil 6.39. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	78
Şekil 6.40. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	78
Şekil 6.41. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	79
Şekil 6.42. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	80
Şekil 6.43. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	80
Şekil 6.44. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	81
Şekil 6.45. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	81
Şekil 6.46. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	81
Şekil 6.47. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	82
Şekil 6.48. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	83
Şekil 6.49. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	83
Şekil 6.50. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	84
Şekil 6.51. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	84

Şekil 6.52. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	84
Şekil 6.53. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	85
Şekil 6.54. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	86
Şekil 6.55. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	86
Şekil 6.56. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	87
Şekil 6.57. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	87
Şekil 6.58. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	87
Şekil 6.59. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	88
Şekil 6.60. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	89
Şekil 6.61. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	89
Şekil 6.62. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	90
Şekil 6.63. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	90
Şekil 6.64. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	90
Şekil 6.65. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	91
Şekil 6.66. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	92
Şekil 6.67. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	92
Şekil 6.68. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	93

Şekil 6.69. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	93
Şekil 6.70. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	93
Şekil 6.71. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	94
Şekil 6.72. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	95
Şekil 6.73. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	95
Şekil 6.74. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	96
Şekil 6.75. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	96
Şekil 6.76. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	96
Şekil 6.77. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	97
Şekil 6.78. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	98
Şekil 6.79. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	98
Şekil 6.80. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	99
Şekil 6.81. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	99
Şekil 6.82. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen Yük – yer değiştirme değerleri grafiği.....	99
Şekil 6.83. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.....	100
Şekil 6.84. $E/D = 1$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	101
Şekil 6.86. $E/D = 1$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	102

Şekil 6.87. Deney sonrasında $E/D = 1$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha.....	103
Şekil 6.88. $E/D = 2$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	103
Şekil 6.89. Deney sonrasında $E/D = 2$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.....	104
Şekil 6.90. $E/D = 2$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	105
Şekil 6.91. Deney sonrasında $E/D = 2$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.	105
Şekil 6.92. $E/D = 3$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	106
Şekil 6.93. Deney sonrasında $E/D = 3$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.....	106
Şekil 6.94. $E/D = 3$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	107
Şekil 6.95. Deney sonrasında $E/D = 3$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha.....	107
Şekil 6.96. $E/D = 4$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	108
Şekil 6.97. Deney sonrasında $E/D = 4$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.....	108
Şekil 6.98. $E/D = 4$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.	109
Şekil 6.99. Deney sonrasında $E/D = 4$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.....	109
Şekil 6.100. $E/D = 5$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	110
Şekil 6.101. Deney sonrasında $E/D = 5$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha.....	110
Şekil 6.102. $E/D = 5$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.....	111
Şekil 6.103. Deney sonrasında $E/D = 5$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha.....	111

Şekil 7.1. Sayısal çözümleme akış diyagramı.....	116
Şekil 7.2. Katı modelin sonlu elemanlara bölünmesi için kullanılan Solid 46 elemanı.....	117
Şekil 7.3. E/D ve W/D=2 için katı model ve sonlu elemanlara bölünmüş olan model.....	118
Şekil 7.4. Pim ile plaka arasındaki bağlantının modellendiği üç farklı durum.....	119
Şekil 7.5. Radyal sınır şartlarının kullanıldığı sonlu eleman modeli.....	120
Şekil 7.6. Temas modellemesi yapılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli.....	120
Şekil 7.7. $[0^0]_4$ tabaka dizilimine sahip numunenin E/D=1, W/D =2 geometrik parametreleri için 200 MPa gerilme yükü altında delik çevresindeki düğümlerde gerilmelerin değişimi.....	121
Şekil 7.8. Radyal sınır şartı kullanılarak modellenmiş olan pim bağlantılı tabakalı kompozit levhada σ_x (MPa) gerilmelerinin dağılımı.....	122
Şekil 7.9. Kontak elemanlar kullanılarak modellenmiş olan pim bağlantılı tabakalı kompozit levhada σ_x (MPa) gerilmelerinin dağılımı.....	122
Şekil 7.10. E/D = 1 ve W/D = 2 geometrik parametrelerine sahip $[0^0/90^0]_2$ tabaka dizilimi için 200 MPa gerilme değeri ile yüklenmesi durumu için en büyük σ_x gerilmelerine karşılık eleman sayısının değişimi.....	123
Şekil 7.11. E/D= 1 W/D =2 değerleri için simetrik ve anti-simetrik tabaka dizilimli levhanın, pim deliği etrafındaki bölgede σ_x gerilme değerlerinin değişimi grafiği.....	125
Şekil 7.12. $[0^0/45^0]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 370.5 N yük altında W/D =2 için E/D oranının değişiminin gerilmelere etkisi.....	126
Şekil 7.13. $[0^0/45^0]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 370.5 N yük altında E/D =1 için W/D oranının değişiminin gerilmelere etkisi.....	127
Şekil 7.14. Plakanın boyutları ve ¼'lük kısmın sonlu eleman modeli.....	129
Şekil 7.15. $[0^0]_4$ tabaka dizilimine sahip kompozit levhada hasar başlangıcı ve ilerlemesi.....	130
Şekil 7.16. Karbon/epoksi tabakalı kompozit levha boyutları ve deney sınır şartları.....	132
Şekil 7.17. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhanın sonlu eleman modeli ve sınır şartları.....	133
Şekil 7.18. Tabaka dizilimleri $[0^0]_4$ olmak üzere farklı tabaka dizilimleri için sayısal ve deneysel hasar yüklerinin ve hasar tiplerinin karşılaştırılması.....	135
Şekil 7.19. Fiber takviye açısının değişimine göre sayısal ve deneysel hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	136
Şekil 7.20. [4] numaralı referansta yer alan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları ile kullanılan metotla elde edilen sayısal hasar yüklerinin karşılaştırılması.....	138

Şekil 7.21. [9] numaralı referans çözüm ile tezde kullanılan metot ile elde edilen hasar yüklerinin karşılaştırıldığı grafik.....	139
Şekil 7. 22. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=2$ için hasar ilerlemesi.....	141
Şekil. 7.23. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=2$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüsü.....	142
Şekil 7.24. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$, $W/D=3$ için hasar ilerlemesi...	143
Şekil 7.25. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=3$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüsü.....	144
Şekil 7.26. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için $E/D=3$, $W/D=5$ için hasar ilerlemesi...	145
Şekil 7.27. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada $E/D=3$, $W/D=5$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüsü.....	146
Şekil 7.28. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$ durumunda son hasar yükleri ve hasar tiplerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ değerleri için sayısal değişimi.....	147
7.29. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=2, 3, 4, 5$ için deney sonucunda meydana gelen hasar görüntüleri.....	148
Şekil 7.30. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $W/D=2$, $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ oranında son hasar yükleri ve hasar tiplerinin sayısal olarak tespiti.....	149
Şekil 7.31. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $W/D=2$, $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ için deney sonucunda meydana gelen hasar görüntüleri.....	150
Şekil 7.32. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	151
Şekil 7.33. $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	152
Şekil 7.34. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	153
Şekil 7.35. $[0^\circ/30^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	154
Şekil 7.36. $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	155
Şekil 7.37. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	156
Şekil 7.38. $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	157
Şekil 7.39. $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	158

Şekil 7.40. $[0^\circ/60^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	159
Şekil 7.41. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	160
Şekil 7.42. $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	161
Şekil 7.43. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	162
Şekil 7.44. $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.....	163

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
	No
Tablo 4.1 Malzeme indirgemeleri tablosu.....	45
Tablo 5.1. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan tek yönlü karbon fiber ve epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri.....	47
Tablo 5.2: Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş karbon fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu.....	55
Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan numuneler ve özellikleri.....	58
Tablo 7.1. Sayısal çözümde kullanılan modellerin sonlu eleman sayılarının geometrik parametrelere göre değişimi tablosu. (D = 6 mm için).....	124
Tablo 7.2. Hasar ilerleme modelindeki renkler.....	131
Tablo 7.3. Dairesel delikli tabakalı kompozit malzemede hasar yüklerinin deneysel ve sayısal olarak değişimi tablosu.....	131
Tablo 7.4. Üç boyutlu Hashin hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler.....	134
Tablo 7.5. [4] numaralı referans çalışmada kullanılan örgülü karbon fiber takviyeli epoksi matriks reçineli kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	137
Tablo 7.6. Sayısal çalışma sonucu Ansys programından elde edilen hasar yükleri ve hasar tiplerinin [4] numaralı referans sonuçları ile karşılaştırma tablosu.....	138
Tablo 7.7. [9] numaralı referans çalışmada kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	139
Tablo 7.8. [13] numaralı referans çalışmada kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	140
Tablo 7.9. Sayısal çalışma sonucu Ansys programından elde edilen hasar yükleri ve hasar tiplerinin [13] numaralı referans sonuçları ile karşılaştırma tablosu.....	140

SİMGELER LİSTESİ

$[C_{ij}]$	: Elastiklik matrisi	
D	: Pim ve pim deliği çapı	[mm]
E	: Levha kenarı ile pim deliği merkezi arasındaki mesafe	[mm]
E_{11}	: Fibere paralel doğrultuda elastisite modülü	[MPa]
E_{22}	: Fibere dik doğrultuda elastisite modülü	[MPa]
G_{12}	: Kayma modülü	[MPa]
L	: Levhanın boyu	[mm]
N_x	: x yönünde normal kuvvet bileşenleri	[N]
M_x	: x-y düzleminde eğilme momenti bileşenleri	[N.mm]
N_i	: Şekil değiştirme fonksiyonu	
σ_{ij}	: Gerilme vektörü	[MPa]
ν	: Poisson oranı	-
X_φ	: Fibere paralel doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
X_b	: Fibere paralel doğrultuda basma mukavemeti	[MPa]
Y_φ	: Fibere dik doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
Y_b	: Fibere dik doğrultuda basma mukavemeti	[MPa]
S	: Kayma mukavemeti	[MPa]
$[Q_{ij}]$	: İzotrop malzemeler için iki boyutlu elastiklik matrisi	
$[S_{ij}]$	: Elastiklik matrisinin tersi	
t	: Levha kalınlığı	[mm]
u, v, w	: x, y, z kartezyen koordinatlarındaki yer değiştirmeler	[mm]
U_e	: Eğilmeden kaynaklanan şekil değiştirme enerjisi	
V_f	: Fiber hacim oranı	[%]
W_e	: Dış kuvvetler etkisi ile cisimde meydana gelen potansiyel enerji	
W	: Levha genişliği	[mm]
θ	: Fiber Takviye açısı	[°]
θ_d	: Pim deliği eksenini ile yükleme doğrultusu açısı	[°]
$\zeta - \eta$	: Yerel eksen takımı	
Π	: Toplam enerji	

1.GİRİŞ

Metallere göre hafif ve aynı zamanda eş değer derecelerde mukavemetli olmaları nedeni ile kompozit malzemelerin kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Kompozit malzemeler, hafifliği, yüksek korozyon direnci, ağırlığına göre yüksek bağl mukavemeti ve özellikleri tasarımcıya bağlı olduğu için, uzay çalışmalarında, havacılık, otomotiv, denizcilik ve inşaat konstrüksiyonlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Tabakalı kompozitler, aynı ya da farklı özelliklere sahip birden fazla kompozit tabakanın bir araya getirilmek sureti ile oluşturulduğu malzemelerdir. Bu tür kompozit malzemelerde her bir tabakanın değişik özelliklere sahip olması kompozit yapıda tasarıma uygun özelliklerin ortaya çıkarılmasında bir avantaj oluşturur. Tabakalı kompozit malzemeler, aynı zamanda hem herhangi bir tür yalıtıma (elektrik, yangın, ısı vb.) hem de yüksek korozyon direncine farklı işlemlerin uygulanması (jel, giydirme vb.) ile sahip olabilirler.

Kompozit malzemelerin gelişimine paralel olarak birçok avantajının yanı sıra tasarımda kullanılırken bazı hesaplama ve uygunluk araştırmalarına gerek duyulmaktadır. Bu tür malzemelerin mekanik davranışları, içerisinde bulundukları yükleme koşullarına, yüklemenin türüne, konstrüksiyon özelliklerine ve bileşiminde bulunan farklı özellikteki malzemelerin (fiber, matriks, tabaka dizilimi vb.) göstereceği farklı etkiler neticesinde değişmektedir. Kompozit malzemelerin deneysel çalışmaları yapılmadan önce geliştirilen çeşitli sayısal yöntemlerle analizlerin yapılması maliyet, zaman ve araştırılacak konunun detaylarının önceden belirlenmesi için oldukça gereklidir. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlara dayalı bir imalat yapıldığı zaman daha emniyetli ve gelişimi önceden bilinebilecek durumlarla karşılaşmak mümkündür. Emniyetli bir çalışma yapılabilmesi ve gerekli önlemlerin alınması için tabakalı kompozit yapıların mekanik davranışlarının konstrüksiyonlarda kullanılmadan önce dikkatli bir şekilde araştırılması gereklidir.

Genellikle birçok yapı elemanının uygun bir şekilde birleştirilmesi ile elde edilen konstrüksiyonlarda, sistemi oluşturan elemanların birbirlerine uygun bir şekilde bağlanması gerekir. Bağlantı şekilleri temelde çözülebilir ve çözülemez bağlantı olmak üzere ikiye ayrılır. Her iki bağlantı türünün kendine göre bir takım avantaj ve dezavantajları olmasına rağmen çözülebilir bağlantılar, ekonomikliği ve kolay uygulanabilirliği nedeni ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Çözülebilir bağlantılarda malzemeler birbirlerine pim, perçin ve cıvata gibi bağlama elemanları ile bağlanmaktadır. Kompozitlerin çözülemeyen bağlantıları birleştirilecek olan kompozit malzeme özelliklerine uygun ve genellikle yapışma özelliğine sahip malzemeler kullanılarak yapılmaktadır. Çözülemeyen bağlantılar rijit, dış ortam etkilerinin malzemeye zarar veremediği, ulaşımın güç olduğu ve tamirat gerektirmeyen yerlerde kullanılırken, çözülebilir

bağlantılar ise hareketli, tamirat gerektiren olumsuz dış ortam şartlarında çalışan ve özellikle hareket iletiminin olduğu yerlerde tercih edilmektedir.

Çözülebilir bağlantılar uygulanırken kompozit plaka üzerine bağlantı şekline ve elemanına uygun en az bir veya daha fazla sayıda delik açılması gerekmektedir. Kompozit levhada açılacak olan bu delikler gerilme yığılmalarına ve dolayısı ile yapının mukavemetinde düşmelere neden olacaktır. Karbon Fiber takviyeli reçine esaslı kompozit malzemeler lineer elastik özelliktedirler ve metalik malzemeler gibi akma davranışı göstermezler. Gevrek yapıda olan bu malzemeler yüklemelerin kopma sınırına ulaşması durumunda kırılarak hasara uğrarlar. Uygun fiber takviye açısının, tabaka sayısının belirlenmesi ve bağlantı yapılırken yapının mukavemetinde meydana gelecek değişikliklerin göz önüne alınarak hesaplamaların yapılması gereklidir. Her bir bağlantı elemanı için açılacak olan delik sayısı levhanın mukavemeti ile doğru orantılı olarak hesaplanmalı ve deliklerin uygun bir geometrik dizilimde açılmalıdır.

Çözülebilir bağlantı elemanı kullanılarak yapılan birleştirmelerde sisteme uygulanan yük bağlama elemanı üzerinden bağlantı parçalarına iletilmektedir. Delinerek mukavemeti zayıflatılmış olan kompozit yapıda bağlantı elemanının delik yüzeyine yapacağı basınç ile malzemenin mukavemeti olumsuz yönde etkilenecektir. Bu tür nedenlerden dolayı kompozit malzemelerde karşılaşılan bu tür problemlerin çözümü içerisinde dairesel bir delik bulunan izotrop bir levhanın analizine göre daha zor ve karmaşıktır. Bunun yanı sıra kompozit levhaların birleştirme işleminde birleştirilecek parçalar iki levha kullanılarak tek tesirli ve daha fazla levha kullanılarak çift tesirli bağlantılar oluşturulmaktadır. Bağlantının tek veya çift tesirli olması durumu kompozit levhanın birleştirme şeklinden dolayı etkileneceği yüklemenin türünü değiştirmektedir. Her bir bağlantı için ayrı analiz yapılması ve delik açılmış olan kompozit levhada meydana gelebilecek olan hasar başlangıcı ve yayılmasının hesaplanması gerekir.

Çözülebilir bağlantılı kompozit malzemelerde mekanik davranışların analizi ile ilgili olarak yapılan literatürdeki çalışmalar incelenerek özetlenmiştir. Literatür incelemesinde konu ile ilgili ilerlemeler ve elde edilen sonuçlar incelenerek tez çalışması için gerekli olan yöntem belirlenmiştir. Yapılmış olan çalışmaların genel özelliği deneysel ve sayısal çalışmaların karşılaştırılması şeklinde olmuştur. Literatürde öne çıkan önemli hususlardan biri sayısal modelleme yapılması ve sayısal modelin doğrulanması şeklindedir. Bu amaçla iki ve üç boyutlu çalışmalarda çeşitli hasar teorileri problemlerin analizinde kullanılmıştır. Genellikle sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmış olan sayısal çalışmalarda hasar kriteri olarak Hashin hasar kriteri ile çözülebilir bir bağlantı türü olan pim bağlantılarının çözümü yapılmıştır. Çalışmalarda geometrik parametre olarak pim deliğinin merkezi ile kısa kenar arasındaki mesafe (E) ile pim deliğinin çapı olan (D) oranı (E/D) ve plaka genişliği (W) ile delik çapı oranının değişimi (W/D) incelenmiştir. Kompozit malzeme türü olarak gevrek kırılma hasarına

uğrayan reçine esaslı (thermoset) fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerde tabaka sayısı, simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi ve fiber takviye açısının değişiminde parametre olarak incelenmiştir.

Bu doktora tez çalışmasında çözülebilir bağlantılı fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde mekanik davranışların analizi deneysel ve sayısal metotlar kullanılarak araştırılmıştır. Çözülebilir bağlantı türü olarak pim bağlantısı ele alınmış ve malzeme olarak karbon fiber takviyeli, epoksi matriks reçineli dört tabakalı kompozit plakalar kullanılmıştır. Mekanik davranışların analizinde ise karbon fiber takviyeli epoksi matriks reçineli kompozit malzemelerin lineer elastik özellikte olmasından dolayı genel olarak gevrek kırılma (akma göstermeksizin hasar oluşması durumu) görüldüğü için lineer elastik gerilme analizine göre hasar kontrolü yapılmıştır. Tabakalı kompozit malzeme olarak fiber takviye açısı θ : 0° 'den başlamak üzere 15° 'lik artımla 90° 'ye kadar simetrik ve anti-simetrik (simetrik olmayan) durum için $[0^\circ/\theta^\circ]_2$ dört tabakalı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Numunelerde geometrik parametrelerin değişimi olarak $E/D=1, 2, 3, 4, 5$ ve $W/D=2, 3, 4, 5$ alınmıştır.

Sayısal çalışmada hasar kriteri olarak Hashin hasar kriteri kullanılarak ilerlemeli hasar analizi modelini üç boyutlu olarak modelleyen bir sonlu elemanlar programı olan ANSYS 11.0 yardımıyla APDL (Ansys Parametric Design Language) kodları kullanılarak yapılmıştır. Her bir tabakada meydana gelen hasarın değişimi ve net hasar yüklerine ulaşılması programda görsel olarak modellenmiş ve sonuçlar literatürdeki referans çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak program sonuçları doğrulanmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonuçları sayısal modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Çalışma sekiz bölümden oluşmaktadır. Bölümler ve içerikleri sırası ile şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Giriş:** Konunun tanımı ve amaç anlatılmıştır.
- 2- Literatür araştırması:** Konu ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar ve çalışmanın içeriği ile ilgili bilgiler yer almaktadır.
- 3- Kompozit malzemelerin birleştirilmesi:** Bu bölümde çalışmada kullanılan kompozit malzemeler ile ilgili genel bilgiler ve birleştirme yöntemleri ve mekanik açıdan bu birleştirmeler neticesinde elde edilen kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajlarını içermektedir.
- 4- Tabakalı kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının analizi:** Tabakalı kompozit yapılarda gerilmelerin analitik yöntemler kullanılarak analizi ve sonlu elemanlar metodu formülleri anlatılmaktadır.
- 5- Deneylerde kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti:** Çalışmada kullanılacak tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin

tespiti için uygulanan yöntemler ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edildiği deneylerden elde edilen grafikler bu bölümde sunulmuştur.

- 6- **Çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde mekanik davranışların deneysel olarak tespiti:** Pim bağlantılarının hasar yüklerinin fiber takviye açısına ve geometrik değişkenlere bağlı olarak değişimi bu bölümde incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen hasar yükleri ve parametrelere bağlı olarak değişimi bu bölümde yer almaktadır.
- 7- **Çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının sayısal analizi:** Sayısal olarak hasar yüklerinin tespit edilmesi için kullanılan ilerlemeli hasar analizi bu bölümde anlatılmaktadır. Bu bölümde geliştirilen sayısal analiz metodu ile başka çalışmalara ait sonuçlar ve karşılaştırmaları ayrıca sayısal çözüm yöntemi geliştirilirken elde edilen sonuçlara dayanılarak yayımlanmış olan çalışmalar yer almaktadır.
- 8- **Tartışma ve Öneriler:** Bu bölümde çalışma genel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.
- 9- **Kaynaklar:** Çalışma yapılırken yararlanılmış olan ve atıfları yapılmış olan makale, kitap vb. çalışmalar bu bölümde sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tabakalı kompozit malzemelerin birleştirilmesinde çözülebilir bağlantılar için kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesi amacı ile literatürde birçok sayısal ve deneysel çalışma yapılmıştır.

Dano ve diğerleri [1], çift tesirli pim bağlantılı kompozit levhalarda hasar analizini ABAQUS programında sayısal olarak modelleyen bir yazılım kullanarak yapmışlardır. Maksimum deformasyon teorisi ve lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme bağıntılarını kullanarak ilerlemeli hasar analizi yapan yazılımda pim ile pim deliği arasını temas problemi olarak tanımlamışlardır. Hasar analizi üzerine hasar kriterinin, pim deplasmanının ve lineer olmayan kayma davranışının etkilerini araştırmışlardır. Hasar kriteri olarak Hashin ve maksimum hasar kriterlerini kombine olarak kullanan araştırmacılar farklı fiber takviye açılarında hasar yüklerinin değişimini sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır.

Camanho ve Matthews [2], fiber takviyeli plastiklerde mekanik bağlantıların gerilme analizini ve dayanımını daha önce yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada tabaka diziliminin, fiber takviye açısı ve bağlama geometrisinin değişiminin tek ve çoklu pim kullanılan birleştirmelerde etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre pim bağlantılı levhalar üzerine yapılan iki ve üç boyutlu sayısal modellerin kullanıldığı analizlerde sürtünme, pim-delik arasındaki boşluk ve temas yüzeyi dikkate alınması gerekliliğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak herhangi bir hesaplama metodunun kullanılmasının yüzde yüz kesin sonuçları vermesinin mümkün olmamakla birlikte üç boyutlu sayısal analizlerin ve uygun bir hasar kriteri ile birlikte uygun malzeme indirgeme kurallarının kullanılmasının deneysel çalışmalara en yakın sayısal sonuçları sağlayabileceği belirtilmiştir.

Tserpes ve diğerleri [3], tek tesirli cıvata bağlantılı tabakalı kompozit yapılarda hasar ilerlemesinin üç boyutlu sayısal analizini, sonlu elemanlar metodunu kullanarak ANSYS programında modellemişlerdir. Kullandıkları programda gerilme analizi yaparak elde ettikleri gerilme değerlerinin hasara neden olup olmadığını Hashin hasar kriterini kullanarak kontrol etmişlerdir ve hasara uğrayan elemanlarda malzeme özelliklerinin indirgenmesi metodunu kullanmışlardır. Çalışmalarında cıvatanın plaka üzerine yerleştirildiği geometrinin, cıvata ile plaka arasındaki sürtünme kuvvetinin ve delik çevresindeki artık gerilmelerin son hasar yüklerine etkilerini Ireman'ın [34] çalışmasında seçilen levha geometrisi ve cıvata tipini kullanarak cıvata ile levhanın etkileşimini temas modellemesi metodu ile modelleyerek araştırmışlardır. Deneysel ve sayısal çalışma için HTA/6376 grafit/epoksi malzemelerinden üretilmiş $[(\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ)_4]_s$ ve $[(\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ)_8]_s$ tabaka dizilimlerine sahip kompozit levhalarda

cıvata bağlantılarının mukavemetini incelemişlerdir. Sonlu eleman analiz sonuçlarını Ireman'ın [35] yapmış olduğu deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

İçten ve Karakuzu [4], örgülü karbon takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde pim bağlantılarında ilerlemeli hasar analizini deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Farklı fiber takviye açılarının, pim bağlantı geometrilerinin ve malzeme özelliklerinin hasar yükleri ve hasar tipi üzerine etkilerini çift tesirli pim bağlantıları kullanarak araştırmışlardır. Sayısal çalışmalarında Hashin ve Hoffman hasar kriterlerini kullanmışlardır. Fiber takviye açısı olarak 0° , 15° , 30° ve 45° kullanılarak deneysel ve sayısal hasar yüklerini yaklaşık olarak %20 fark ile elde etmişlerdir. Pim bağlantısında pim merkezi ile plaka kenarı arasındaki mesafenin değişimi olan E uzunluğunun pim deliğinin çapı olan D ye göre değişimi $E/D = 1-5$ ve pim merkezi ile plakanın kısa kenarı arasındaki mesafenin değişimi olan W uzunluğunun pim deliğinin çapı olan D ye göre değişimi $W/D = 2 - 5$ olarak alınmıştır. Pim rijit kabul edildiğinden pimin basınç uygulayacağı bölge olan deliğin içerisine kosinüsoidal yük dağılımı uygulanmış ve plakanın aksi yöndeki kısa kenarı ankastre olarak mesnetlenmiştir. Hasar türünün belirlenmesinde delik kenarında hasarın başladığı noktanın levha eksenine ile yapmış olduğu açı değişimini kullanmışlardır.

Whitworth ve diğerleri [5], çift tesirli pim bağlantılı kompozit malzemelerde hasar analizini Chang-Scott karakteristik eğrisini kullanarak yapmışlardır. Çalışmalarında AS4/3502 grafit fiber takviyeli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme kullanmışlardır. Yamada-Sun hasar kriterini kullanarak iki boyutlu bir sonlu eleman modelinin analizinden elde etmiş oldukları sayısal sonuçlarını deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

McCarthy ve diğerleri [6], tek tesirli bağlantı kullanılarak cıvata ile birleştirilmiş tabakalı kompozit yapılarda üç boyutlu sonlu elemanlar kullanarak yapmış oldukları sayısal analiz sonuçlarını deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında fiber takviyesi olarak grafit ve matriks malzemesi olarak epoksi reçine kullanmışlardır. Çalışmada esas olarak cıvata ile delik arasındaki tolerans değerlerinin değişiminin hasar yükleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır.

İçten ve Sayman [7], çift tesirli pim bağlantılı alüminyum-cam fiber takviyeli epoksi reçine matriksli sandviç kompozit yapılarda hasar analizini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında fiber takviye açısının değişimini ve pim bağlantı geometrisinin (E/D ve W/D) değişiminin hasar yükleri üzerine olan etkileri incelemişlerdir.

Echavara ve diğerleri [8], çift tesirli pim bağlantılı elastik ortotropik tabakalı kompozit yapılarda delik etrafındaki gerilme yığılmalarını analitik metotlar kullanarak incelemişlerdir. Yapmış oldukları analizler neticesinde elde etmiş oldukları bağıntılarla farklı fiber takviye

açılarından oluşan ortotropik levhalarda ve izotrop malzemelerde pim deliği etrafındaki gerilme yığılmalarını kullanmış oldukları analitik bağıntılar yardımı ile hesaplamışlardır.

Aktaş [9], karbon fiber takviyeli ve epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit yapılarda statik ve dinamik yükleme etkisi altında pimli bağlantıların yük taşıma mukavemetinin değişimini araştırmıştır. Deneysel olarak yaptığı çalışmada fiber takviye açısı ve tabaka dizilimi olarak $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ ve $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ konfigürasyonlarını kullanarak pim bağlantı geometrisinin değişimini incelemiştir.

Okutan [10], çift tesirli pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde, fiber takviye tipinin, fiber takviye açısının, tabaka diziliminin ve pim bağlantı geometrisinin değişiminin hasar yüklerine etkilerini incelemiştir. Malzeme olarak tek yönlü ve örgülü cam fiber takviyeli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit levhalar kullanmıştır. Çalışma deneysel ve sayısal olarak yapılmış ve analizler sonucunda elde edilen hasar yükleri karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada ilerlemeli hasar analizi yapan PDNLPIN kodlarını ANSYS sonlu elemanlar programında APDL (Ansys Parametric Design Language) kodlarına dönüştürerek kullanmıştır.

Camanho ve Lambert [11] tarafından, pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde hasar analizi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmalarında tekyönde takviye edilmiş karbon fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzemelerde pim bağlantısı için hasar yüklerinin geometrik değişkenlere göre değişimini elde etmişlerdir. Pim bağlantılı kompozit malzemede hasar yüklerinin hesabında gerilme analizi kullanılmıştır. Gerilme analizi yarı analitik ve nümerik metotlar kullanılarak yapılmıştır. Hasar yüklerinin elde edildiği sayısal ve deneysel çalışma sonuçları oldukça uyumludur.

Aktaş ve Dirikolu [12], karbon fiber takviyeli ve epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzemelerde çift tesirli pim bağlantısının mukavemetini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında [9] numaralı referansta kullanılan fiber takviye açısı ve tabaka dizilimini kullanmışlardır. Sayısal modeli Yamada-Sun hasar kriterini kullanarak iki boyutlu sayısal modeli ANSYS sonlu elemanlar programında analiz etmişlerdir. Sayısal olarak elde etmiş oldukları sonuçlarda hasar tipini karakteristik eğri yöntemi ile hasarın başladığı noktanın levha eksenine ile yaptığı açının değişiminden tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda deneysel ve sayısal sonuçlar arasında yaklaşık %20 bir fark olduğunu ifade etmişlerdir.

Karakuzu ve diğerleri [13], çift tesirli pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde hasar analizini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmalarında örgülü cam fiber takviyeli vinily ester matriksli tabakalı kompozit yapıda pim bağlantı geometrisinin değişiminin hasar yükleri ve hasar tipi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Hasar yüklerini Hashin hasar kriterine göre LUSAS sonlu elemanlar programında üç boyutlu sonlu eleman modeliyle analiz

etmişlerdir. Pim deliğine radyal sınır şartı uygulayarak plakanın serbest kenarından çekme yükü uygulamışlardır.

Okutan ve Karakuzu [14], tabakalı kompozit malzemelerde çift tesirli pim bağlantılarının mukavemetini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında fiber takviye açısı, tabaka dizilimi ve bağlantı geometrisinin değişimini incelemişlerdir. Fiber takviye açısı ve tabaka dizilimi olarak $[0^\circ/\pm 45^\circ]_s$ ve $[90^\circ/\pm 45^\circ]_s$ konfigürasyonlarını kullanmışlardır. Sayısal çalışmalarında PDNLPIN kodlarını kullanarak yirmi farklı pim bağlantı geometrisine göre hasar tiplerinin oluşumunu ve hasar yüklerinin değişimini araştırmışlardır.

Yılmaz ve Sınmazçelik [15], karbon takviyeli tabakalı kompozitlerin çift tesirli pimli bağlantılarında yük taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Deneysel olarak yapmış oldukları çalışmalarında fiber takviye açısının, tabaka diziliminin ve bağlantı geometrisinin değişimini araştırmışlardır. Fiber takviye açısı ve tabaka dizilimi $[0^\circ/90^\circ]_{3s}$ ve $[45^\circ/-45^\circ]_{3s}$ olarak alınmış ve yapılan deneyler sonucunda bu konfigürasyon için hasar tipinin değişiminde bağlantı geometrisinin etkileyici olduğunu belirlemişlerdir.

Karakuzu ve diğerleri [16], çift pim bağlantısı ile yapmış oldukları çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin hasar davranışlarının analizini yapmışlardır. Deneysel ve sayısal olmak üzere iki bölümden oluşan çalışmada bağlantı geometrisinin değişimi ile iki delik arasındaki mesafenin değişiminin hasar yükleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Sayısal çalışmada sonlu elemanlar analiz programı olan LUSAS programını kullanmışlardır. Hasar yüklerinin belirlenmesinde Hashin hasar kriteri kullanılmıştır. Deneysel çalışmada cam fiber takviyeli vinil ester reçineli tabakalı kompozit malzemeler kullanılmıştır.

Pekbey [17], çift tesirli pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde hasar analizi yapmıştır. Deneysel olarak yapılmış olan bu çalışmada; hasar yüklerinin plakaların ön gerilme momenti etkisi altında, farklı bağlantı geometrilerinde ve $[0^\circ/90^\circ/\pm 60^\circ]_s$ fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip tabakalı kompozit malzemelerde değişimi incelenmiştir.

Whitword ve diğerleri [18], pim bağlantılı kompozit malzemelerde noktasal gerilme kriterinin uygulanması ile hasar analizi yapmışlardır. Bu çalışmada çekme ve basma durumları için ayrı noktasal gerilme kriteri kullanılarak delik çevresinde bir karakteristik eğri çizilmiştir. Hasarın başlangıcı için ön görülen gerilme değerlerine bu sayede ulaşan düğümlerde hasarın başladığını belirtmişlerdir. Hasar oluşan düğümlerde daha sonra Yamada-Sun hasar kriteri kullanılarak hasarın ilerlemesi ve son hasar yüklerine ulaşılması amaçlanmıştır. Grafit fiber takviyeli ve epoksi reçine matriksli kompozit malzemelerde yapılan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır.

Dursun [19], çift tesirli cıvata bağlantılı tabakalı kompozit yapılarda hasar analizini, ilerlemeli hasar analizi metodu ile incelemiştir. Sayısal olarak yapılan çalışmada hasar analizi için Hashin hasar kriteri kullanılarak ilerlemeli hasar analizini ANSYS sonlu elemanlar programında yazmış olduğu APDL kodlarını kullanarak gerçekleştirmiştir. Analizlerde $[0^\circ]_8$, $[(0^\circ_2/90^\circ_2)]_8$ ve $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_8$ konfigürasyonları incelenmiş ve maksimum yük taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Farklı geometrilerde bağlantıların hasar yükleri üzerine değişimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda ilerlemeli hasar analizi metodu kullanılarak elde edilen hasar yükleri ile deneysel çalışmadan elde edilen hasar yükleri arasında % 2.5 gibi bir sonuç elde edilmiştir.

Chang ve Chang [20], ortasında dairesel delik bulunan tabakalı kompozit levhalarda gerilme ve hasar analizi yapmışlardır. Deneysel çalışmada grafit fiber takviyeli epoksi matriks reçineden yapılmış olan tabakalı kompozit malzemeler kullanılmıştır. İki boyutlu sayısal modellemede hasar kontrolü Yamada-Sun hasar kriterine göre yapılmıştır. Kompozit malzemeler için sonlu elemanlar metoduyla ilerlemeli hasar analizinde matriks ezilme hasarı, fiber kırılma hasarı ve fiber-matriks arası kayma hasarı olmak üzere üç farklı hasar oluşum şeklini incelemişlerdir.

Tan [21], ortasında dairesel delik bulunan tabakalı kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli ile hasarın oluşum şeklini esas alarak malzeme indirgemeleri modelini kullanmıştır. Malzeme indirgemelerini kullanarak hasara uğrayan elemanların elastisite modülü vb. mekanik özellikleri zayıflatılmış bu sayede hasarın deneysel çalışmada görüldüğü şekli ile sayısal modelde elde edilmesi amaçlanmıştır. Sayısal çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Farklı tabaka dizilimleri ve fiber takviye açıları için elde edilmiş olan sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Chang ve diğerleri [22-23], çift tesirli pim bağlantılı kompozit levhalarda hasar analizleri üzerine çalışmışlardır. Bir ve birden fazla pim bağlanmış kompozit levhalarda gerilme analizi yapılmıştır. Kompozit levhadaki gerilme analizi sonlu eleman metodu kullanılarak hesaplanmış, maksimum yük ve hasar tipi önerilen hasar kriteri ve Yamada-Sun hasar kriteri ile hasara uğrayan elemanlar tespit edilmiştir. Deneysel çalışmada T300/1034-C grafit/epoksi kompozit malzeme kullanılmış, sayısal çalışmada ise iki boyutlu hasar analizi yapılarak elde edilen deneysel ve sayısal hasar yükleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Chang ve Chang [24], çalışmalarında çift tesirli cıvata bağlantılı kompozit levhalar için hasar analizini ilerlemeli hasar analiz metodunu kullanarak yapmışlardır. Bu çalışmada cıvata bağlantılı kompozit levhalar için yırtılma, kesme ve ezilme hasarı olmak üzere üç ana hasar şekli olduğu belirtilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucu olarak levhanın kesme ve yırtılma

hasarının iki boyutlu (düzlemsel) olduğu, ezilme hasarının ise üç boyutlu olduğu belirtilmiştir. İki boyutlu olarak yapmış oldukları çalışmada yırtılma ve kesme hasarları tespit edilmiştir.

Hyer ve diğerleri [25], pim bağlantılı karbon/epoksi levhalarda pim malzemesinin elastikliğinin, sürtünme katsayısının ve pim ile delik arasındaki boşluğun (toleransın) levhanın mukavemetine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında $[0^\circ]_8$, $[90^\circ]_8$, $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_s$ ve $[0^\circ_2/\pm 45^\circ]_{2s}$ konfigürasyonları ele alınmıştır. Sayısal modelde pim yerine pimin delik yüzeyine etki şekline uygun olan kosinüsoidal yük dağılımı metodu ile çalışılmasının uygun sonuçlar veremeyeceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca pim malzemesinin elastikliğinin levha mukavemetine etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Yogeswaren ve Reddy [26], pim bağlantılı ortotropik levhalarda pim-delik temasından kaynaklanan gerilme dağılımını incelemişlerdir. İki boyutlu sonlu eleman modelinde pim ile deliğin temas bölgesinde sürtünme kat sayıları tanımlanmış ve temas modellemesi kullanılarak analiz yapılmıştır. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Jurf ve Vinson [27], cıvata bağlantılı kevlar/epoksi ve grafit/epoksi kompozit malzemelerin hasar analizi üzerine çalışmışlardır. Sayısal çalışmalarında hem klasik tabaka teorisini hem de sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Geliştirdikleri hasar akış diyagramında, her bir tabakadaki elemanlarda meydana gelen hasarı malzeme özelliklerinin indirgenmesi kurallarını kullanarak modellemişlerdir. İki boyutlu doğrusal olmayan elasto-plastik sonlu eleman modellemesi yapılmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Eriksson [28], cıvata bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde cıvata gövdesinin levhada açılmış olan deliğe uyguladığı yatak gerilmelerini incelemiştir. Grafit fiber takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerde cıvata ön gerilmesinin, tabaka diziliminin, delik çapının, plaka kalınlığının ve yükleme doğrultusunun yatak gerilmesine etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre ön gerilme uygulanmış cıvata bağlantılı kompozit levhalarda elde edilen levha mukavemetinin, pim bağlantılı aynı levhalara oranla 2.4 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada delik çapının, yükleme doğrultusunun ve levha kalınlığının yatak gerilmelerine etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Lessard ve Shokrieh [29], pim bağlantılı karbon fiber takviyeli epoksi matrisli reçineli tabakalı kompozit malzeme için iki boyutlu hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, pim temas yüzeyi boyunca modelde radyal sınır şartları uygulanarak pim yerine radyal mesnetler yerleştirilmiştir. Bağlantı geometrisinin (E/D ve W/D) kompozit levhanın mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Geliştirilen hasar ilerleme modeli sonlu eleman analizlerinde uygulanmış, elde edilen sonuçlar deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Chen ve diğerkleri [30], cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda cıvata deliğı ile cıvata arasındaki teması modellemek için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında fiber matriks malzeme çifti olarak grafit/epoksi ve cam elyaf/polyester $[45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip malzemeler kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının, delik-cıvata arasındaki toleransın ve ön gerilmenin mukavemete olan etkileri üzerine çalışmışlardır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Wang ve diğerkleri [31], çift tesirli çözülebilir bağlantılı kompozit levhalarda ezilme hasarının oluşumunu deneysel yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Araştırmalarında T800/3900-2 grafit/epoksi malzeme kullanılmıştır. Bağlantı şeklinin (cıvata veya pim kullanılması durumunu) , pul boyutunun ve cıvata ön gerilmesinin bağlantı mukavemetini nasıl etkilediğı farklı fiber takviye açlarına sahip tabakalarda ve geometrik parametrelerin (W/D ve E/D) hasar yüklerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada pim ve cıvata bağlantısı için ayrı aparatlar kullanılarak deneyler yapılmıştır. Araştırmanın sonucunda cıvata bağlantılarında ön gerilmenin artması durumunda ezilme hasarının arttığı ve hasarın kademeli olarak gerçekleştiğı, pim bağlantılarında ise hasarın aniden gerçekleştiğı gözlemlenmiştir.

Hung ve Chang [32], çalışmalarında cıvata bağlantılı kompozit levhaların hasar analizlerini modelleyebilen bir sonlu elemanlar programı geliştirmişlerdir. Çalışmada çift kesme durumu incelenmiş, üç farklı karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli kompozit malzeme için analizler yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modelinde pim yerine radyal sınır koşulları uygulanmıştır. İlerlemeli hasar analizi sonucunda kesme, yırtılma ve ezilme hasar şekilleri, farklı W/D ve E/D değerkleri için incelenmiştir.

Kim ve diğerkleri [33], çift tesirli pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde hasar yüklerini ve tiplerinin ilerlemeli hasar analizi metodunu kullanarak araştırmışlardır. Sayısal çalışmada Penaltı yaklaşımı ve sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Hasar yüklerinin tespitinde Hashin hasar kriterini kullanılarak elde edilen sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Pim ile kompozit levha arasında temas modellemesinin kullanıldığı çalışmada pim ile levha arasındaki sürtünmenin tanımlanması için Coulomb sürtünme teorisi kullanılmıştır. Yırtılma, kesme ve ezilme hasarlarının oluşumları tespit edilmiştir.

Ireman [34], cıvata bağlantılı kompozit levhada gerilme dağılımını incelemek üzere üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Model IDEAS yazılımında yapılmış, ABAQUS sonlu eleman yazılımında analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, HTA7/6376 grafit/epoksi levha, AA7475-T76 alüminyum levha ve Ti6Al14VSTA titanyum cıvata kullanılmıştır. Tek kesme bağlantısı incelenmiştir. Temas yüzeyini azaltmak için cıvata, pul ve somun tek bir yapı olarak modellenmiştir. Temas çözümünde Langrangian - Multiplier metodu kullanılmıştır.

Sürtünme katsayısı tüm yüzeylerde aynı ve sabit alınmıştır. Bunun sebebi, kullanılan yazılımın farklı sürtünme katsayılarının kullanımını desteklememesidir. Cıvata ön gerilmesini uygulamak için, cıvataya ortotropik termal genleşme katsayısı uygulanmıştır. Daha sonra sıcaklık düşürülerek ön gerilme yaratılmıştır. Farklı cıvata tipi, ön gerilme, fiber takviye açısı, tabaka dizilimi ve cıvata/delik arasındaki boşluk değişkenler olarak ele alınmış ve bu değişkenlerin bağlantının mukavemetine olan etkisi incelenmiştir. Sonlu eleman analiz sonuçları yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada hasar analizleri yapılmamıştır. Hasar kriterleri ve hasar ilerleme algoritması kullanılmamış olup sadece gerilme analizleri yapılmıştır [19].

Camanho ve Matthews [35], çift tesirli cıvata bağlantılı T300/914 karbon elyaf/epoksi levhaların mukavemetinin belirlenmesi ve hasar ilerleme analizi için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Temas modellemesi yapılarak sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde Hashin'in üç boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar ilerleme modellemesinde, kompozit malzemenin elastiklik ve kayma modülü, kompozit malzemede oluşan hasarın ilerleme durumuna göre sonlu eleman analizlerinde indirgenerek uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli ABAQUS yazılımı ile oluşturulmuştur. Cıvata ve pulun rijit olarak modellendiği çalışmada cıvata ön gerilmesi uygulanmamıştır. Pul ile kompozit levha arasında sürtünme tanımlanmamış, temas analizi bu doğrultuda yapılmıştır.

Zhang ve diğerleri [38], çift tesirli pim bağlantılı kompozit levhalarda, pim/delik yüzeyindeki sürtünmenin, üç boyutlu temas gerilmesine etkisini incelemişlerdir. Sayısal çalışmalar sonucunda sürtünme katsayısının, delik civarında üç boyutlu gerilme durumunu önemli bir şekilde etkilediği belirtilmiştir. Düzlemsel gerilme şeklinde yapılan iki boyutlu modellemeler ile üç boyutlu gerilme durumu arasında önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiş, bu durumun özellikle kayma gerilmesinde daha belirgin olduğunu vurgulamışlardır.

Perugini ve diğerleri [39], tek tesirli cıvata bağlantılı kompozitlerde hasar analizini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak hazırlanmış, cıvata, somun ve pul elastik olarak modellenmiştir. Bu çalışmada Hashin hasar kriteri, geliştirilen hasar ilerleme modeli ile birlikte kullanılmıştır. Ön gerilme uygulanmaksızın cıvata-pul, pul-kompozit, kompozit-kompozit ve cıvata-kompozit arasındaki temas durumu incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sayısal analiz sonuçları ile deney sonuçları arasında ortaya çıkan farkta, sürtünmenin neden olduğu ve sürtünme etkisinin ayrıntılı olarak araştırılmasının gerektiği belirtilmiştir.

Sun ve diğerleri [38-39], çift tesirli cıvata bağlantılı kompozit levhaların mukavemetini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarının birinci kısmında, üç

boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Cıvata ön gerilmesinin, pul boyutunun ve cıvata özelliklerinin yapının mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Analizlerde hasar ilerleme algoritması, malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralı ile birlikte kullanılmıştır. Sonlu eleman yazılımı olarak ABAQUS kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde cıvata ön gerilmesi uygulayabilmek için sıcaklık yükü verilmiş ve cıvata eksenini doğrudan doğruya gerilme oluşturulmuştur. Kompozit malzeme olarak $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$ ve $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_{3s}$ fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip plakalar kullanılmıştır.

Lawlor ve diğeri [40], tek tesirli cıvata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda cıvata ile delik arasındaki toleransın, hasar yükü üzerine etkisini incelemişlerdir. Farklı tolerans değerlerine (0, 80 μm , 160 μm ve 240 μm) göre çekme testleri yapmışlardır. 240 μm 'lik toleransın havacılık sanayinde uygulandığı ve bu toleransın yapının mukavemetine olumsuz etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Bu toleransın dışındaki tolerans değerlerinde bağlantının dayanımının olumsuz etkilendiği belirtilmiştir.

McCarthy ve McCarthy [41], tek tesirli cıvata bağlantılı kompozit levhalarda cıvata ile delik arasındaki boşluğun etkisini incelemek için sonlu elemanlar analizleri yapmışlardır. Çalışmada ASTM standartlarına göre HTA/6367 grafit fiber takviyeli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bir ve üç cıvatalı bağlantı şeklinde dört farklı tolerans değeri (10 μm , 80 μm , 160 μm ve 240 μm) için analizler yapılmıştır. Plaka ve cıvata arasında temas durumunun tanımlandığı sayısal analizler MSC.Marc yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmalarında sadece gerilme analizi yapılmış olup hasar analizi uygulanmamıştır.

Padhi ve diğeri [42], tek tesirli cıvata bağlantılı kompozit yapıların üç boyutlu sonlu eleman analizlerini yapabilmek için MSC.Patran programı içerisinde çalışabilen bir ara yazılım geliştirmişlerdir. Bu program sayesinde üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmasında, cıvata modellenmesinde ve cisimler arasında temas tanımlanmasında kolaylık sağlanmıştır. Yapmış oldukları çalışmada ayrıca MSC.Marc sonlu eleman yazılımı kullanılarak cıvata ile delik arasındaki boşluğun mukavemete olan etkisi incelenmiştir. Seri olarak üç cıvata ile bağlanmış levhalarda temas modellemesi durumu için gerilme analizleri yapılmıştır.

Kelly ve Hallström [43], çift tesirli cıvata bağlantılı karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli kompozit malzemelerde cıvata ile delik arasındaki boşluğun mukavemete olan etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, temas durumu için oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modelinin analizinden elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Cıvata ile delik arasında boşluk arttıkça, temas alanının azaldığı bu durumun da bağlantıyı yaklaşık olarak %4 oranında zayıflattığı belirtilmiştir. Pim ile levha arasındaki boşluk değerinin pim deliğı etrafındaki gerilme dağılımının değişimine önemli etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Riccio ve Scaramuzzino [44], cıvata bağlantılı $[(90^\circ/\pm 45^\circ/0^\circ)_4]_s$ HTA 6376 kompozit malzeme üzerinde çalışmışlardır. Kompozit malzemelerde hasar analizi yapabilmek için hasar ilerleme algoritması geliştirmişlerdir. Üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, kompozit-alüminyum ve kompozit-kompozit yapıların tek cıvata ile bağlantı şekli incelenmiştir. Hasar kriteri olarak Hashin kriteri seçilmiştir. Çalışmalarında hasar ilerleme algoritmasının etkisini incelemişlerdir. Ayrıca temas modellemesinde kullanılan Penaltı rijitlik parametrelerinin etkisini araştırmışlardır.

Xiao ve Ishikawa [45], çalışmalarında pim bağlantılı kompozit malzemelerde ezilme hasarını analitik metotlar kullanarak ABAQUS sonlu elemanlar programında modellemişlerdir. Analitik modelde pim ile plaka arasında temas modeli, ilerlemeli hasar analizi sonlu deformasyon ve lineer olmayan malzeme davranışlarını kullanmışlardır. İlerlemeli hasar analizinde hasar kontrolü yapmak için Hashin ve Yamada –Sun hasar kriterlerinden oluşan birleşik (hibrit) bir hasar kriteri kullanmışlardır. Elde ettikleri sayısal sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Liu ve Hou [46], tabakalı kompozit malzemelerde çift tesirli pim bağlantılarında plaka kalınlığının hasar yükleri üzerine etkisini deneysel yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Çalışmalarında özellikle kalınlığın etkisini görebilmek için aynı tabaka dizilimine sahip numunelerde kalınlığın pim deliği çapına oranının (H/D) değişimini incelemişlerdir. H/D oranının 0.4, 0.75 ve 1.5 olması durumu için 8, 24 ve 40 tabakadan oluşan kompozit malzemelerin deneyleri yapılmıştır. Deneylerde farklı fiber takviye açılarına sahip tabakalı kompozit malzemelerde fiber takviye açısının da hasar yüküne etkileri incelenmiştir.

Karakuzu ve diğerleri [47], çift tesirli pim bağlantıları ile bağlanmış tabakalı kompozit malzemelerde hasar analizini sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Levhayı bağlamak için seri olarak yerleştirilmiş iki pimin kullanıldığı çalışmada geometrik değişimin hasar yükleri üzerinde etkilerini (E/D), (W/D) ve iki delik arası mesafenin pim deliği çapına oranının, (M/D), değişimine göre incelemişlerdir. Sayısal modelleme için Lusas sonlu elemanlar programı ve hasar kriteri olarak Hashin hasar kriteri kullanılmıştır. Hasar yüklerinin geometrik parametrelerin (E/D, W/D, M/D) artmasına bağlı olarak arttığı deneysel ve sayısal çalışmaların sonucu olarak gözlemlenmiştir.

Caprino ve diğerleri [48], rastgele dağılımlı E-cam lifli ve polyester reçine matriksli tabakalı kompozit malzemelerde ezilme hasarının geometrik parametrelerle değişimini incelemişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri deneysel sonuçları Weibull gerilme dağılımı metodunu kullandıkları analitik metotlardan elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucu olarak kompozit malzemelerin pim bağlantıları ile bağlanması durumunda görülebilecek olan ezilme hasarının pim çapı D' den bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir. E-

cam fiberli polyester reçine matriksli kompozitlerde ezilme hasarının oluşabilmesi için geometrik parametrelerin $E/D > 2$ ve $W/D > 5$ olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Tercan ve diğerleri [49], 1x1 mm boyutlarında kesilmiş olan cam fiberler ile oluşturulmuş olan tabakalı kompozit malzemelerde fiber takviye açısının ve geometrik parametrelerin değişimine göre hasar yüklerinin değişimini deneysel olarak araştırmışlardır. E/D ve W/D oranlarının 4 olması durumunda ezilme mukavemetinin tüm malzemeler için hemen hemen eşit olduğunu göstermişlerdir.

Okutan ve diğerleri [50], örgülü cam fiberler ile takviye edilmiş epoksi reçineli tabakalı kompozit malzemelerde çift tesirli pim bağlantıları için hasar analizi yapmışlardır. Çalışmalarında geometrik parametrelerin hasar yükleri üzerine etkilerini deneysel metotlar kullanarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmaların sonucunda hasar yüklerinin E/D ve W/D oranlarının artışına paralel olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca E/D oranının > 2 ve W/D oranının 3 den büyük olduğu değerler için hasar yükü üzerine çok fazla etkili olmadığı sonucuna varmışlardır.

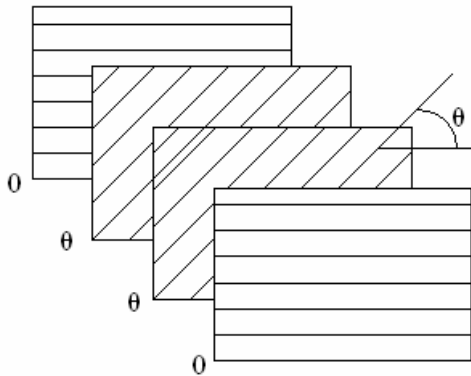
Dano ve diğerleri [51], pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde ezilme hasarının ve şekil değiştirmelerin analizini yapmışlardır. Çalışmalarında sayısal olarak geliştirdikleri sonlu eleman modelinde Hashin ve maksimum gerilme hasar kriterlerini kullanarak ilerlemeli hasar analizi yapmışlardır. Sayısal çalışmalarından elde ettikleri sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmış ve sonuçları etkileyen en önemli unsurların malzeme özelliklerinin indirgenmesi ve hasar kriterinin probleme uygunluğu olduğunu vurgulamışlardır.

3. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

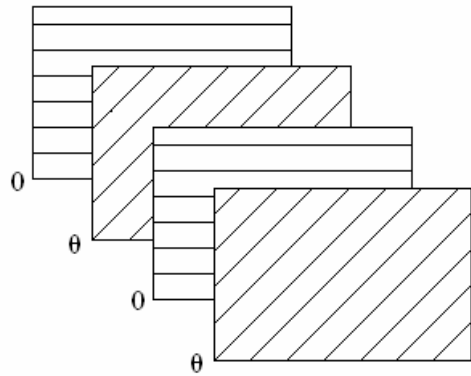
Kimyasal bileşenleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemeyi, kullanım şartlarına uygun duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilerek oluşturulan malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemeler genel olarak bir takviye malzemesi ve daha az mukavemetli matriks (dolgu) malzemesi kullanılarak oluşturulmaktadır. Fiberler ile takviye edilmiş kompozit malzemelere fiber takviyeli kompozit malzemeler adı verilmektedir. Fiber olarak çeşitli metalik malzemelerin yanı sıra cam elyafı, kevlar ve karbon gibi metalik olmayan malzemelerde kullanılmaktadır. Takviye malzemesinin kimyasal yapısına uygun olarak matriks malzemesi seçilebilmektedir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet, hafiflik, yüksek korozyon direnci, elektrik, ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklere sahiptirler [57].

Farklı fiber takviye açılarına veya farklı özelliklere sahip kompozit tabakaların belirli bir sayıda ve sırada bir araya getirilmesi ile tabakalı kompozit malzemeler oluşturulmaktadır. Her bir tabakasinda sahip oldukları farklı özelliklerinden dolayı tabakalı kompozit yapılar havacılık, uzay, konstrüksiyon vb. alanlarda sıklıkla tercih edilen yapılardır. Kompozit malzemelerin sahip oldukları özellikleri farklı katmanlarında bulundurdıkları için tabakalı kompozitler, aynı zamanda birçok özelliği bünyesinde bulundurabilirler. Örneğin aynı anda yüksek korozyon direncine, yüksek mukavemete ve elektrik yalıtımına sahip olabilirler. Fiber takviye açısının değişimi ile bir araya getirilmiş olan tabakaların simetrik veya anti simetrik tabaka dizilimi mümkündür [53, 55].

Simetrik Tabaka Dizilimi



Anti - Simetrik Tabaka Dizilimi



Şekil 3.1. Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi [61].

Tabakalı kompozit malzemelerin, metalik malzemelere göre avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

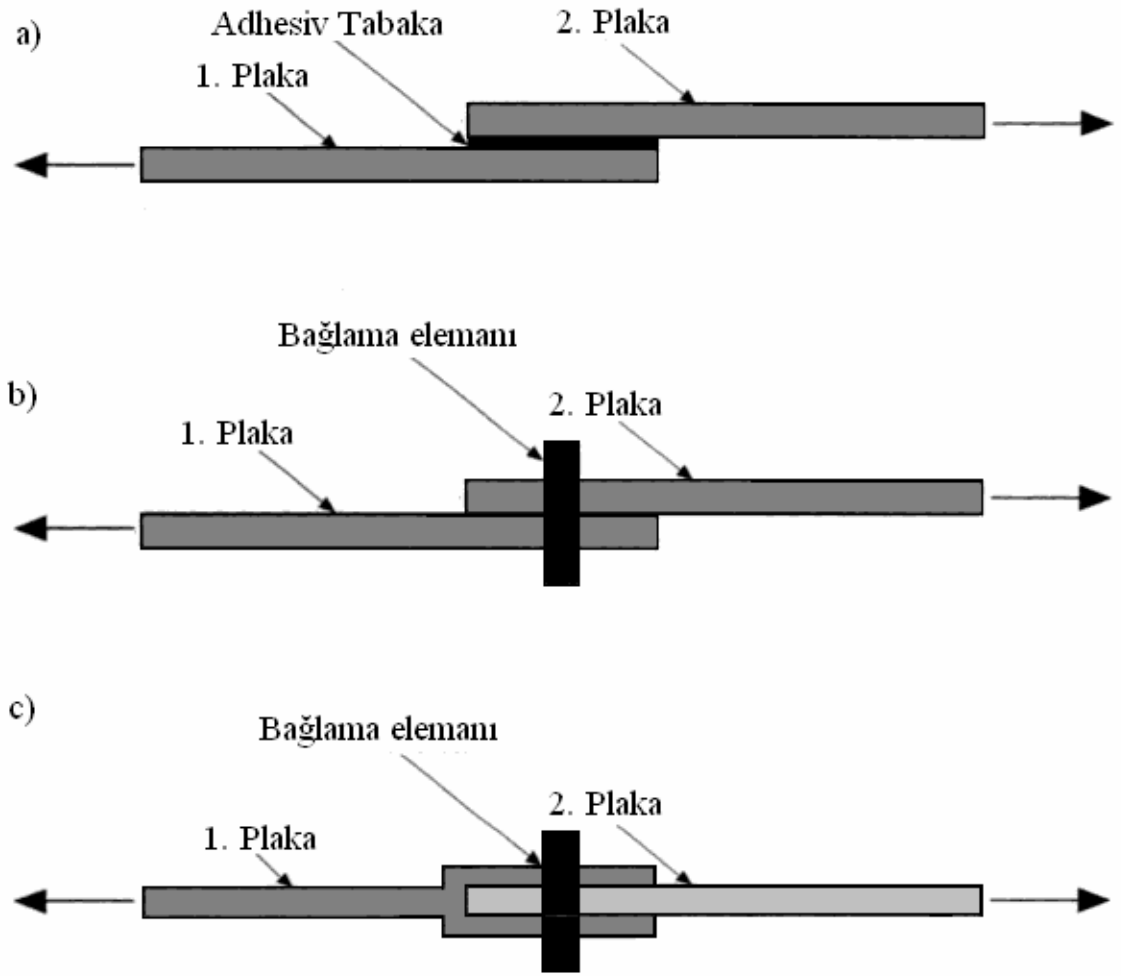
- Tabakalı kompozit malzeme üzerine etki eden yükleri farklı katmanlarında sahip olduğu farklı takviye açılarından dolayı daha kolay taşır.
- Bağlı olarak düşük bir tokluk değerine sahiptirler.
- Farklı tabaka dizilimleri ile gerilme yığılmalarına karşı oldukça mukavemetlidirler.
- Korozyona karşı dayanıklıdır.
- Isı, elektrik ve ses yalıtımı için uygun malzemelerdir.
- Isı iletim katsayıları düşüktür.

Kompozit malzemelerin yapılarda kullanılması için yapıyı oluşturan elemanlar ile birbirlerine bağlanmaları gereklidir. Kompozit malzemelerin birleştirilmesi terimi genellikle iki kompozit bileşenin birbiri ile ya da kompozit olmayan başka herhangi bir malzeme ile birleştirilmesi işlemidir [58]. Kompozit malzemelerin birleştirilmesi alışılmış metalik malzemelerin birleştirilmesinden mekanik davranışlarındaki farklılıklarından dolayı zor bir işlemdir. Tüm birleştirme işlemleri kompozitler için potansiyel birer zayıf nokta teşkil ederler. Sonuç olarak istenmeyen bir durum olan gerilme yığılmalarının kompozitlerin birleştirildikleri noktalarda ortaya çıkıyor olması kompozit malzemelerin birleştirilme probleminin önemini göstermektedir.

Temel olarak kompozit malzemelerin birleştirilmesinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

- 1- Çözülebilir (mekanik) birleştirmeler.
- 2- Adhesiv yapıştırıcılar ile (çözülemeyen) birleştirmeler.

Şekil 3.2' de kompozit malzemelerin farklı birleştirilme şekilleri temsil edilmiştir. Tabakalı kompozit yapılarda hasar modellemesi malzemenin sahip olduğu farklı mekanik davranışlardan dolayı oldukça zordur. Bunun yanı sıra çözülebilir bağlantılar ile bir araya getirilmiş tabakalı kompozit malzemelerde bağlama elemanlarının montajında için gerekli olan delikler açıldığı için gerilme yığılmaları ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin bağlanması işlemi yapıldığı zaman yapıya gelen yükler bağlama elemanları aracılığı ile bir plakadan diğerine aktarılırlar. Bu nedenle bağlantının yapılmış olduğu noktada meydana gelen gerilme yığılmaları karmaşık bir gerilme durumu olarak ortaya çıkmaktadır.



3.2. Tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı şekilleri. a) Çözümeyen (yapıştırılmalı) bağlantısı, b) Tek tesirli çözülebilir bağlantı, c) Çift tesirli çözülebilir bağlantı [58].

Her iki birleştirme tipinin kendi içerisinde çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Çözülebilir bağlantıların avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Mekanik bağlantılar tamirat gerektiren yerlerde birleştirilmiş parçaları yerinden sökmek gerektiği durumlarda kolayca çözülürken yapıştırma bağlantıları genellikle bağlanan parçaya zarar vermektedir.
- Çözülebilir bağlantılar ortam koşullarındaki yüksek yenimli kimyasal bir ortamdan çok fazla etkilenmezken, yapıştırma bağlantıları genelde yapıştırıcılar kimyasal içerikli malzemeler olduğu için çözülebilirler.
- Çözülebilir bağlantılar ortam sıcaklığının aşırı yükselmesinden veya düşmesinden çok fazla etkilenmezken, yapıştırıcılar genellikle sıcaklığa duyarlı malzemelerdir.
- Çözülebilir bağlantıların yüksek yorulma ömürleri vardır.

- Birleştirilecek parçalarda kalınlık sınırı yoktur.
- Birleştirme işlemi hızlı olarak ve çok fazla teknik bilgi gerektirmeden yapılabilir.
- İşçiliği ve uygulama malzemeleri oldukça ucuz ve yaygındır.

Çözülebilir birleştirmelerin dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Çözülebilir birleştirmelerin yapılabilmesi için kullanılan bağlantı elemanı sisteme fazladan yük getirir.
- Bağlantı yapılabilmesi için gerekli olan delik açma işlemi kesitte zayıflamaya ve gerilme yığılmalarına sebep olur.
- Ulaşılması güç olan tamirat gerektirmeyecek yerlerde kullanılması maliyeti yükseltmektedir.
- Aşırı titreşimli sistemlerde yapıştırma bağlantılarının kullanılması çözülme riskine karşı daha emniyetlidir.

Bağlantı türü gerekli emniyet hesaplamaları yapılarak seçilmektedir. Çözülebilir bağlantılarda Şekil 3.2 'de görüldüğü gibi tek tesirli ve çift tesirli olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Çift tesirli bağlantılarda tabakalı kompozit yapıda çekme gerilmelerinin yanı sıra eksantriklikten dolayı eğilme momenti de etki etmektedir. Bu nedenle tek tesirli Çözülebilir bağlantıların mukavemeti çift tesirli bağlantılara göre % 20 daha düşüktür. Bu nedenle tek tesirli mekanik bağlantılarda birden çok bağlama elemanı kullanılması gerekmektedir [56].

Çözülebilir bağlantılarda kompozit plakaya uygulanan yük bağlama elemanı aracılığı ile diğer plakaya veya plakalara aktarılmaktadır. Bağlama elemanı olarak pim, perçin veya cıvata kullanılmaktadır. Her üç bağlama elemanının ortak özelliği, birleştirme işlemi için kompozit plaka üzerine açılmış olan deliğin iç kısmına basınç uygulamalarıdır. Bu nedenle de en genel bağlantı türü olarak pim bağlantıları çözülebilir bağlantılı kompozit plakaların mekanik davranışlarının analizinde araştırma konusu olmaktadır. Şekil 3.3'de çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda oluşması muhtemel hasar tipleri görülmektedir. Bu hasar tipleri çeşitli parametrelere bağlı olarak açıklanabilmektedir.

- a) Kompozit malzeme bileşenlerinin etkisi: Takviye malzemesinin türü ve yapısı (tekyönlü, örgülü, kırılmış, rastgele dağılımlı vb.), matriks malzemesi (reçine esaslı, plastik esaslı vb.)
- b) Kompozit malzeme türünün etkisi: Tabakalı kompozit malzeme (simetrik veya anti simetrik dizilime sahip olması, farklı fiber takviye açılara sahip tabakaların olması vb.), termoplastik, toz malzemelerden sıkıştırılmış, vb.

- c) Bağlantı geometrisinin etkisi: Bağlantı elemanının montajının yapılacağı deliğin plakanın kısa kenarına olan mesafesinin oranı (E/D), plaka genişliğinin delik çapına oranı (W/D), plaka uzunluğu ve plaka kalınlığı.
- d) Bağlantı dizayn (tasarım) tipinin etkisi: Tek tesirli veya çift tesirli bağlantının olması, farklı bağlantı elemanları kullanılmış olması (cıvata, perçin veya pim), çekme, basma veya kayma zorlanmaları, yayılı yükleme, moment etkisi gibi konstrüktif zorunluluklardan kaynaklanan etkiler.

Şekil 3.3. Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmesi muhtemel hasar tipleri, (a- Yırtılma hasarı, b- Kesme hasarı, c- Ezilme hasarı, d- Yırtılma + Kesme hasarı) [56,59].

$$(\sigma_y)_{\max} = \frac{P_{\max}}{(W - D) \cdot t} \quad [3.1]$$

Şekil 3.3.b’ de görülen kesme hasarı durumu genellikle (E/D) oranının bir veya bire yaklaştığı durumlarda görülmektedir. Kesme hasarına neden olan gerilmeler [3.2] bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

$$(\sigma_e)_{\max} = \frac{P_{\max}}{D \cdot t} \quad [3.2]$$

Şekil 3.3.c’deki ezilme hasarı görülmesi durumu emniyetli çalışma açısından uygun olan ve özellikle izotrop malzemelerde görülen bir hasar türü olmasına karşın fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde delik içerisindeki gerilmelerden dolayı ezilmiş olan matriks malzemesi içerisinde yer alan ve hasara uğramayan fiberlerin ezilerek bağlama elemanının önünde bir yatak vazifesi görmesi ile yüklemelerin artmasına rağmen kopma türünde bir hasarın görülmemesi halidir. Hasar yükleri hesaplanırken [3.2] bağıntısı kullanılmaktadır.

[3.1] ve [3.2] numaralı bağıntılarda $(\sigma_y)_{\max}$ (MPa): yırtılma hasarına neden olan maksimum gerilmeyi, $(\sigma_e)_{\max}$ (MPa): Kesme veya yırtılma hasarına neden olan maksimum gerilmeyi, $P_{\max}$ (N): plakaya uygulanan yükü, W (mm): plaka genişliğini, D (mm) : plaka üzerine açılmış olan deliğin çapını ve t (mm): plakanın kalınlığını göstermektedir.

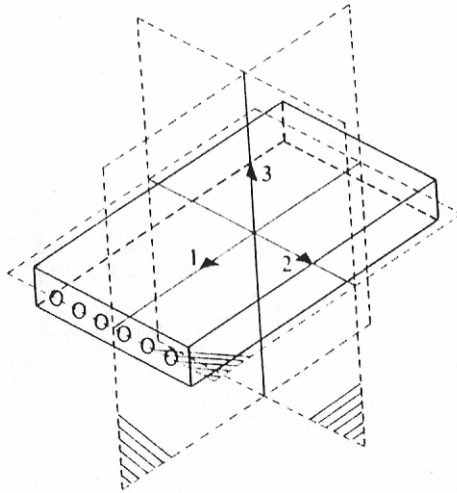
Şekil 3.3.d’de ise kesme ve yırtılma hasarının aynı anda gerçekleşmiş olması yüklemelerin eksantrikliğinden, iki eksenden farklı yükleme durumundan veya fiber takviye açısından dolayı ortaya çıkmaktadır [1-20].

4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ ANALİZİ

Tabakalı kompozit malzemelerin çözülebilir bağlantılarla bağlanması durumunda bağlantı sisteminde ortaya çıkacak durumun mekanik açıdan analiz edilmesi için mekanik davranışlarının incelenmesi gerekmektedir. Bu analizler sayısal modellemenin temelini oluşturmaktadır. Mekanik davranışların analizi gerilme analizi, sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerilmelerin analizi ve hasar analizi olmak üzere üç bölümde incelenecektir.

4.1. Gerilme Analizi

Tüm doğrultularda mekanik özellikleri aynı olan malzemelere izotrop malzeme olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemeler izotrop malzemelerden farklı olarak tüm doğrultularda farklı mekanik özelliklere sahiptirler. İzotrop olmayan bu malzemeler birbirine dik üç düzlemde farklı özellikler gösteren ortotropik cisimlerdir. Tek yönlü olarak takviye edilmiş olan kompozit yapılar her bir düzleminde kendi içerisinde simetrik malzeme özelliklerine sahiptirler ve bu özelliklerinden dolayı da ortotropik malzeme olarak kabul edilmektedirler.



Şekil 4.1. Tek yönde takviye edilmiş kompozit yapılarda malzeme özelliklerinin üç simetri düzleminin gösterilmesi [59].

Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki eşitliği veren Hook kanunu izotrop malzemelerden farklı olarak tüm doğrultuları kapsayacak şekilde tansörel biçimde [4.1],

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (i,j,k,l = 1,2,3) \quad [4.1]$$

şeklinde yazılır.

Burada σ_{ij} , gerilme tansörü, C_{ijkl} , elastiklik tansörü ve ε_{kl} , şekil değiştirme tansörüdür. Kütle kuvvetlerinin ihmal edildiği durumlar için simetrik yapılarda $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ve $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$ olduğu için [4.1] eşitliği :

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad [4.2]$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade matris formunda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad [4.3]$$

[4.3] eşitliğinde yazılmış olan ifadelerde yer alan katsayılar C_{ij} tansörünün simetriklik özelliği göz önüne alınarak hesaplanır. Bu simetriklik malzemenin ortotropik özelliğinden ileri gelmektedir ve simetrik değerler yerine yazıldığı zaman eşitlikler kısalmaktadır. Bunun için genel şekil değiştirme enerjisi denklemlerinden yararlanmak gerekir. $d\sigma_i$ birim gerilmesinin cisim üzerine etki etmesi durumunda gerçekleşen $d\varepsilon_i$ şekil değiştirmesinden dolayı cisimde meydana gelen dw enerjisine şekil değiştirme işi adı verilmektedir. [4.3] eşitliğinde yazılmış olan şekil değiştirmeler diferansiyel formda yer değiştirmeler cinsinden,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{23} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{13} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad [4.4]$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada; u, v, w fonksiyonları sırası ile x, y, z eksenlerindeki yer değiştirmelerdir. Elastiklik matrisi elemanlarını daha az elemanla ifade edebilme için yazılması gereken şekil değiştirme enerjisi eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$dw = \sigma_i \cdot d\epsilon_i \quad [4.5]$$

Bu eşitlikte σ_i yerine [4.2] eşitliğinde yer alan değeri yazılır ve integrali alınır:

$$w = \frac{1}{2} C_{ij} \epsilon_j \epsilon_i \quad [4.6]$$

eşitliği elde edilir. i ve j indislerinin yer değiştirmesi ve [4.6] eşitliğinde yerine yazılıp iş ifadesinin şekil değiştirmelere göre iki kez türevi alınarak,

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \epsilon_i \partial \epsilon_j} = C_{ij} = \frac{\partial^2 w}{\partial \epsilon_j \partial \epsilon_i} = C_{ji} \quad [4.7]$$

elde edilir. Buradan $C_{ij} = C_{ji}$ şeklinde simetrik olduğu görülmektedir ve böylece elastiklik matrisi simetriktir ve 21 elemanla gösterilebilir. Tek yönde takviye edilmiş malzemelerde her doğrultunun kendi içerisinde simetrik olması durumu kısmen izotrop malzeme davranışına benzediği için birbirine dik doğrultuda simetrik malzemeler için yazılan [4.3] eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad [4.8]$$

Herhangi bir malzemede ortotropi özelliğinin yanı sıra mekanik özelliklerin bütün doğrultularda aynı olduğu tek bir düzlem malzemenin her noktasında mevcut ise 1 ve 2 indislerinin birbirine karşılık geldiği elemanlar birbirlerine eşit olurlar. Bu durumda [4.8] eşitliğinde $C_{11} = C_{22}$, $C_{13} = C_{23}$, $C_{44} = C_{55}$ ve $C_{66} = (C_{11} - C_{12})/2$ olarak yazılabilir. Eğer malzeme içerisinde sonsuz sayıda simetri düzlemi mevcutsa elastiklik matrisinin elemanları yalnızca iki indisle ifade edilebilir. Bu duruma uyan malzemelere anizotrop malzemeler adı verilmektedir. Bu durumda [4.8] eşitliği yeniden düzenlenirse [4.9] eşitliği elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad [4.9]$$

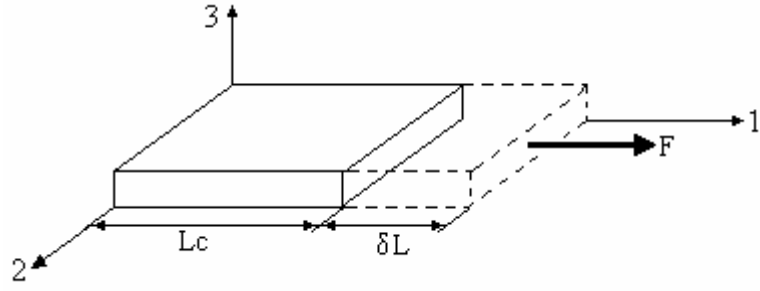
[4.2] bağıntısından şekil değiştirmeler için elastiklik matrisinin tersi alınarak [4.10] eşitliği elde edilmiş olur. Burada S matrisi elastiklik matrisinin tersidir ve uygunluk matrisi ya da tamamlayıcı matris olarak ta adlandırılır. Tansörel olarak şekil değiştirmeler; gerilmelere bağlı olarak,

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad [4.10]$$

şeklinde yazılır. Tamamlayıcı matrisi [4.9] eşitliğinden yararlanarak matris formda şu şekilde yazılır:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad [4.11]$$

S tamamlayıcı elemanlarını bulmak için bulmak için tek yönde yüklemeler yapılır.



Şekil 4.2 . Fiber takviye doğrultusunda (1) yapılan yükleme durumu.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi sadece 1 yönünde F_1 kuvvetinden dolayı oluşan σ_1 gerilmelerinin olduğu durumu göz önüne alınarak, Hook kanununun iki boyutlu gerilme durumu için [4.12] eşitliği yazılabilir.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ ve } \epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_{12}\epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{12}\epsilon_1 \end{bmatrix} \quad [4.12]$$

Benzer şekilde diğer gerilme yönlerde de tek eksenli yüklemelerin yapıldığı dikkate alınarak S_{ij} tamamlayıcı matrisi elemanları bulunmuş olur.

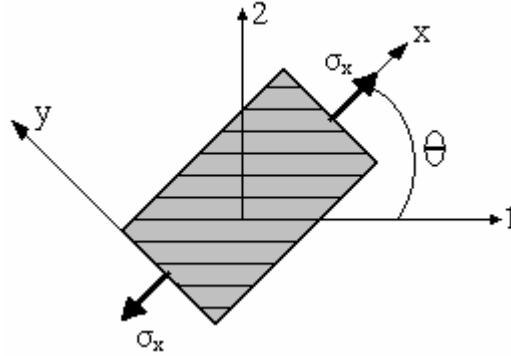
$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad [4.13]$$

[4.11] eşitliğini düzlem şekil değiştirme hali için tekrar yazılırsa [4.14] nolu eşitlik elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [4.14]$$

4.1.1. Fiber takviye açısının gerilme – şekil değiştirme bağıntılarına etkisi

Fiber takviye açısı kompozit yapının mekanik özelliklerinin değişiminde en etkili rol oynayan parametrelerden biridir. Gerilme şekil değiştirme eşitliklerinde takviye açısı göz önüne alınarak hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Tek yönde takviye edilmiş kompozit levhalarda fiber doğrultusunda uygulanan yükü fiber ve matris birlikte taşıırken fibere dik doğrultuda yapılan yüklemeler sadece matris tarafından taşınmaktadır. Bu nedenle de fiber doğrultusuna paralel olarak yapılan yüklemelerde mukavemeti matriks malzemesine göre çok daha yüksek olan fiberler yükü taşıyarak kompozit malzemenin mukavemetini artırırken fibere dik doğrultuda yapılan yüklemelerde daha zayıf mekanik özelliklere sahip olan matriks yükü taşıyamamaktadır [54, 55].



Şekil 4.4. Fiber takviye doğrultusu ve yüklemeler.

Şekil 4.3’de görülen olan fiber takviye açısı θ doğrultusundaki gerilmeler düzlem gerilme analizi formüllerinden [4.15] eşitliğindeki şekli ile elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_x \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \\ \tau_{12} &= -(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad [4.15]$$

[4.15] eşitliğinde $\sin\theta = s$ ve $\cos\theta = c$ şeklinde yazılarak eşitlik matris formda;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2.c.s \\ s^2 & c^2 & -2.c.s \\ -s.c & s.c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad [T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2.c.s \\ s^2 & c^2 & -2.c.s \\ -s.c & s.c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad [4.16]$$

şeklinde elde edilir. [4.16] eşitliğinde trigonometrik ifadelerden oluşan T matrisine transformasyon (dönüşüm) matrisi adı verilir ve gerilmeler için yazılmış olan bu eşitlik aynı şekli ile Hook kanununa göre şekil değiştirmeler için de yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad ; \quad \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [4.17]$$

[4.17] eşitliğinin [4.14] eşitliğinde yerine yazılması halinde:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [4.18]$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{21} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{66} = G_{12}$$

Dönüşüm matrisi T kullanılarak takviye doğrultusunda yazılmış olan [4.16] eşitliği asıl eksen takımı olan x ve y notasyonunda [4.17] ve [4.18] numaralı eşitliklerde yerine yazılması ile [4.19] numaralı eşitlik elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [4.19]$$

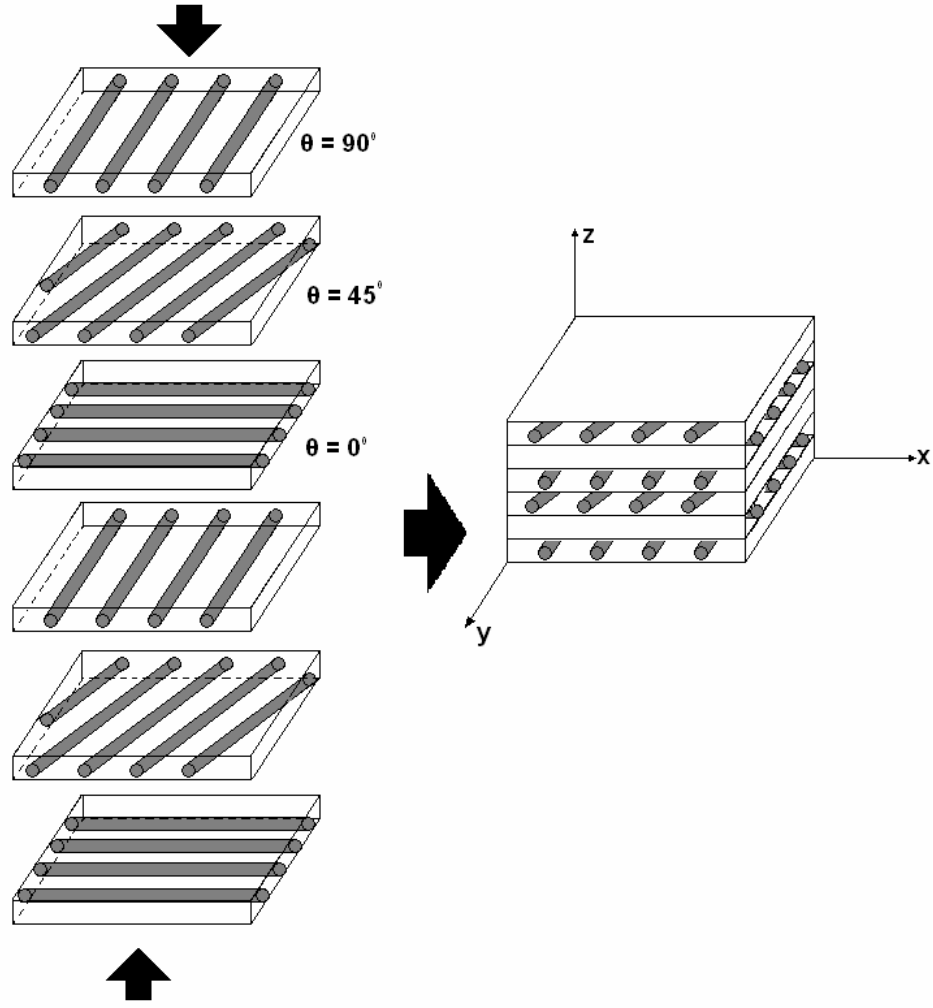
[4.19] eşitliğinde son terim x ve y eksenlerinde fiber takviyeli kompozit malzemeler için uygulanan gerilmelere karşı şekil değiştirmeleri veren eşitliktir.

4.1.2 Tabakalı kompozit malzemelerde gerilme analizi

Tabakalı kompozit malzemelerin gerilme analizleri izotrop malzemeler için yazılmış olan klasik tabaka teorisi kullanılarak gerekli eşitliklerin kompozit malzemelere uyarlanması ile yapılmaktadır. Bu nedenle problemin çözümü düzlem gerilme analizine göre yapılmaktadır.

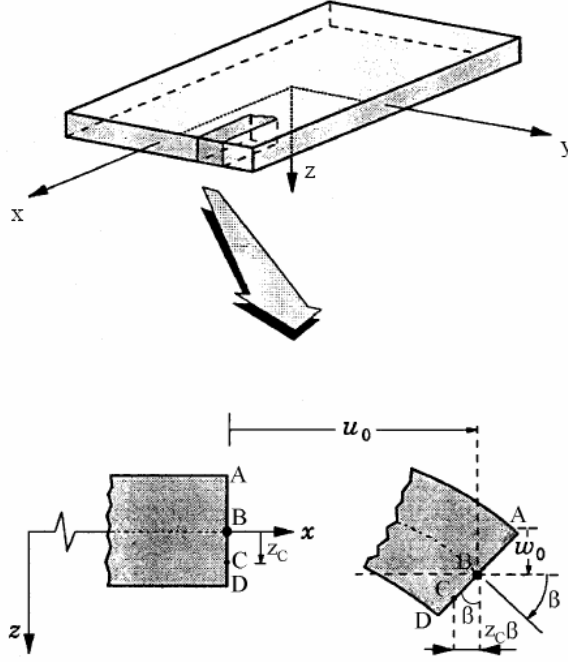
Statik analiz için temel varsayımlar şu şekilde sıralanabilir:

- a-** İmalat yöntemi ne şekilde olursa olsun bir araya getirilmiş olan tabakaların birleştirilmesi sonucunda tabakalı yapıya sahip olan plakalar ortaya çıkmaktadır.
- b-** Her bir tabakanın asal malzeme eksenleri 1 ve 2, x ve y eksenine göre keyfi olarak herhangi bir açı değerinde seçilebilir.
- c-** Sabit plaka kalınlığı (t) plakanın diğer iki boyutu yanında ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- d-** u, v ve w yer değiştirmeleri plakanın kalınlığının yanında çok küçük değerlere sahiptir.
- e-** Kalınlık doğrultusundaki kayma şekil değiştirme bileşenleri γ_{xz} , γ_{yz} ve şekil değiştirme ε_z ihmal edilebilecek kadar küçüktürler.
- f-** u ve v teğetsel yer değiştirmeler z ekseninin bir fonksiyonudur.
- g-** Her bir plaka Hook kanununa uyar.



Şekil 4.4. Farklı fiber takviye açılarına sahip tabakalardan oluşturulmuş kompozit yapı.

Sıralanmış olan d ve e maddelerinin sağlanması durumunda tabakalı yapılar için geçerli olan Kirchhoff deformasyon hipotezinin tanımlanmış olduğu görülmektedir. Bu hipoteze göre orta düzleme dik olan doğrultular deformasyon sonrasında da bu düzleme dik olarak kalmaktadır.



Şekil 4.5. Kirchhoff deformasyon hipotezine göre plakanın kenarında deformasyona uğrayan ve deforme olmamış kenarlar [10].

Şekil 4.5'den de görüldüğü gibi Kirchhoff deformasyon hipotezine göre tabakanın kesit alanı x-z düzleminde. Bu durumda B noktasının deforme olmuş ortadaki yüzeyden deformasyona uğramamış olan noktaya olan x yönündeki yer değiştirmesi u_0 olarak alınacaktır. ABCD çizgisinin deformasyon sonrasında düz kalması durumunda x yönündeki yer değiştirmesi:

$$u_0 = u_c - z_c \cdot \beta \quad [4.20]$$

olarak yazılır. Burada yazılmış olan β parametresi deformasyon sonrasında ABCD olarak gösterilmiş olan çizgiye ait olan tabakanın orta yüzeyinin x doğrultusundaki eğimidir.

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad [4.21]$$

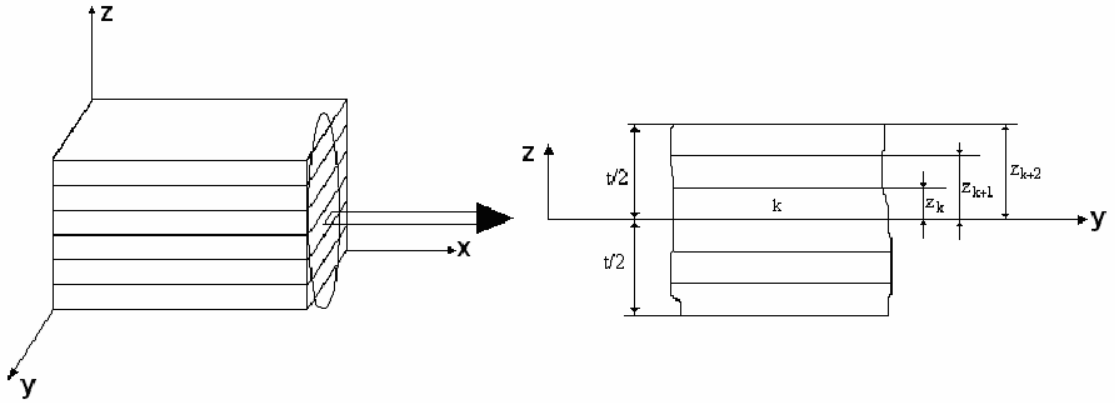
[4.21] denklemi ile ifade edilmiş olan β parametresi x yönünde yazıldığı gibi y yönünde ve x-y düzleminde de yazılabilir. β parametresinin yerine yazılması ile yer değiştirmeler ve buna bağlı olarak ta şekil değiştirme eşitlikleri [4.22] ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
u &= u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} ; \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \epsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\
v &= v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} ; \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow \epsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \Rightarrow \gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

[4.22] numaralı eşitlikte bulunan şekil değiştirme ifadeleri matris notasyonunda,

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{4.23}$$

şeklinde yazılır.



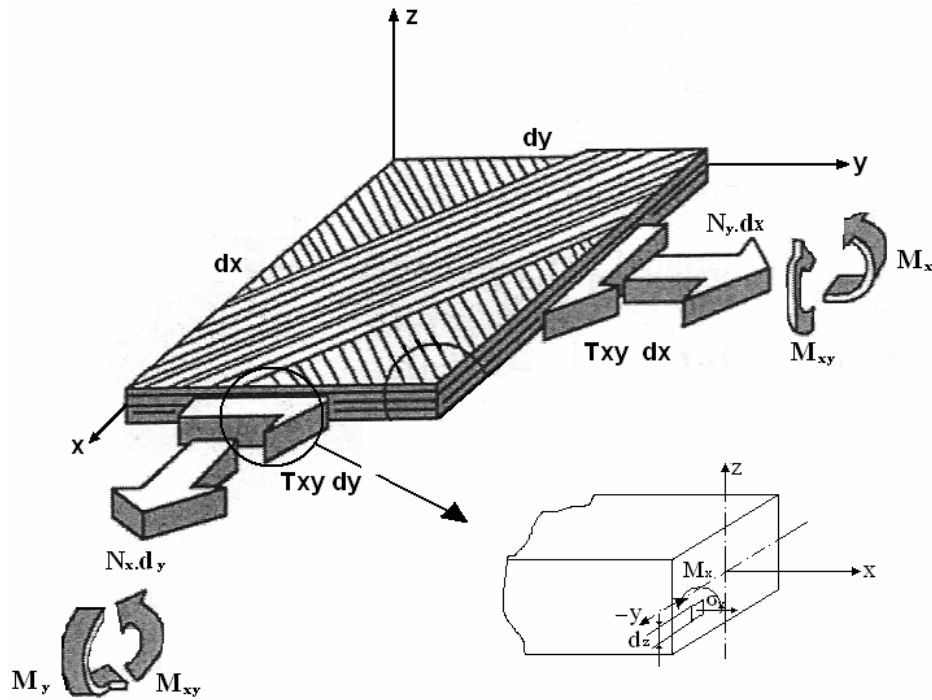
Şekil 4.6. Tabakalı kompozit yapıda simetri düzlemi ve tabaka kalınlıkları [59].

Plakada genel şekil değiştirme deformasyonuna uygun elde edilmiş olan [4.23] eşitliği [4.19] eşitliğinde yerine yazılarak [4.24] numaralı eşitlik elde edilmiş olur. Bu eşitlik k indisli tabakaya ait gerilme şekil değiştirme eşitliğidir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad [4.24]$$

$\bar{Q}_{ij}$ terimi sadece k indisli tabakaya aittir.

Şekil 4.7’de gösterilen kuvvet ve momentler etkisi altındaki cisimde eksenel normal kuvvet ve moment ifadeleri [4.25] nolu eşitlikte verilmiştir.



Şekil 4.7. : Normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, eğilme ve burulma momentleri uygulanarak yüklenmiş olan tabakalı kompozit malzeme [57].

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \quad [4.25]$$

Şekil 4.6 'deki z plaka kesitinden alınmış olan diferansiyel elemanın tarafsız eksene uzaklığı ve dz de diferansiyel elemanın kalınlığıdır. [4.25] eşitliği tüm tabakalar için, x ,y eksenlerine göre ve x-y kayma düzlemine göre yazılırsa :

$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz \\
 M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

ifadeleri elde edilir. Buradan z_k ve z_{k-1} Şekil 4.7'dende görüldüğü gibi tabaka sayısının değişimidir. Gerilmeler için elde edilmiş olan [4.24] eşitliği [4.26] eşitliğinde yerine yazıldığı zaman [4.27] eşitliği elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned}
 N_x &= \sum_{k=1}^n \left[\begin{array}{ccc} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{array} \right]_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \\
 M_x &= \sum_{k=1}^n \left[\begin{array}{ccc} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{array} \right]_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\}
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy} , K_x , K_y ve K_{xy} z terimine bağlı büyüklükler olmadığı için ifadenin dışına alınarak denklemler düzenlenirse tüm sisteme ait komple direngenlik matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{36} & B_{61} & B_{62} & B_{63} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{Bmatrix}_{6 \times 1} \quad [4.28]$$

Burada A, B ve D terimleri [4.29] nolu denklemde verilmiştir.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ B_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad [4.29]$$

4.2. Sonlu Elemanlar Metodu ile Gerilme Analizi

Mühendislik problemlerinin çözümünde analitik ve deneysel çalışmaların yanı sıra sayısal metotlarda kullanılmaktadır. Karışık geometrilere sahip ve birçok bilinmeyi ihtiva eden problemleri çözebilmek için sayısal metotların kullanımı problem çözümlerinde oldukça faydalıdır. Sonlu elemanlar metodu mühendislik problemlerinin çözümünde oldukça yaygın olarak kullanılan sayısal bir yöntemdir.

Sonlu elemanlar metodu ile gerilme analizi, katı bir cismin sayısal modelini sonlu küçüklükte elemanlara bölerek oluşturulan çok sayıda ve süreklilik teşkil eden elemanlarda, dış kuvvetlerin tesiri ile oluşan gerilme ve şekil değiştirmelerin hesaplandığı bir yöntemdir. Problemlerin çözümünde problemin sınır şartlarına uygun olarak bir, iki veya üç boyutlu sonlu eleman modellerinin kullanılması mümkün olmaktadır. Özellikle sonlu elemanlar metodunun uygun bilgisayar programlarında bir takım kodlar yazılarak kullanılması neticesinde problemlerin üç boyutlu olarak çözülmesi sağlanmıştır.

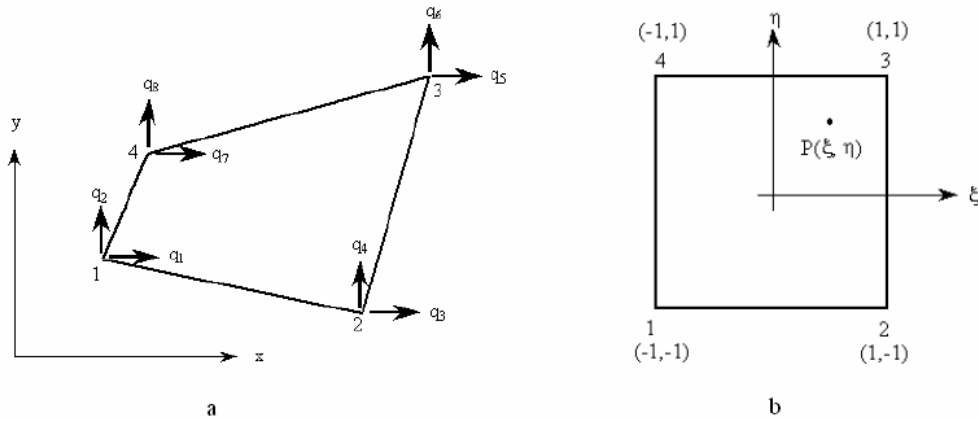
Üç boyutlu halde yer değiştirme bileşenleri u, w, v sırası ile x, y, z yönlerine aittir. [4.1] bağıntısı matris notasyonunda yeniden yazılırsa,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [4.30]$$

eşitliği elde edilir. $\{\epsilon\}$ şekil değiştirme matrisi yer değiştirmeler cinsinden düzlem şekil değiştirme hali için şu şekilde yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} ; \{\epsilon\} = [D]\{\delta\} \quad [4.31]$$

[4.31] eşitliğinde $\{\delta\}$ yer değiştirmeler matrisidir ve görüldüğü gibi şekil değiştirmeler yer değiştirmelerin bir fonksiyonu olarak yazılabilmektedir. Düzlem gerilme analizi için 4 düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılması durumunda şekil fonksiyonları ζ ve η olarak adlandırılan yeni bir eksen takımında tanımlanmalıdır [60].



Şekil 4.8. Dört düğümlü izoparametrik eleman [10].

Yer değiştirmelerin türevlerinin alınması ile elde edilen şekil değiştirmeleri bulabilmek için sonlu elemanlar metodunda şekil fonksiyonları kullanılmaktadır. Şekil fonksiyonları, bir elemana ait düğüm noktalarının yer değiştirme fonksiyonlarına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Düzlem gerilme analizi için 4 düğümlü izoparametrik eleman seçilmiştir. Eleman düğümlerinin koordinatları x-y doğal koordinat sisteminde yazılabilir, ancak çözümleri kolaylaştırmak içinse

ζ - η yerel (lokal) eksen takımı seçilmelidir. Şekil 4.8 'de elemanın düğümleri ve eksen takımları görülmektedir. Şekil fonksiyonları,

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\zeta)(1-\eta) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1+\zeta)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\zeta)(1+\eta) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1-\zeta)(1+\eta) \end{aligned} \quad [4.32]$$

şeklinde yazılır. i elemanı için bu eşitlik tansörel notasyonda,

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + \zeta\zeta_i)(1 + \eta\eta_i) \quad [4.33]$$

şeklinde yazılır. Şekil fonksiyonu kullanılarak yer değiştirmeler matris formda,

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix} = \sum_i^n \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix}_i \quad [4.34]$$

şeklinde yazılır. Burada n toplam düğüm sayısı ve N_i , i numaralı düğümün şekil fonksiyonunu göstermektedir. Şekil değiştirmeler ile yer değiştirmeler arasındaki eşitlik şekil fonksiyonlarının kullanılması ile matris notasyonda,

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_x^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,y} & 0 & 0 & 0 \\ N_{i,y} & N_{i,x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{i,x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -N_{i,y} \\ 0 & 0 & 0 & N_{i,y} & -N_{i,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix} \quad [4.35]$$

şeklinde yazılır. Tansörel notasyonda i düğüm sayısını göstermek üzere şu şekilde yazılabilir:

$$\{\epsilon_{bi}\} = [B_{bi}] \{u_i\} \quad [4.36]$$

Burada $\{u_i\}$, düğüm noktalarının yer değiştirme vektörüdür. Gerilme vektörünün eleman düğüm noktalarına ait vektörel gösterimi ise:

$$\{\sigma_i\} = [D][B_{bi}] \{u_i\} - [D] \{u_i\} \quad [4.37]$$

şeklinde yazılmaktadır. Eleman rijitlik matrisinin teşkili için Minimum potansiyel enerji metodu kullanılır. Denge durumundaki tabakalı bir yapının toplam enerjisi :

$$\Pi = U_e + W_e \quad [4.38]$$

Eşitliği ile hesaplanabilir. Burada U , eğilmeden kaynaklanan şekil değiştirme enerjisi ve W , dış kuvvetler etkisi ile cisimde meydana gelen potansiyel enerjidir [52, 53].

$$U_e = \frac{1}{2} \int_{-t/2}^{t/2} \left[\int_A (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dA \right] dz \quad [4.39]$$

$$W_e = - \int_A w p dA - \int_A (\bar{N}_n^b u_n^0 + \bar{N}_s^b u_s^0) ds$$

Burada, $dA = d_x \cdot d_y$, p birim alana dik doğrultuda gelen kuvvet ve $\bar{N}_n^b$ ve $\bar{N}_s^b$ terimleri δR sınırına kadar uygulanmış olan düzlemsel kuvvettir. [4.39] eşitliğinin gerilme ve şekil değiştirmeler türünden yazılması ile aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir.

$$U_e = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T [E] \{\epsilon\} dV \quad [4.40]$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \{\delta\}^T [b] dV - \frac{1}{2} \int_{si} \{\delta\}^T \{P_y\} dS_i + \sum_{i=1}^n \{\delta_i\}^T \{P_i\}$$

Burada, dV , birim hacim elemanı, $[b]$, cisme etki eden kütle kuvvetleri, $\{P_y\}$, yayılı yükleri ve $\{P_i\}$, tekil yükleri göstermektedir. Enerji ifadelerinde sınır şartları yerlerine yazılarak bir elemana ait toplam enerji denklemi elde edilir.

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \Pi^e - \{Q\}^T \{F_c\} \quad [4.41]$$

Enerjinin herhangi bir noktadaki yer değiştirmeye göre türevinin alınması o noktada yer değiştirmeye neden olan kuvveti verir [60]. Bu ifade Castigliano teoremi olarak bilinir.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{u_i\}} = \{P_i\} \quad [4.42]$$

[4.42] eşitliğinin kullanılması ile bir elemanın düğüm noktalarında meydana gelen kuvvet $\{P\}$, yer değiştirme $\{u_i\}$ ve direngenlik matrisi $[D]$ yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$\{P_i\} = [D]_i \{u_i\} \quad [4.43]$$

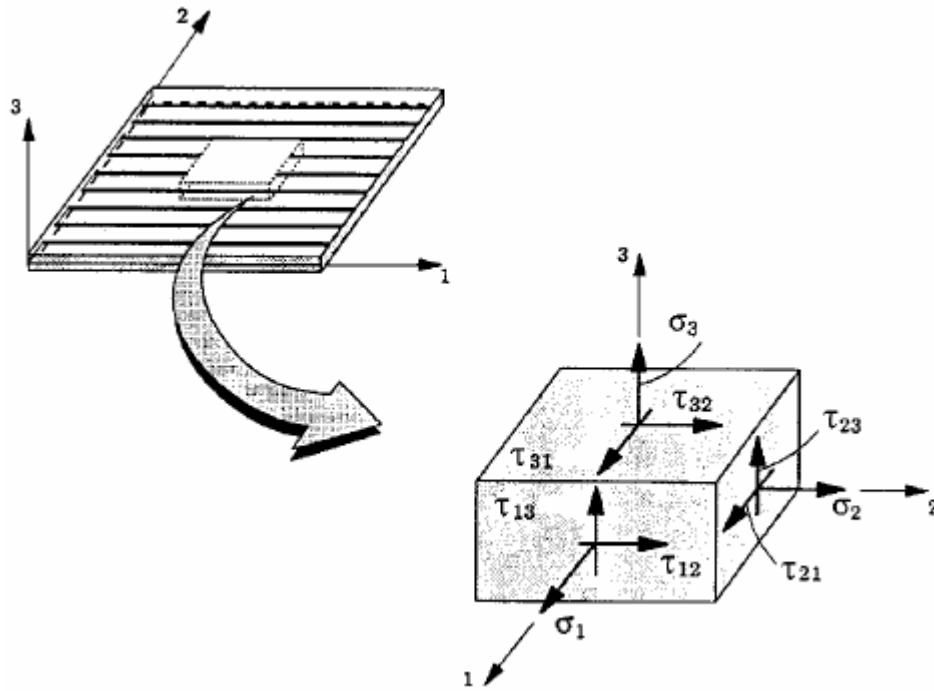
Her bir elemana ait düğüm kuvvetleri ve yer değiştirmeler komple direngenlik matrisinde yerine yazılarak tüm sisteme ait dış kuvvetlerin etkisi ile cisimde meydana gelen düğüm ve eleman kuvvetleri bu sayede hesaplanmış olur.

4.3. Hasar Analizi

Belirli sınır şartlarında çalışan malzemelerin yüklemelere dayanım sınırı malzeme mukavemetini belirleyen unsurdur. Sonuçta yüklemelerin belirli değerleri aşması durumunda malzemede hasar meydana gelecektir. Bu hasarın göz önüne alınarak emniyetli çalışma için gerekli şartların belirlenmesi için yapılan deneylerle malzemeye ait mekanik özellikler tespit edilerek mukavemet sınırları belirlenmektedir. Malzemede oluşan dış kuvvetler sonucunda ortaya çıkan gerilmelere göre malzemenin emniyetli olarak çalışıp çalışmayacağını analiz edilmesi işlemine hasar analizi denir.

Sayısal olarak hasar yüklerinin tespit edilmesi ve hasarın oluşum şeklini modelleyebilmek için çeşitli hasar teorileri öne sürülmüştür. Bu teorilerin esas amacı malzemenin hasara uğrayacağı gerilmelerin önceden tespit edilmesini sağlayarak yüklem sınırlarını tespit edebilmektir. Bu amaçla deneysel çalışmalar sonucu bilinmekte olan kırılma tipi göz önüne alınmaktadır. Özellikle tabakalı kompozit malzemelerde gerilmelerin tabaka dizilimi, fiber takviye açısının değişimi ve tabaka sayısının değişimi gibi birçok parametreye bağlı olması izotrop malzemelerden oldukça farklı bir hasar yapısı göstermesine neden

olmaktadır. Kompozit malzemelerin hasar analizi için birçok farklı model ve yöntem geliştirilerek deneysel yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Tüm hasar teorilerinde bulunan ortak nokta eşlenik gerilme olarak adlandırılan ve hasar yüklerinin hasara uğrayan kesite bölünmesinden elde edilen gerilmedir. Hasarın doğrulanması için eşlenik gerilme ifadesinin birden büyük olması gerekmektedir. Eşlenik gerilmelerin birden büyük olması durumu hasarın oluşumu için yeter şart iken tersi durumlarda ise hasardan bahsedilmez. Bu bölümde bazı hasar teorileri ve hasar analizi için gerekli olan eşitlikler verilmiştir.



Şekil 4.9: Kompozit tabakada fiber takviye doğrultusuna göre oluşan gerilmeler [10].

4.3.1. Maksimum gerilme hasar teorisi

Bu teoride Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi malzemenin asal eksenleri doğrultusundaki gerilme bileşenlerinin, o doğrultudaki malzeme dayanım değerlerini aşması halinde hasarın oluşacağı savunulur.

$$\sigma_1 < X_c \quad (\sigma_1 > 0 \text{ için})$$

$$\sigma_2 < Y_c \quad (\sigma_2 > 0 \text{ için})$$

$$\sigma_3 < Z_c \quad (\sigma_3 > 0 \text{ için})$$

$$\tau_{12} < S \quad (\tau > 0 \text{ için})$$

$$\sigma_1 > X_b \quad (\sigma_1 < 0 \text{ için})$$

[4.44]

$$\sigma_2 > Y_b \quad (\sigma_2 < 0 \text{ için})$$

$$\sigma_3 > Z_b \quad (\sigma_3 < 0 \text{ için})$$

Burada ;

X_ϕ ve X_b : Takviye doğrultusundaki çekme ve basma mukavemetini,

Y_ϕ ve Y_b : Takviyeye dik doğrultuda y yönündeki çekme ve basma mukavemetini,

Z_ϕ ve Z_b : Takviyeye dik doğrultuda z yönündeki çekme ve basma mukavemetini,

S : Kayma mukavemetini göstermektedir,

σ_1 : Fiber takviye doğrultusunda uygulanan çekme gerilmesi,

σ_2, σ_3 : Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultularda uygulanan çekme gerilmesi,

τ_{12} : Kayma gerilmesi.

4.3.2. Tsai – Hill hasar teorisi

Tsai – Hill hasar teorisi Von Mises izotropik akma teorisinin anizotropik malzemelere uygulanmış hali olarak düşünülebilir.

$$GH\sigma_1^2 + FH\sigma_2^2 + FG\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 < 1 \quad [4.45]$$

Burada $GH = (G + H)$, $FH = (F + H)$, $FG = (F + G)$ indisi şeklinde gösterilir. Terimlerin hesaplanması için çeşitli gerilmelerin sistemde bulunma şartlarının sağlanması gereklidir.

$$\begin{aligned} 2N &= \frac{1}{S^2} \\ GH &= \frac{1}{X^2} \\ FH &= \frac{1}{Y^2} \\ FG &= \frac{1}{Z^2} \\ 2H &= \frac{1}{H^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \\ 2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\ 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \end{aligned} \quad [4.46]$$

4.3.3. Tsai–Wu hasar teorisi

Bu teori anizotropik malzemeler için en sık kullanılan hasar teorisidir. Bu teoriye göre [4.47] eşitliğinin sağlanması halinde hasar meydana gelmez [19].

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \quad [4.47]$$

Üç eksenli gerilme durumu için [4.47] eşitliği açık şekilde [4.48] eşitliği ile gösterilmiştir.

$$\left[F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_3 \sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X_c X_b} + \frac{\sigma_2^2}{Y_c Y_b} + \frac{\sigma_3^2}{Z_c Z_b} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S^2} + 2 F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2 F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2 F_{13} \sigma_1 \sigma_3 \right] \quad [4.48]$$

Burada kullanılan indis şeklindeki ifadeler [4.49] eşitliğinde gösterilmiştir.

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_b} \right); F_2 = \left(\frac{1}{Y_c} - \frac{1}{Y_b} \right); F_3 = \left(\frac{1}{Z_c} - \frac{1}{Z_b} \right) \\ F_{12}^2 = \left(\frac{1}{X_c X_b} - \frac{1}{Y_c Y_b} \right); F_{23}^2 = \left(\frac{1}{Y_c Y_b} - \frac{1}{Z_c Z_b} \right); F_{13}^2 = \left(\frac{1}{X_c X_b} - \frac{1}{Z_c Z_b} \right) \quad [4.49]$$

4.3.4. Hashin hasar teorisi

Hashin hasar teorisi daha önce ifade edilen 3 farklı hasar teorisinden ve burada yazılmamış olan diğer hasar teorilerinden farklı olarak eşlenik gerilmelerin her bir fiber takviye doğrultusunu ve kayma durumunu göz önüne alarak ayrı ayrı incelemektedir. Bu hasar teorisinde probleme esas teşkil eden yaklaşım şekli fiber takviye doğrultusunda ve fibere dik yöndeki doğrultuların mukavemetlerinin sırası ile fiber mukavemeti ve matriks mukavemeti olarak adlandırılmasıdır. Fiber mukavemeti olarak düşünülme sebebi uygulamada takviyeye paralel yönde yapılacak olan yükleme durumunda matriks malzemesi hasara uğrasa bile fiberlerin yapının yük taşımaya devam etmesini sağlayacak olmasıdır. Bu durumda fibere paralel yönde yükleme olması durumunda fiberlerin kırılması ile hasar gerçekleşecektir. Aynı yaklaşımla fibere dik doğrultuda yapılacak olan yüklemeleri ancak matriks taşıyacaktır. Matriksin hasar görmesi durumunda fiberler sağlam olmasına rağmen yapıyı bir arada tutamazlar ve kırılma gerçekleşir. Bu hasar teorisi farklı hasar tiplerini ayrı ayrı temsil ettiği için hangi yük değerinde yapıda hangi tür hasar olduğunu tespit etmek mümkün olmaktadır.

Hasar türünün belirlenmesi ile sonlu elemanlar metodu ile ilerlemeli hasar analizi yapmak için gerekli olan malzeme özelliklerinin indirgenmeleri kuralının uygulanması bu hasar teorisinin kullanılması ile mümkün olmaktadır [3, 10, 19, 54]. Malzeme özelliklerinin indirgenmesi kuralı, hasara uğrayan elemanda hangi tür hasarın oluştuğunun tespit edilmesi halinde malzeme özelliklerinin o hasar tipine uygun olacak şekilde çok küçük değerlerde bir katsayı ile çarpılmasıdır. Bu kurala göre matriks hasarı meydana gelmiş bir elemanda fibere dik doğrultuda tespit edilmiş olan malzemenin mekanik özellikleri E_2 ve ν_{12} 10^{-5} gibi bir katsayı ile çarpılarak etkisiz hale getirilir. Bu sayede matriks hasarına uğramış olan eleman artık 2 doğrultusunda herhangi bir yükü taşıyamaz. Hashin hasar teorisine göre kompozit bir malzemede meydana gelebilecek hasar tipleri ve malzeme indirgeme kuralları şu şekilde sıralanabilir:

Fiber çekme hasarı: Fiber çekme hasarının oluşabilmesi için fiber doğrultusundaki çekme gerilmelerinin $\sigma_1 > 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.50] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad [4.50]$$

Fiber basma hasarı: Fiber basma hasarının oluşabilmesi için fiber doğrultusundaki basma gerilmelerinin $\sigma_1 < 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.51] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right) \geq 1 \quad [4.51]$$

Fiber takviyeli kompozit malzemeler en yüksek dayanıma fiber takviye doğrultusunda sahip oldukları için fiber hasarının görülmesi durumunda diğer tüm hasarların olması muhtemel hale gelmektedir. Bir başka yaklaşımla denilebilir ki fiber hasarı yıkıcı bir hasardır ve kırılmaya neden olur. Bu nedenle fiber çekme veya basma hasarına uğrayan tüm elemanlarda malzemenin her doğrultudaki mekanik özellikleri ($E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$), 10^{-5} katsayısı ile çarpılarak 0' a indirgenir.

Matriks çekme hasarı: Matriks çekme hasarının oluşabilmesi için fibere dik doğrultudaki y yönündeki çekme gerilmelerinin $\sigma_2 > 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.52] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad [4.52]$$

Matriks basma hasarı: Matriks basma hasarının oluşabilmesi için fibere dik doğrultudaki y yönündeki basma gerilmelerinin $\sigma_2 < 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.53] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad [4.53]$$

Bir elemanda sadece matriks çekme veya basma hasarının görülmesi durumunda fibere dik y yönündeki malzeme özellikleri (E_2, ν_{12}), 10^{-5} katsayısı ile çarpılarak 0' a indirgenir.

Çekme durumunda tabaka ayrılma (delaminasyon) hasarı: Üç boyutlu gerilme halinde fibere dik üçüncü bir doğrultu olan z yönünde de hasar meydana gelebilir. Ayrılma hasarı olarak adlandırılan bu durum için $\sigma_3 > 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.54] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad [4.54]$$

Basma durumunda ayrılma hasarı: Basma durumunda ayrılma hasarının oluşması için $\sigma_3 < 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.55] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad [4.55]$$

Bir elemanda sadece ayrılma çekme veya basma hasarının görülmesi durumunda fibere dik y yönündeki malzeme özellikleri ($E_3, \nu_{23}, \nu_{13}, G_{23}, G_{13}$) 10^{-5} katsayısı ile çarpılarak 0' a indirgenir.

Fiber – matriks arası kayma hasarı: Kayma gerilmeleri ile yapının zorlanması durumunda fiber ile matriks birbirinden ayrılarak hasarın gerçekleştiği durumdur. Kayma hasarının gerçekleşmesi için $\sigma_1 < 0$ olması gerekmektedir ve hasarın meydana gelmesi için [4.56] numaralı bağıntının da sağlanması gerekir.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad [4.56]$$

Bir elemanda kayma hasarı fiber hasarı gibi kırılmaya sebep olabilen bir hasar türüdür. Kompozit malzeme bileşenlerinin birbirinden ayrılması durumunda yapının bütünlüğü bozulacağı için kırılmanın gerçekleşmesi muhtemel olmaktadır. Bu hasarın görülmesi durumunda ise kayma gerilmeleri ile alakalı olan mekanik bileşenler (ν_{12} , G_{12}), 10^{-5} katsayısı ile çarpılarak 0' a indirgenir [3,10,19].

Hasar tiplerine göre yapılacak malzeme indirgemeleri Tablo 4.1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 4.1 Malzeme indirgemeleri tablosu.

Hasar Tipi $\Rightarrow$	Fiber Çekme Hasarı	Fiber Basma Hasarı	Matriks Çekme Hasarı	Matriks Basma Hasarı	Ayrılma Çekme Hasarı	Ayrılma Basma Hasarı	Fiber – Matriks Kayma Hasarı
Mekanik Özellikler							
E_1	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	-	-	-
E_2	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	-
E_3	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-
G_{12}	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	-	-	$\times 10^{-5}$
G_{13}	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-
G_{23}	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-
ν_{12}	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	$\times 10^{-5}$
ν_{13}	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-
ν_{23}	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-	-	$\times 10^{-5}$	$\times 10^{-5}$	-

5. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ

Deneylerde kullanılmak üzere üretilmiş olan tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri malzeme davranışlarının anlaşılması ve elde edilen verilerin sayısal çalışmada kullanılması amacı ile tespit edilmiştir. Mekanik özelliklerin tespit edildiği deneyler Dokuz Eylül Üniversitesi Mekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Mekanik özelliklerin tespitinde başlıca üç test metodu kullanılmıştır:

- a) Malzemenin fiber doğrultusundaki ve fibere dik doğrultudaki elastisite modüllerini, poisson oranlarını ve çekme mukavemetlerini tespit etmek için statik çekme deneyleri.
- b) Fiber doğrultusundaki ve fibere dik doğrultudaki basma mukavemetlerini tespit etmek için statik basma deneyleri.
- c) Kayma modülünün ve kayma mukavemetinin tespiti için düzlem kayma deneyi.

Sayısal çalışmanın başarılı bir şekilde sonuçlandırılabilmesi ve deneyler sonucunda elde edilen değerlerin tutarlılığı malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilmiş olmasına bağlıdır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini en fazla etkileyen unsurlardan biri de malzemenin üretim yöntemidir. Numuneler arasında herhangi bir kalınlık farkı, fiber – matriks hacimsel karışım oranı farkı ve matriks malzemesinde kullanılan kimyasal malzemelerin (sertleştirici, hızlandırıcı vb.) karışım oranlarında meydana gelebilecek farklılıklar sonucunda deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar tutarsız olacaktır. Bu nedenle mekanik özelliklerin tespit edildiği deneylerde birden fazla numune kullanılarak elde edilmiş olan sonuçların ortalama değerleri kullanılmıştır.

Kompozit plakaların üretiminde kullanılan ve özellikleri Tablo 5.1’de verilmiş olan epoksi reçine, sertleştirici, hızlandırıcı ve tek yönlü karbon fiberler İzoreel Firmasından FÜBAP tarafından desteklenen 1274 numaralı proje kapsamında temin edilmiştir. Kompozit malzemeler sıcak presleme tekniği kullanılarak Tablo 5.1’de özellikleri verilmiş olan tekyönlü karbon fiber takviye ve epoksi reçine matriks kullanılarak üretilmiştir. Tabakaları oluşturacak olan fiberler her bir katına reçine emdirilerek dört kat üst üste konularak pres tablasına yerleştirilmiştir. Presleme işleminde 150 Bar basınç yükü altında 160° C sıcaklık uygulanan plakalar 3 saat pres içerisinde bekletilmiştir. Presleme işlemi sonunda çıkarılan plakalar oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işleminin sonucunda levhaların kenarları kesilerek temizlenmiştir.

Tablo 5.1. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan tek yönlü karbon fiber ve epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri.

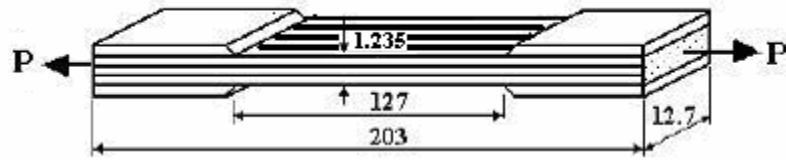
Hammadde	Marka	Özellik	Adı	Karışım Oranı
Matriks	Ciba Geigy	Bisphenol A	Epoksi CY225	100 Pbw
Sertleştirici	Ciba Geigy	Anhydride	HY 225	80 Pbw
Fiber	İthal	Tek yönlü	Karbon	330 gr/mm ²

5.1. Çekme Deneyleri

Mekanik özelliklerin tespit edildiği deneylerde belirli standartlarda hazırlanmış olan numunelerin çekme cihazı yardımı ile fiziksel deneyleri yapılmaktadır. Çekme testleri ASTM D3039-76 standardına göre yapılmıştır. Tez çalışmasında seçilmiş olan tekyönde takviye edilmiş karbon takviyeli malzemelerin deneylerinde fiber takviye doğrultusunda (1 yönünde) ve fibere dik doğrultuda (2 yönünde) hazırlanmış olan deney numuneleri kullanılmaktadır. Bu nedenle iki farklı çekme deneyi vardır.

5.1.2. Fiber takviye doğrultusunda çekme deneyi

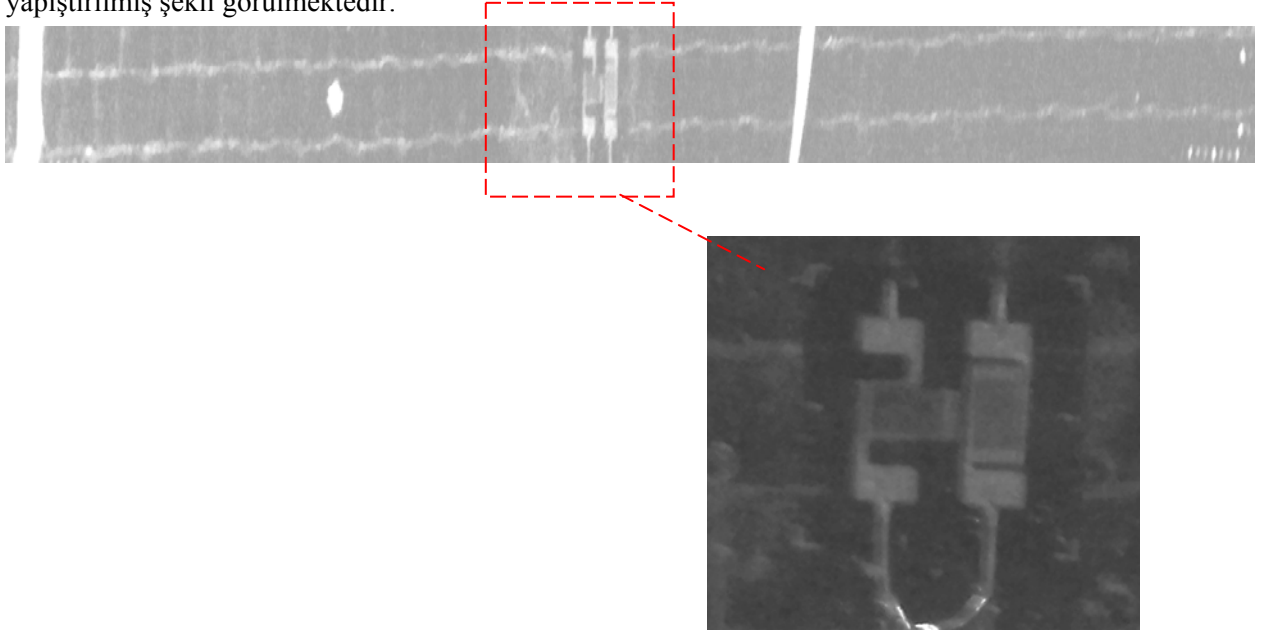
Fiber doğrultusundaki mekanik özellikleri tespit etmek için tek yönde takviye edilmiş $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levhalar kullanılmıştır. Şekil 5.1’de boyutları görülen numuneler üzerinde iki farklı deney yapılmıştır. Birinci deneyde fiber takviye doğrultusunda elastisite modülü E_1 , boyca uzama oranı ε_1 ve enine daralma oranı ε_2 tespit edilmiştir. İkinci deneyde ise fiber takviye doğrultusunda malzemenin çekme dayanım testi yapılmıştır.



Şekil 5.1. Fiber takviye doğrultusunda çekme deneylerinde kullanılan $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip numune.

Birinci deneyde sonuçları elde etmek için Strain – gauge rozet kullanılmıştır.

Strain – gauge rozetler numunelere belirli noktalarda dik ve yatay pozisyonda bağlanarak çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.2’de strain – gauge rozetlerin deney numunesine yapıştırılmış şekli görülmektedir.



Şekil 5.2. Strain – gauge rozetin numuneye yapıştırılmış hali.

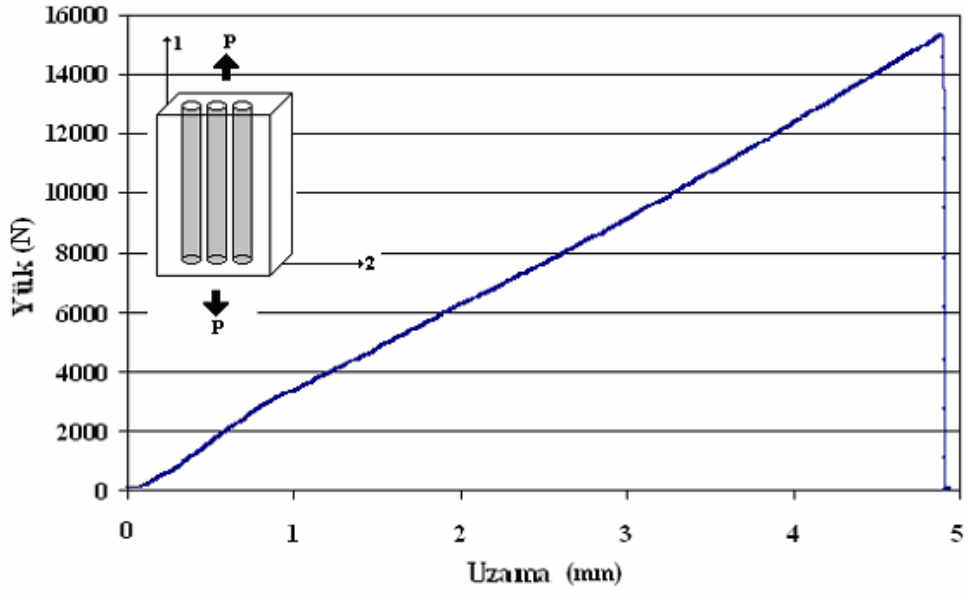
Deneylerin sonucunda elde edilen yük değerlerinden fiber takviye doğrultusundaki elastisite modülü E_1 , poisson oranı ν_{12} ve fiber takviye doğrultusundaki çekme mukavemeti X_φ [5.1] bağıntıları kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \text{ [MPa]} ; E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \text{ [MPa]} ; \nu_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} ; X_\varphi = \frac{P_{\max}}{A} \text{ [MPa]}$$

[5.1]

Burada A [mm^2], numunenin kesit alanıdır, P [N], numuneye uygulanan yük değeridir ve en büyük yükün değeri $P_{\max}$ ile gösterilmektedir.

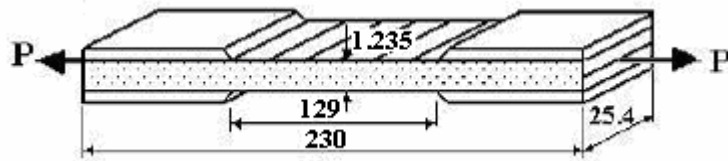
Şekil 5.1’de görülen numuneler çekme cihazına bağlanarak sabitlendikten sonra çekme hızı 0.5 mm/dk olacak şekilde yükler uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan çekme cihazında elde edilen yükler ve uzama değerleri verileri bilgisayara sürekli olarak kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda fiber takviye doğrultusunda tabakalı kompozit malzemenin yük – uzama grafiği Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemede fiber doğrultusunda yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.

5.1.3. Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda çekme deneyi

Fiber doğrultusuna dik doğrultuda (2 doğrultusu) mekanik özellikleri tespit etmek için tek yönde takviye edilmiş $[90^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levhalar kullanılmıştır. Şekil 5.4’de boyutları verilen numuneler üzerinde iki farklı deney yapılmıştır. Birinci deneyde fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda elastisite modülü E_2 ve ikinci deneyde ise fiber takviye doğrultusunda dik yöndeki malzemenin çekme mukavemeti testi yapılmıştır.



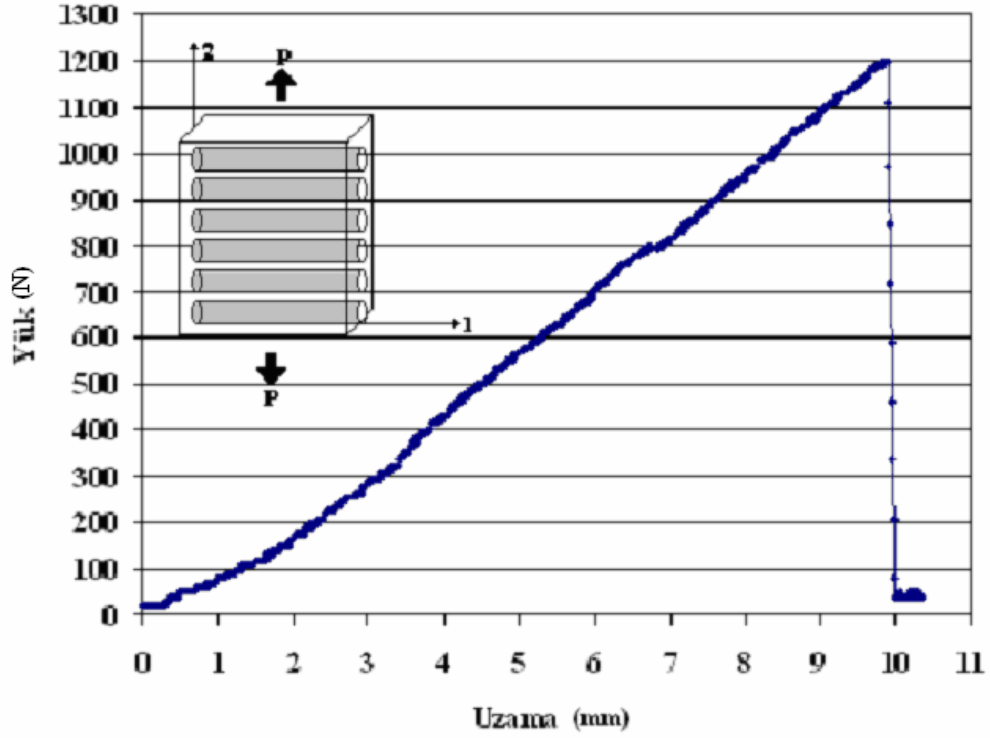
Şekil 5.4 : Fiber takviye doğrultusunda çekme deneylerinde kullanılan $[90^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip numune.

Deneylerin sonucunda elde edilen yük değerlerinden fiber takviye doğrultusundaki elastisite modülü E_2 ve fiber takviye doğrultusuna dik yöndeki çekme mukavemeti Y_c , [5.2] bağıntıları kullanılarak tespit edilmiştir.

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} \quad [\text{MPa}] ; \quad E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} \quad [\text{MPa}] ; \quad Y_\varphi = \frac{P_{\max}}{A} \quad [\text{MPa}]$$

[5.2]

Deneyler sonucunda elde edilen yük uzama grafiği Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

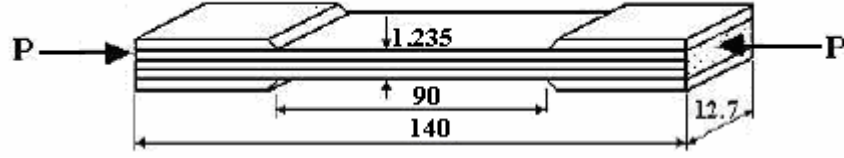


Şekil 5.5: $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemede fibere dik doğrultuda yapılan çekme deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.

5.2 Basma Deneyi

Kompozit malzemelerin gevrek yapıya sahip olmaları nedeni ile izotrop malzemelerden farklı olarak basma mukavemetinin tespit edilmesi emniyetli bir çalışma için oldukça önemlidir. Basma deneyleri yapılırken dikkat edilen en önemli husus deney numunelerinin boylarının mümkün olduğu kadar kısa tutulması gerekliliğidir. Bunun nedeni deney numunelerinin burkulma davranışı göstermeksizin deneyin tamamlanarak numunelerin hasara uğramış olmasını sağlamaktır. Bu amaçla $[0^\circ]_4$ ve $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemelerden hazırlanmış olan numuneler deneylerde 1 ve 2 yönlerindeki basma mukavemetinin tespiti için kullanılmıştır. Basma testlerinde numuneler ve deney standardı ASTM 3410-75 numaralı standarda göre

yapılmıştır. Deneylerde $[0^\circ]_4$ ve $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemelerden hazırlanmış olan numunelerin her ikisi de aynı boyutlardadır ve Şekil 5.6 'da boyutları görülmektedir.

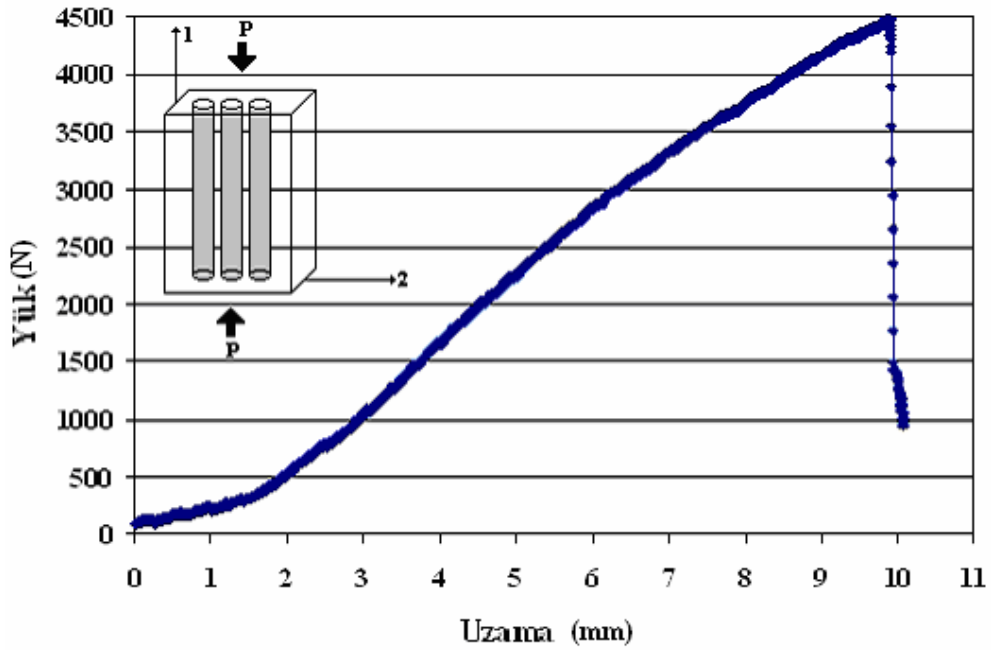


Şekil 5.6. $[0^\circ]_4$ ve $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemelerin basma testlerinde kullanılan numuneler.

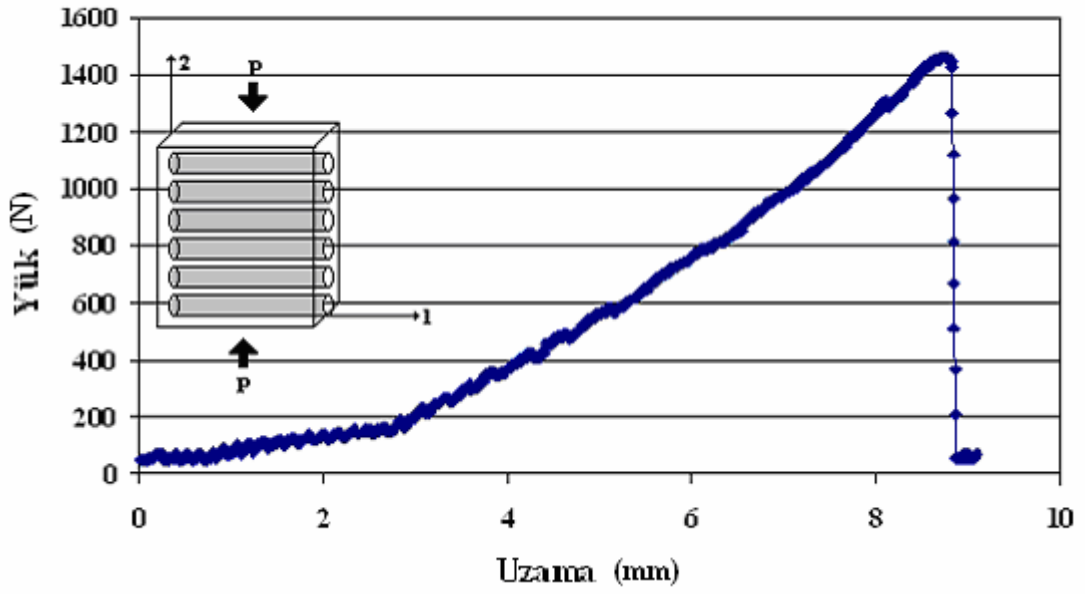
Yapılan basma deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlardan tek yönde takviye edilmiş $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit için X_b basma mukavemeti ve $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit için Y_b basma mukavemeti değerlerinin hesaplanması için [5.3] bağıntıları kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen yük – uzama grafikleri ise Şekil 5.7 ve 5.8’de gösterilmiştir.

$$X_b = \frac{P_{\max}}{A} \text{ [MPa]} ; Y_b = \frac{P_{\max}}{A} \text{ [MPa]}$$

[5.3]



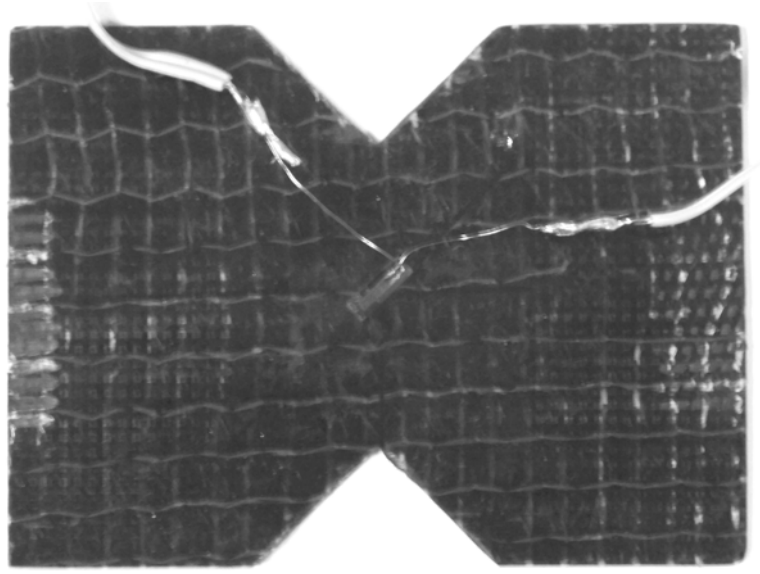
Şekil 5.7 : $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemede fiber doğrultusunda yapılan basma deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.



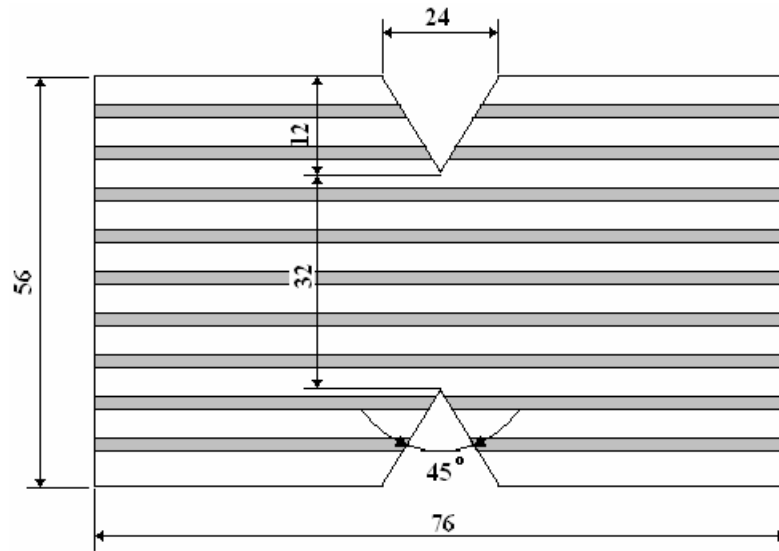
Şekil 5.8 : $[90^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemede fibere dik doğrultuda yapılan basma deneyi sonucunda elde edilen yük – uzama grafiği.

5.3. Kayma Deneyi

Kayma modülünün ve kayma hasar mukavemetinin bulunması için düzlem kayma testleri yapılmaktadır. Bu deneyler için gerekli olan numuneler $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit malzemeden üretilerek üzerine “v” çentik açılmış olan plakalardır. Kayma modülü G_{12} ve kayma hasar mukavemeti S değerlerini bulabilmek için iki farklı deney yapılmaktadır. Kayma modülünü bulabilmek için Şekil 5.9’da görüldüğü gibi numune üzerine 45° ’lik doğrultuda strain gauge yapıştırılarak deney değerlerinden kayma modülü tespit edilmektedir. İkinci deneyde ise Şekil 5.10’da görülmekte olan aynı boyutlardaki numuneye kayma yükü uygulanarak elde edilen değerlerden S kayma hasar gerilmesi değeri elde edilmiştir.



Şekil 5.9: Kayma modülünü bulmak için hazırlanan numune ve strain – gaugelerin yapıştırılmış hali.



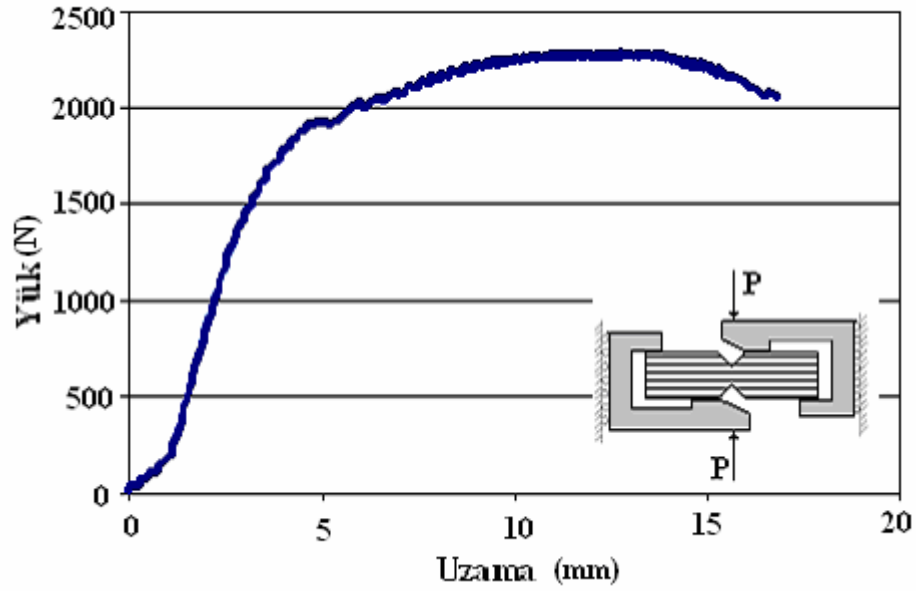
Şekil 5.10: $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhadan üretilmiş olan kayma deneyi numunesi.

Kayma testi sonucunda elde edilmiş olan deney değerlerinden Şekil 5.11’de görülen yük – uzama grafiği çizilmektedir. Yük uzama değerlerinden yararlanılarak kayma hasar mukavemeti,

$$S = \frac{P_{\max}}{L t} \quad [\text{MPa}]$$

[5.4]

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte L [mm] parametresi açılmış olan çentiklerin en uç noktaları arasındaki mesafedir. Şekil 5.10’da 32 [mm] olarak verilmiştir. t [mm] parametresi ise numune kalınlığıdır ve dört tabakadan oluşan kompozit levhanın kalınlığı 1.235 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.11: Kayma deneyi sonucunda $[0^{\circ}]_4$ tabakalı kompozit levhanın yük – uzama grafiği.

Mekanik özelliklerin tespit edilebilmesi için yapılmış olan deneylerde tez çalışmasında kullanılacak olan tekyönde takviye edilmiş karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli 4 tabakalı kompozit malzeme için elde edilen sonuçlar Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: Deneylerde kullanılan tek yönde takviye edilmiş karbon fiberli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzeme için mekanik özellikler tablosu.

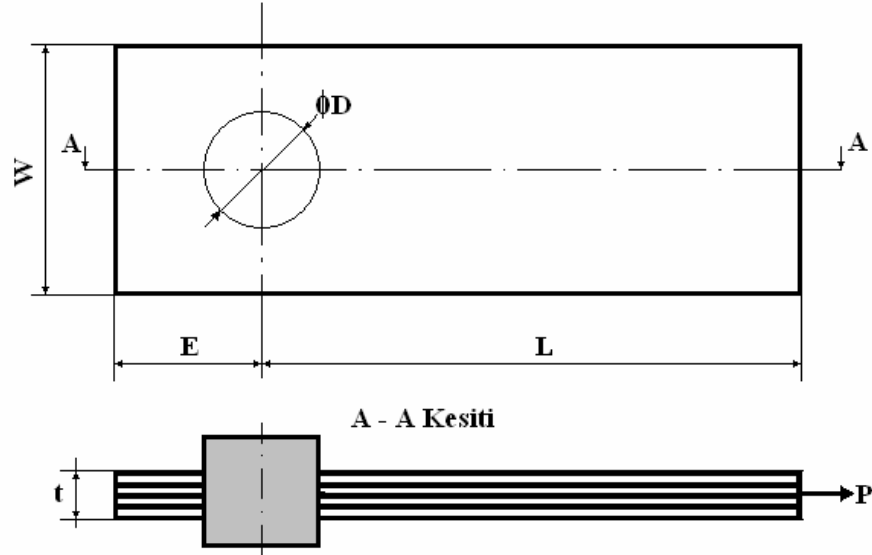
Parametre adı	Simgesel ifade	Büyüklüğü
Fiber takviye doğrultusunda Elastisite Modülü	E_1 (MPa)	172891
Fiber takviye doğrultusuna dik doğrultuda Elastisite modülü	E_2 (MPa)	10796.66
Kayma modülü	G_{12} (MPa)	3638
Poisson oranı	ν_{12}	0.32
1 Yönünde (Fiber takviye doğrultusuna paralel yönde) çekme mukavemeti	X_c (MPa)	1440.105
2 Yönünde (Fiber takviye doğrultusuna dik yönde) çekme mukavemeti	Y_c (MPa)	36.586
1 Yönünde basma mukavemeti	X_b (MPa)	- 419.946
2 Yönünde basma mukavemeti	Y_b (MPa)	- 115.405
Kayma mukavemeti	S (MPa)	56.34
Fiber hacim oranı	V_f (%)	70

6. ÇÖZÜLEBİLİR BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDE MEKANİK DAVRANIŞLARIN DENEYSEL OLARAK TESPİTİ

Bu bölümde mekanik özellikleri ve üretim teknikleri önceki bölümde tanımlanmış olan tekyönlü karbon fiberler ile takviye edilmiş tabakalı kompozit malzemelerin çözülebilir bağlantılarla birleştirilmesi durumunda mekanik davranışlarının araştırılması için yapılmış olan deneysel çalışmalar incelenecektir. Deneysel çalışmada çözülebilir bağlantı türü olarak literatürde geniş bir şekilde yer verilmiş olan çift tesirli pim bağlantısı ile bağlanmış kompozit plakaların deneyleri yapılmıştır. Pim bağlantıları çözülebilir bağlantılar içerisinde diğer bağlantı türleri ile ortak özelliklere sahip olmasından dolayı tercih edilmiştir.

6.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışma yapmak üzere üretilmiş olan tabakalı kompozit malzemeler literatürde incelenmiş olan çalışmalar göz önüne alınarak belirli ölçüler dahilinde işlenerek deneyleri yapılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiği zaman geometrik parametreler: plaka genişliğinin pim deliği çapına oranı $W/D = 2, 3, 4, 5$ olarak, pim deliğinin merkezinin plakanın kenarına oranı $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ olarak alınmıştır. Plakanın kalınlığı t ve delik merkezi ile plakanın uzun kenarı arasındaki mesafe L olarak çalışmalarda kullanılmıştır. [2, 4, 9, 10, 19]. Deneysel çalışmada kullanılan yöntem pim bağlantısının yapıldığı kenarın aksi yönde çekme kuvveti uygulanması şeklinde yapılmıştır.



Şekil 6.1. Çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit malzemenin geometrik parametreler ve yükleme doğrultusu.

Şekil 6.1’de görülen ölçüler ve yükleme şekli deneysel çalışmada kullanılan yöntemi temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi yükler pime dik doğrultuda plakanın eksenine paralel düzgün yayılı çekme yükü şeklinde simetrik olarak uygulanmaktadır. Deney numuneleri hazırlanırken pim deliği çapı $D = 6$ mm alınmıştır. W/D oranının değişimine göre tüm fiber takviye açıları için kompozit levhalar $W = 12, 18, 24, 30$ mm genişliğinde kesilmiştir. Genişliği kesilen numuneler 96 mm uzunluğunda parçalara bölünmüştür. E/D oranının değişimine göre $E = 6, 12, 18, 24, 30$ mm olacak şekilde plakalar markalanmıştır. Markalanmış olan plakalar hız çeliği matkap kullanılarak delinmiştir. Epoksi reçinenin gevrek yapıda olmasından dolayı delme işlemi sırasında delik kenarında oluşması mümkün olabilecek çatlakların önüne geçmek amacı ile delme işlemi Şekil 6.2’de görülen 90° uç açısına sahip hız çeliği matkap ucu kullanılarak yapılmıştır. Delinme işlemi esnasında matkap ucunun bilenmesi ve delinecek plakaların düz bir zeminde plakanın altında dolu bir destek konularak delme işleminin uygulanması ile açılacak deliklerin kalınlık boyunca düz ve tam daire şeklinde olması sağlanmıştır.



Şekil 6.2. Matkap ucu ve plaka üzerine açılmış delik.

Deneyde kullanılmak üzere hazırlanmış olan numuneler ve özellikleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Deneylerde kullanılan numuneler ve özellikleri.

Fiber Takviye Açısı ve Tabaka Dizilimi	Numune Kalınlığı (mm)	Pim deliği Çapı (mm)	E/D oranı	W/D oranı
$[0^{\circ}]_4$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/15^{\circ}]_s$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/15^{\circ}]_2$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/30^{\circ}]_s$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/30^{\circ}]_2$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/45^{\circ}]_s$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/45^{\circ}]_2$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/60^{\circ}]_s$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/60^{\circ}]_2$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/75^{\circ}]_s$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/75^{\circ}]_2$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/90^{\circ}]_s$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5
$[0^{\circ}/90^{\circ}]_2$	1.235	6	1,2,3,4,5	2,3,4,5

6.2. Deneyde Kullanılan Materyal ve Metot

Pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerin deneylerinin yapılması için 10 kN kapasiteye sahip U Test marka universal çekme cihazı kullanılmıştır. Şekil 6.3 ’de görülen çekme cihazında elde edilen veriler bilgisayar yardımı ile grafiğe dönüştürülmekte ve grafikten elde edilen veriler kaydedilmektedir.



Şekil 6.3. Çekme test cihazı.

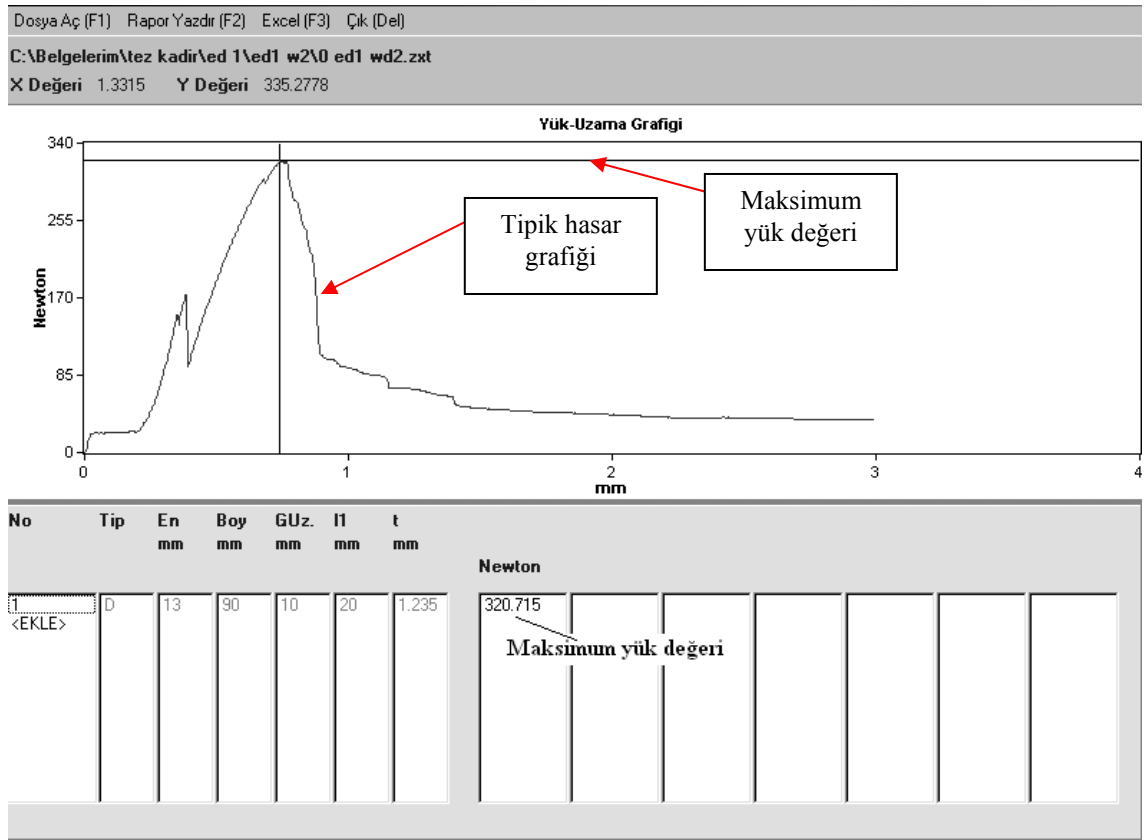
Numunelerin çekme cihazına bağlanması için üzerinde pim deliği bulunan bir kalıp (Şekil 6.4) hazırlanarak çekme cihazının çenelerine bağlanmıştır. Kalıp üzerinde bulunan boşluğa yerleştirilmiş olan deney plakası pim deliğinden kalıba bağlanırken serbest ucu ise çekme çenesine ankastre olarak bağlanmıştır.



Şekil 6.4. Deney numunelerini çekme cihazına bağlayan ara parçanın resmi.

Numunenin cihaza bağlanmasından sonra deney başlatılarak yük – yer değiştirme grafiği monitörden takip edilmiştir. Deneyler de sağlıklı sonuçlar alabilmek için cihazın çekme hızı 0.5 mm/dk olarak ayarlanmıştır [1,2,4,10].

Bu bölümde sunulmuş olan grafiklere ait değerler deneyler sonucunda çekme test cihazının kaydetmiş olduğu bilgilerden elde edilmiştir. Numunelerin cihaza bağlanmasının ardından gerçekleşen deneyin sonuçları cihaz üzerinde yerleştirilmiş olan yük hücreleri tarafından algılanan yük – yer değiştirme değerleri bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayara aktarılan değerler Şekil 6.5’de görülen bir ara yüz yardımı ile takip edilebilmektedir.



Şekil 6.5. Deneysel çalışma esnasında çekme cihazını kontrol eden bilgisayarda ekrana yansıyan ara yüz.

Şekilde görülmekte olan maksimum yük değeri çekme yükü ile yüklenmiş olan pim bağlantılı numunenin maksimum yük değerini göstermektedir. Sütun grafiklerde kullanılan hasar yükü değerleri bu verilerden oluşmaktadır. Bilgisayar arayüzünden takip edilen yük – yer değiştirme grafiği aynı zamanda veri dosyası şeklinde kaydedilerek çizgisel grafiklerin daha sonradan cihazdan bağımsız olarak çizilebilmesine olanak sağlamaktadır.

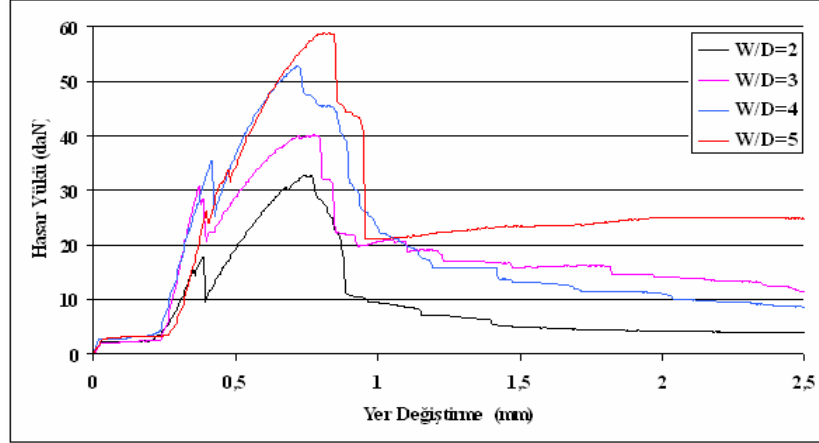
Deneylerde yük uzama eğrilerinden genel olarak gözlemlenmiş olan sonuç yüklerin belirli bir değere ulaşmasının ardından ani bir düşme eğilimine girmesi ve hasarın tipine göre yük değeri düşüşün ardından sabit kalsa bile sıfır olmaksızın uzama olması ve daha sonra yüklerin sıfıra doğru eğimli olarak azalması şeklindedir. Deneylerde uzama sınırı olarak $E/D = 1$ durumu için 2,5 mm diğer tüm E/D oranları içinse 6 mm uzama sınırı olarak alınmıştır. Son hasar durumuna bakılarak hasar tipi tespit edildiği için uzamalar sınırlandırılmak zorundadır. Uzamaların sınırlandırılmaması durumunda belirli hasar tipleri için yük değerlerinde artış olmadığı deneyler sırasında gözlemlenmiştir. Maksimum uzama değerine ulaşan numuneler çıkarılarak hasar tipi tespit edilmiştir. Yapılmış olan bütün deneylerin sonucunda sadece kesme ve ezilme hasar tipleri görülebilmektedir. Genel olarak deneylerin değerlendirmesi hasar yüklerinin fiber takviye açısı, tabaka dizilimi ile ilgili olarak değiştiği ve hasar tipinin ise geometrik parametrelerin (özellikle E/D oranı) değişiminden etkilendiği görülmüştür.

6.3. Deney sonuçları

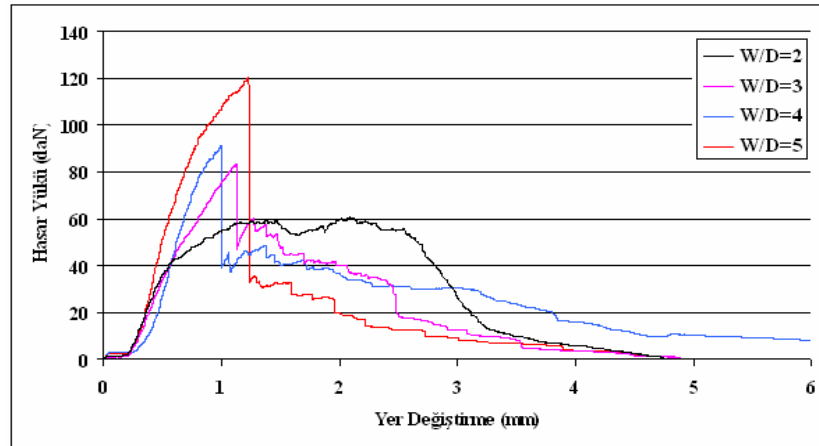
Bu bölümde Tablo 6.1 'de görülen numunelere ait deneyler yapılarak elde edilen maksimum hasar yüklerinin geometrik parametrelere göre değişiminden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonuçların sunumunda çizilen grafikler iki farklı grafik türü şeklinde verilmiştir. İlk grafiklerde çekme cihazından elde edilmiş yük – yer değiştirme grafiği her bir E/D oranı için W/D oranının değişimine göre elde edilmiştir. İkinci grafik türü ise deneyler sonucu her bir numune için elde edilmiş en büyük hasar yüklerinin değişimine göre çizilmiştir.

6.3.1. $[0^\circ]_4$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

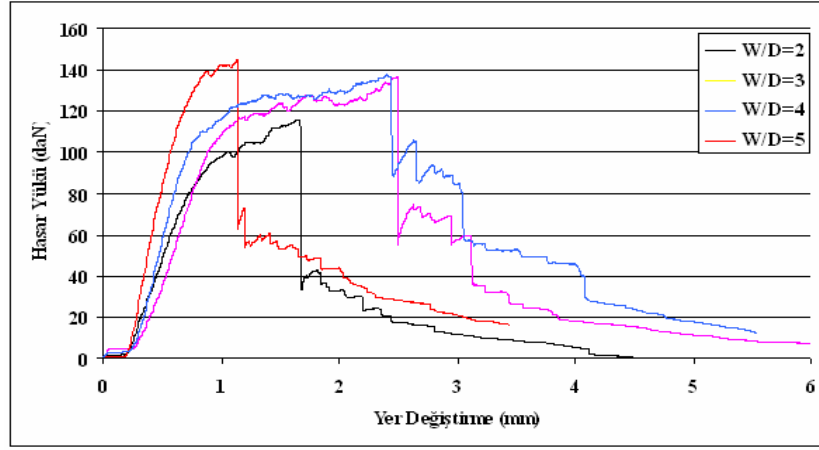
$[0^\circ]_4$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.6 – 6.10’ da geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



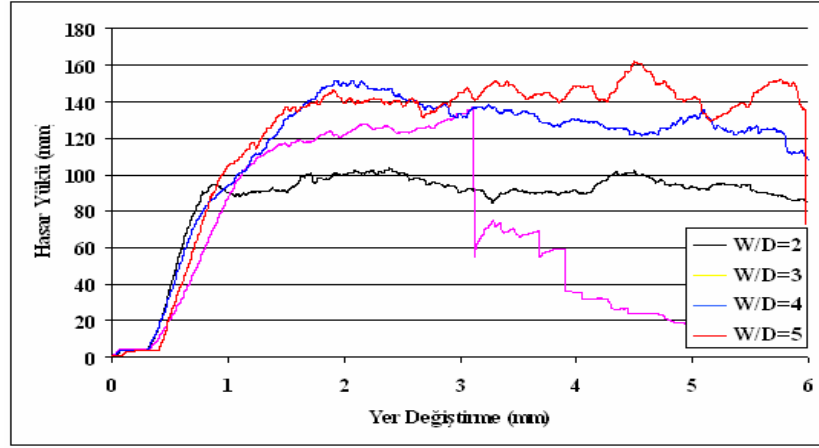
Şekil 6.6. $[0^\circ]_4$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



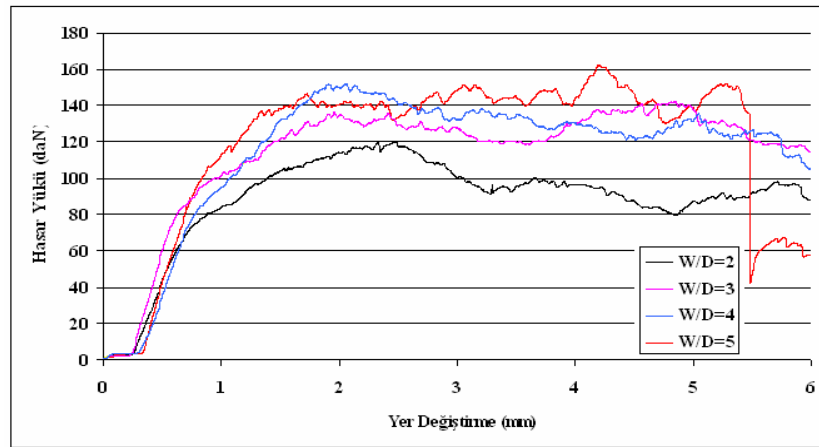
Şekil 6.7. $[0^\circ]_4$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



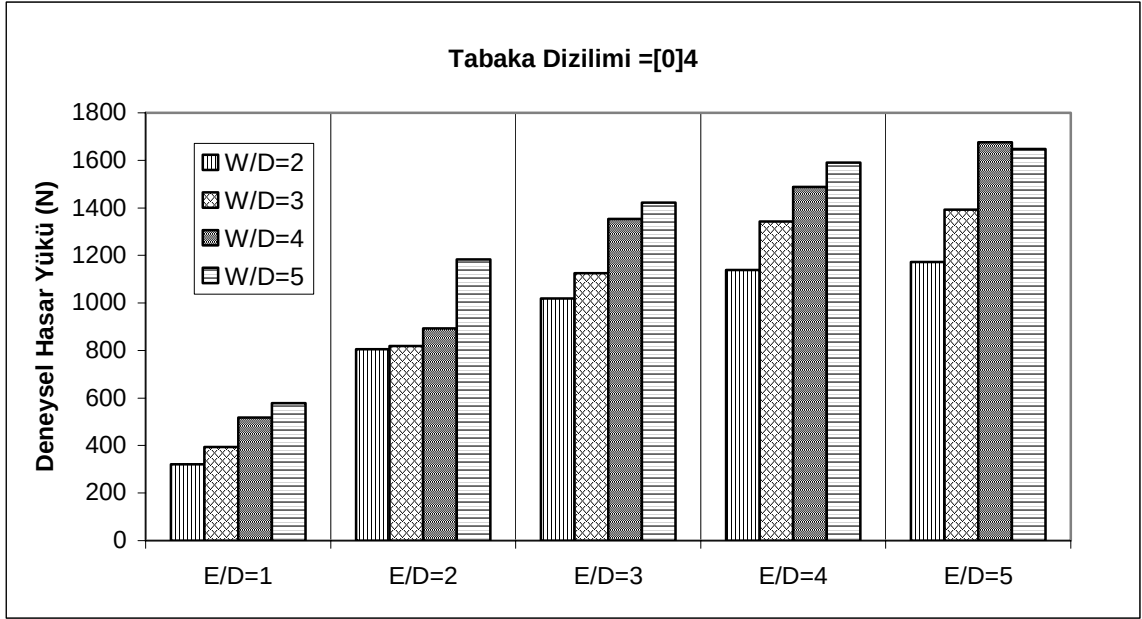
Şekil 6.8. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.9. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.10. $[0^0]_4$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

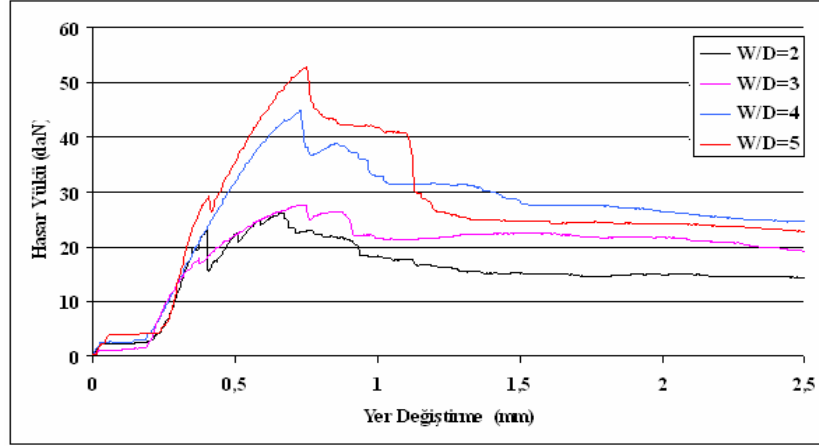


Şekil 6.11. $[0]_4$ levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

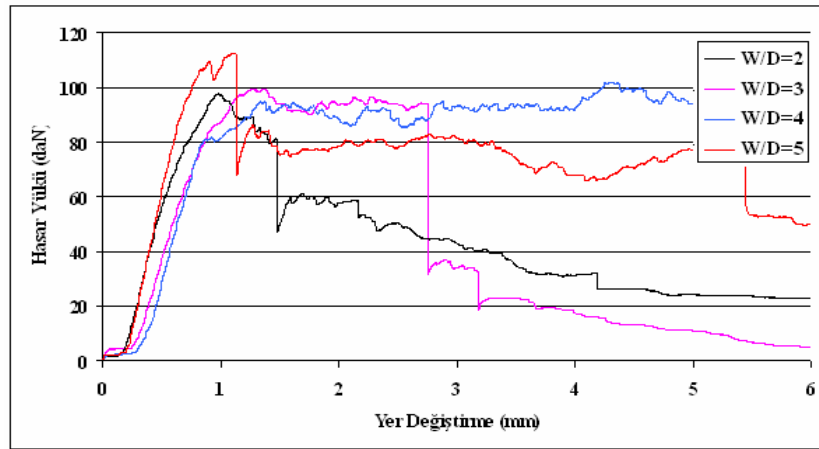
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0]_4$ levhada yapılmış olan deneylerde en düşük hasar yükü $E/D=1$ ve $W/D=2$ değeri için 320.715 N olarak, en yüksek hasar yükü ise $E/D=5$ ve $W/D=4$ değeri için 1676.712 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 6.6 – 6.8 grafiklerinde yükün maksimum değere ulaşmasının ardından uzamanın sabit bir değeri için yük değerinin keskin bir şekilde düştüğü ve daha sonra giderek azalarak sıfır değerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçların elde edildiği deneylerde gözlemlenen hasar tipi kesme hasarıdır. Pim bağlanmış olduğu deliği keserek levhanın kısa kenarına doğru belirli bir genişlik değerine sahip parçayı sürüklemektedir. Şekil 6.9 ve 6.10’da yer alan grafiklerde görüldüğü gibi yüklemeler bir maksimum noktaya kadar artmakta daha sonra ise uzama değerinin artmasına karşılık sabit bir yük değerinde uzama sınırı aşılmaktadır. Bu grafikler $E/D=4$ ve 5 değerleri için herhangi bir W/D değeri için elde edilmiştir. Deneyden sonra levhalar incelendiğinde hasar tipi olarak ezilme hasarının meydana geldiği yani pimin levhada bağlanmış olduğu delik yüzeyindeki matriksin kırılarak fiberlerin ezildiği görülmüştür. Şekil 6.11’deki grafiklerde hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimi görülmektedir. E/D oranının artışına paralel olarak hasar yüklerinde artma görülmektedir. $E/D=1, 2, 3$ için W/D oranının artması ile hasar yükleri artarken $E/D=4, 5$ için hasar yüklerinin çok fazla değişmediği görülmüştür.

6.3.2. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

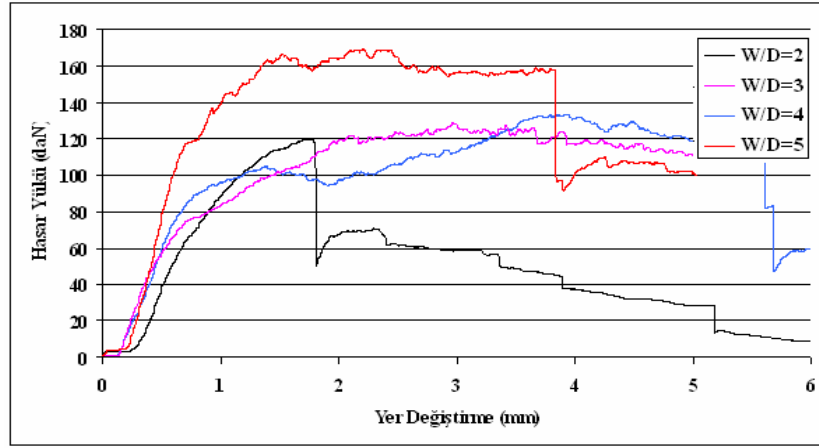
$[0^\circ/15^\circ]_s$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.12 – 6.17’ da geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



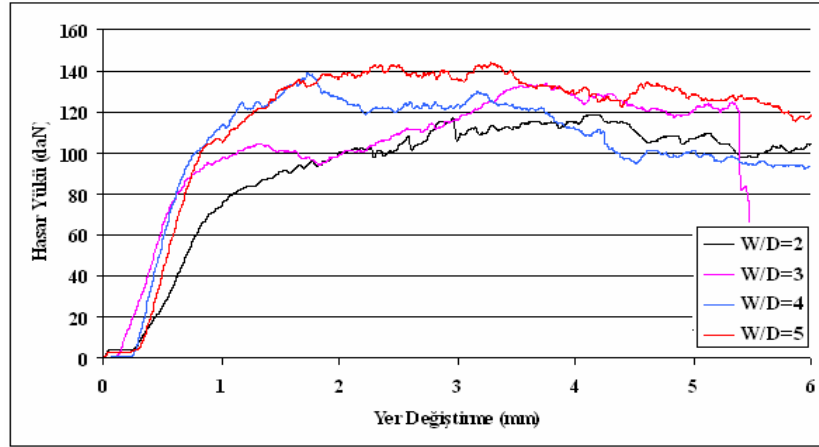
Şekil 6.12. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



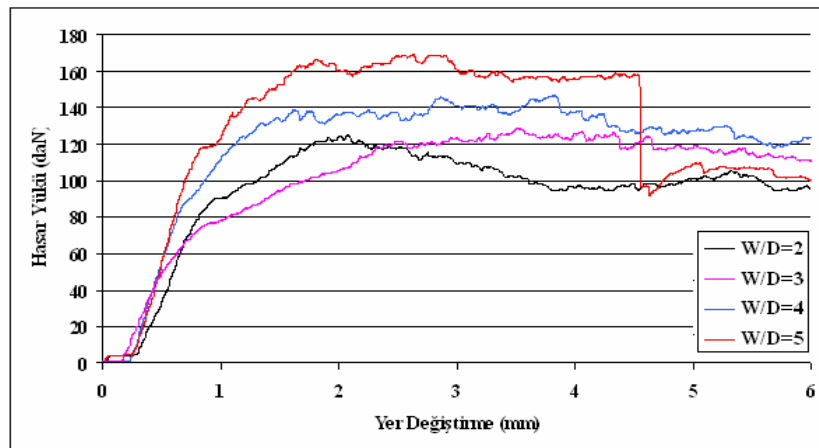
Şekil 6.13. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



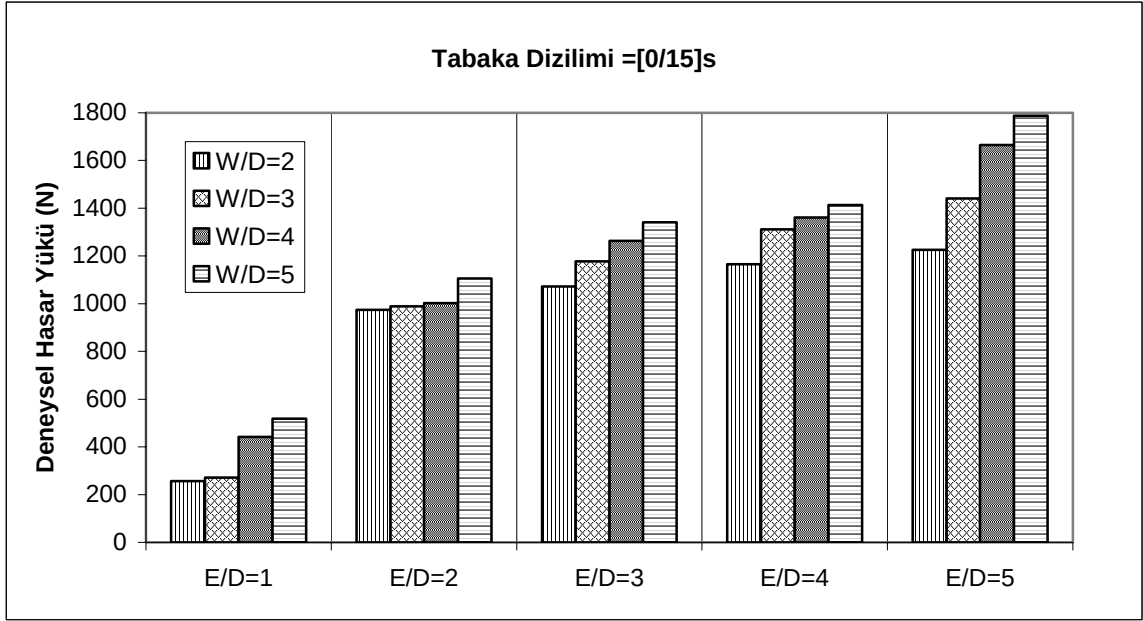
Şekil 6.14. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.15. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.16. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

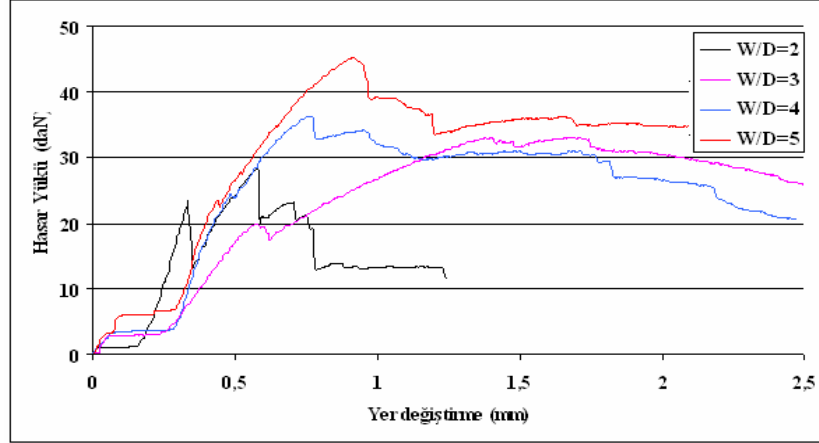


Şekil 6.17. $[0^\circ/15^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

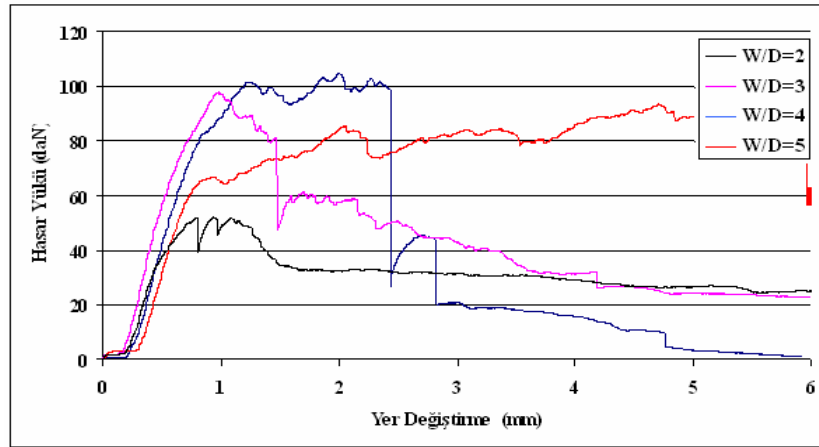
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/15^\circ]_s$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 256.326 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1787.738 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.12 ve 6.13'deki grafiklerde yüklerin en büyük değeri aldıktan sonra düştüğü görülmüştür. Deneylerin sonucunda bu numunelerde kesme hasarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 6.14 – 6.16'de yer alan grafiklerde ise hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerde kaldığı görülmektedir. Bu grafiklerin elde edildiği deneylerde incelenen numunelerde ezilme hasarının gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 6.17'de hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimi görülmektedir. E/D oranının artmasına paralel olarak hasar yüklerinde artış olduğu görülmektedir. W/D oranının artmasına bağlı olarak hasar yüklerinde artma olmasının yanında $E/D=1$ ve 2 değerlerinde $W/D=2$ ve 3 değerleri için hasar yüklerinin çok fazla değişmediği yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

6.3.3. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

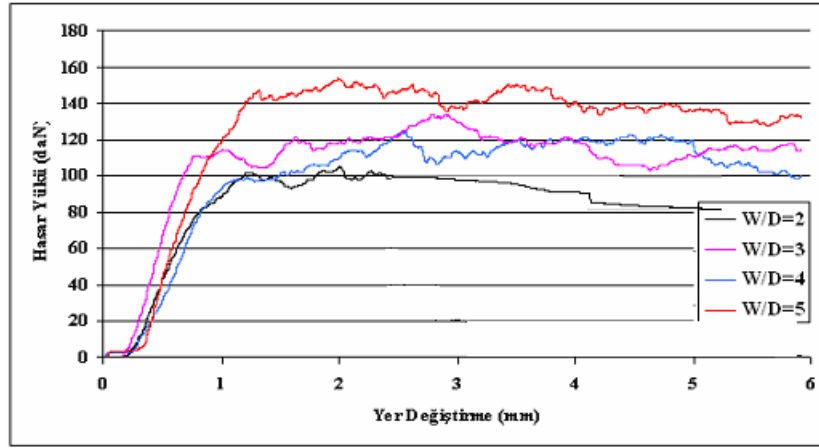
$[0^\circ/15^\circ]_2$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.18 – 6.22’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



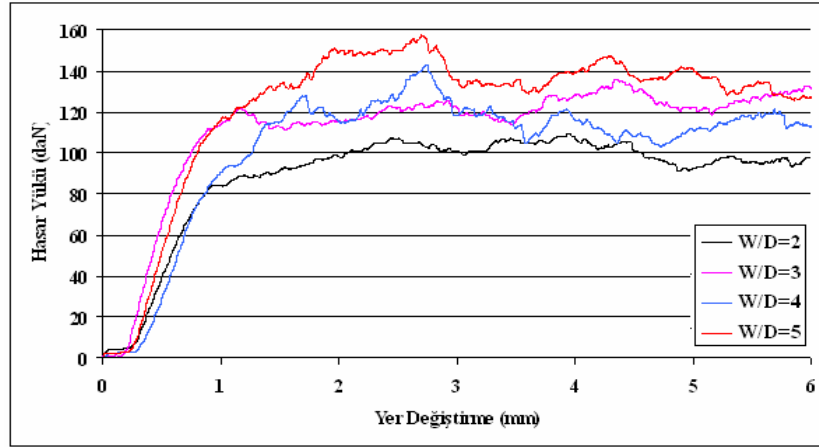
Şekil 6.18. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



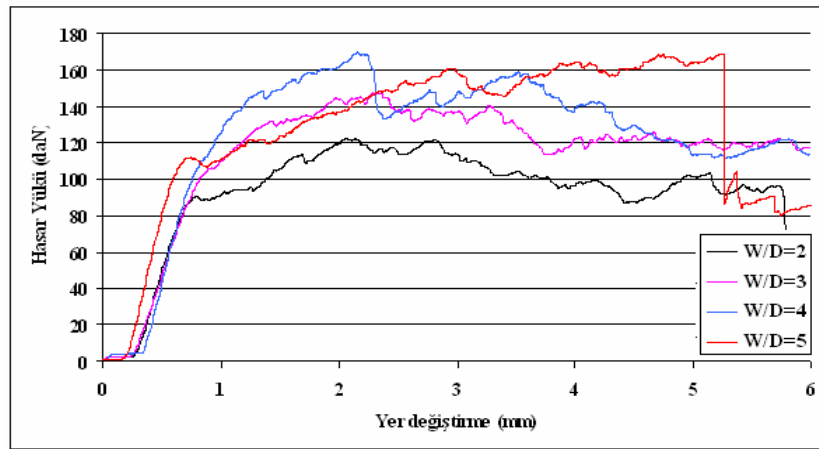
Şekil 6.19. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



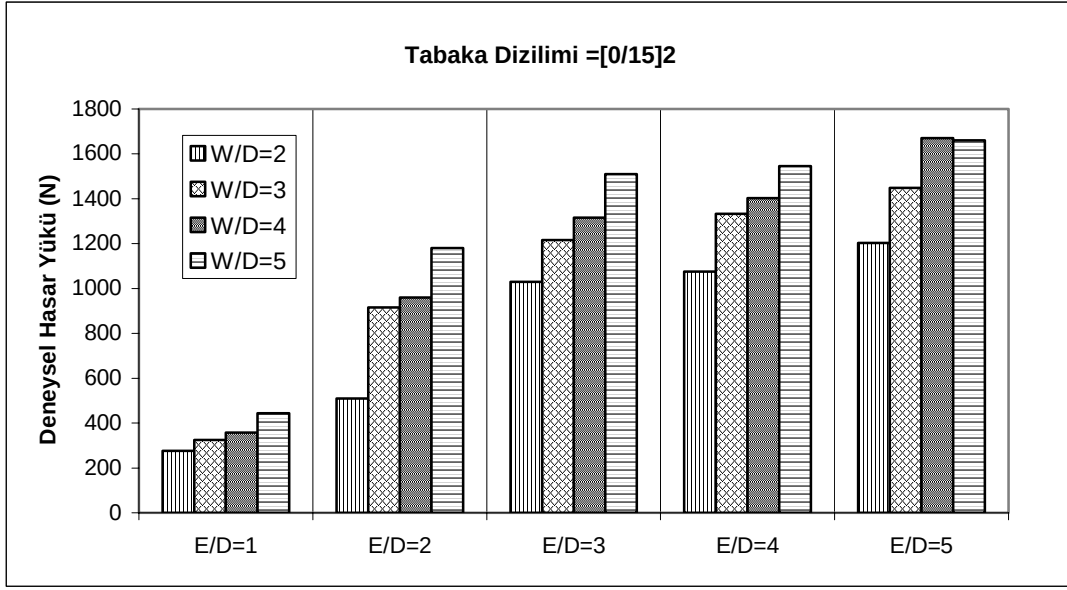
Şekil 6.20. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.21. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.22. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

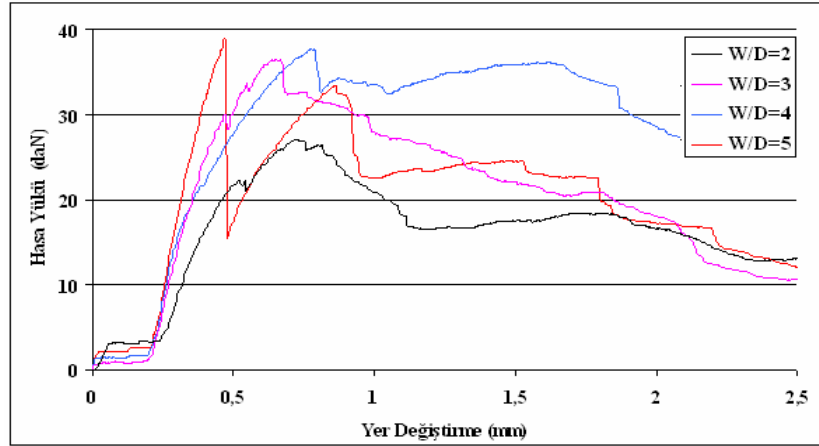


Şekil 6.23. $[0^\circ/15^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

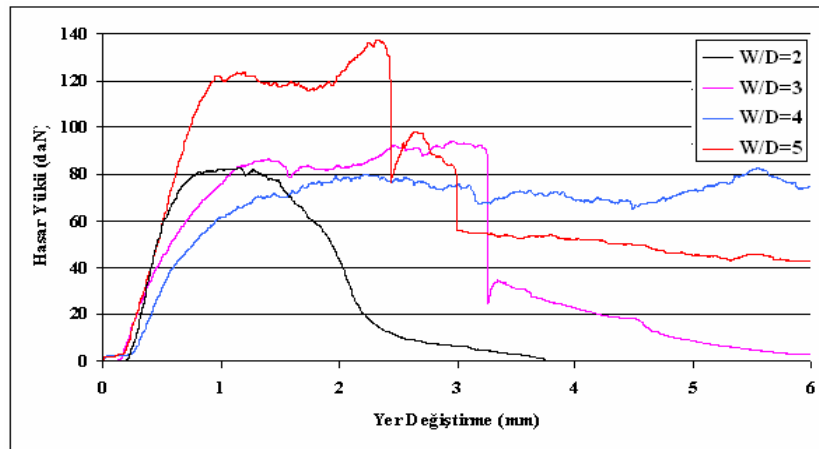
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/15^\circ]_2$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 276.306 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1669.957 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 4$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.18 ve 6.19'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.20 – 6.22'deki grafikler incelendiğinde hasar yükün en yüksek değeri almasının ardından bir miktar azaldığı ve yaklaşık sabit olan yük değerine karşılık uzamaların devam ettiği görülmektedir. Bu grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.23'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artarken $E/D = 5$ oranı için $W/D=4$ ve 5 değerleri için hasar yüklerinin çok fazla değişmediği görülmektedir.

6.3.4. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

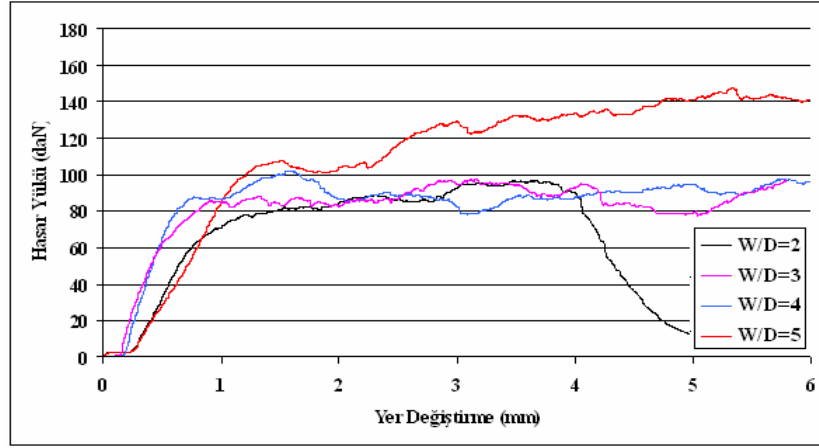
$[0^\circ/30^\circ]_s$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.24 – 6.29’ da geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



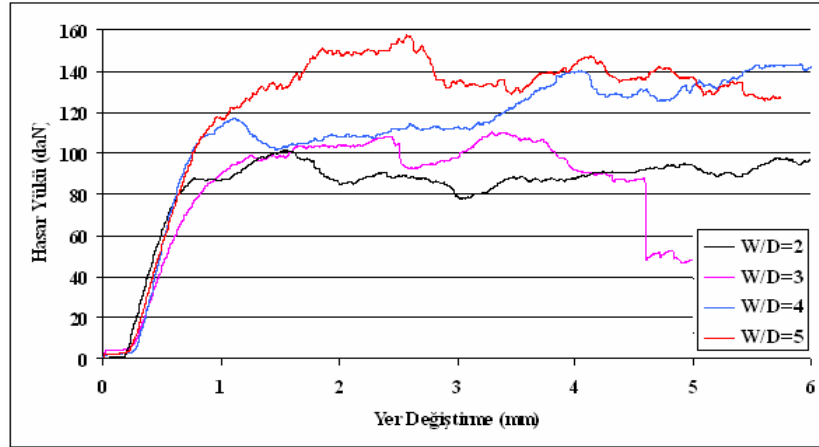
Şekil 6.24. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



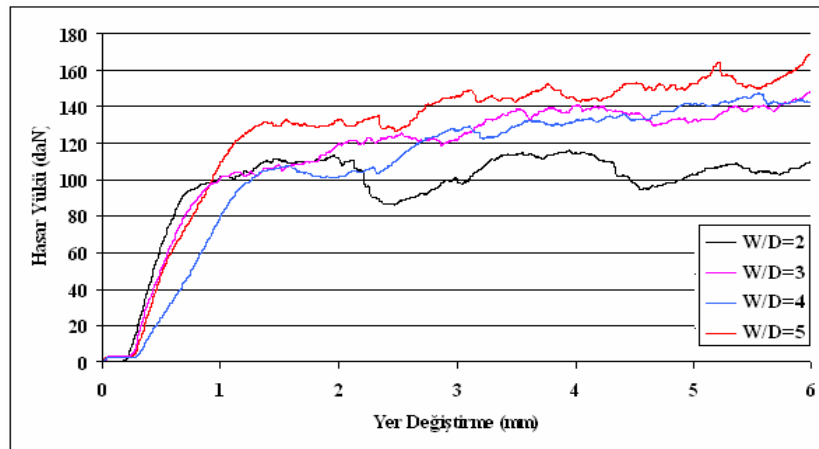
Şekil 6.25. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



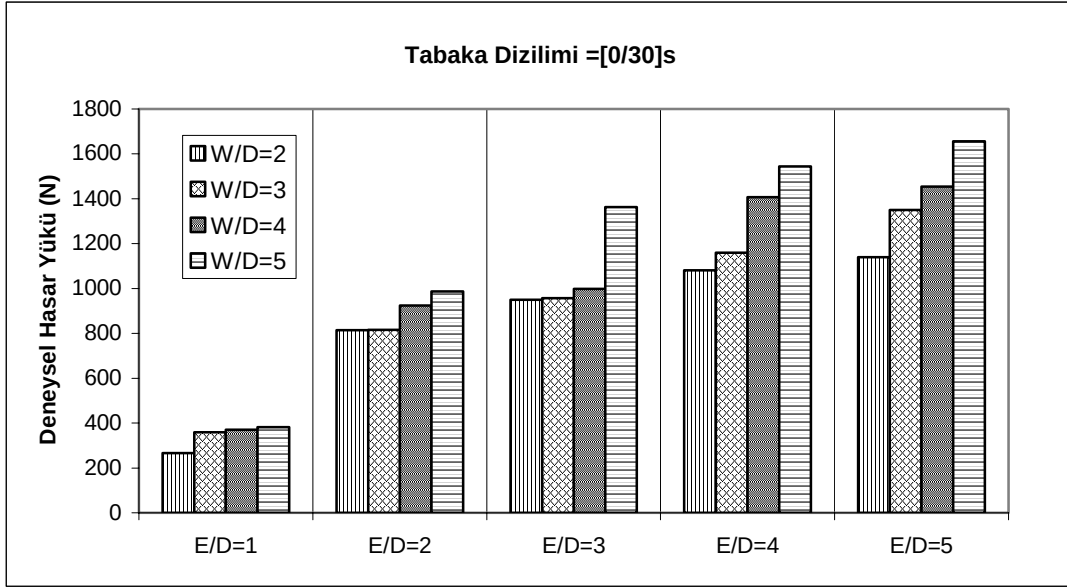
Şekil 6.26. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.27. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.28. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

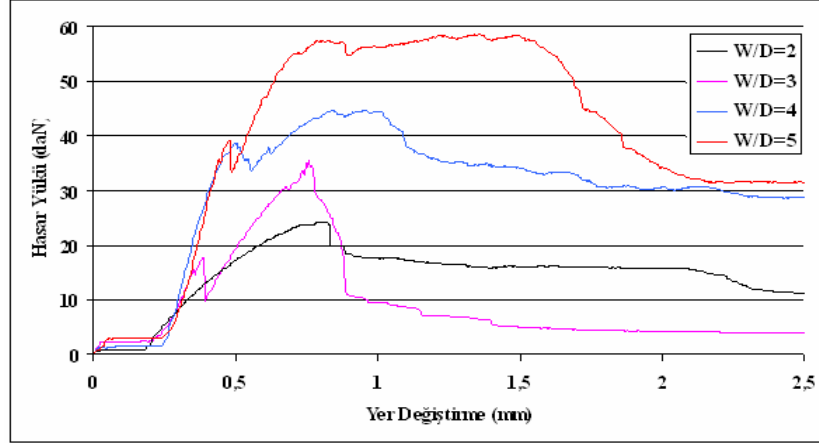


Şekil 6.29. $[0^\circ/30^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

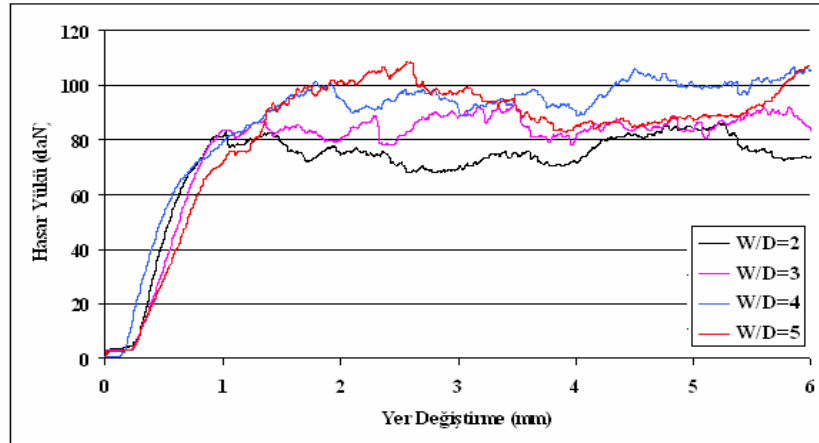
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/30^\circ]_s$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 265.726 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1655.477 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.24 ve 6.25'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.26 – 6.28'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.29'daki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. $[0^\circ/30^\circ]_s$ levhaya ait deney sonuçları için genel bir değerlendirme yapıldığında; E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artarken, $E/D = 1$ oranında $W/D = 3, 4$ ve 5 değerleri için, $E/D = 2$ oranında $W/D = 2$ ve 3 için ve $E/D = 3$ oranında $W/D = 2, 3$ ve 4 için elde edilen hasar yüklerinin birbirlerine oldukça yakın değerler oldukları görülmektedir.

6.3.5. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

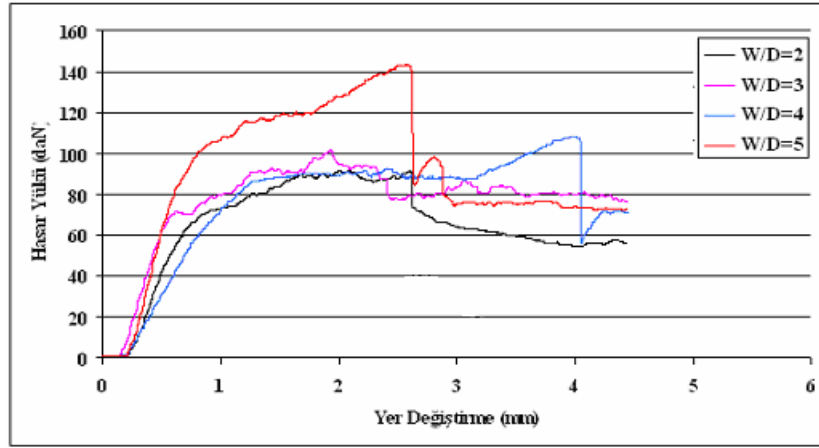
$[0^\circ/30^\circ]_2$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.30 – 6.35’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



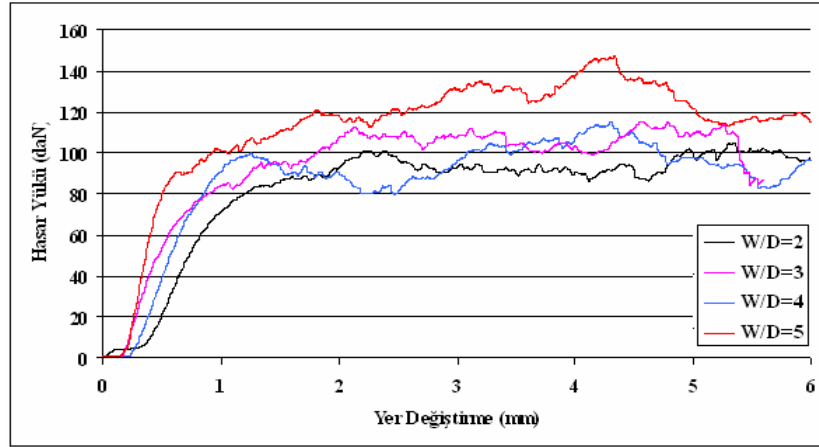
Şekil 6.30. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



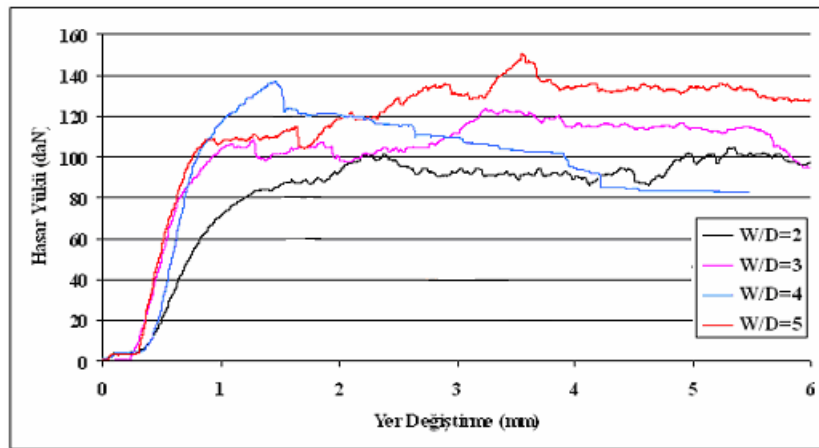
Şekil 6.31. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



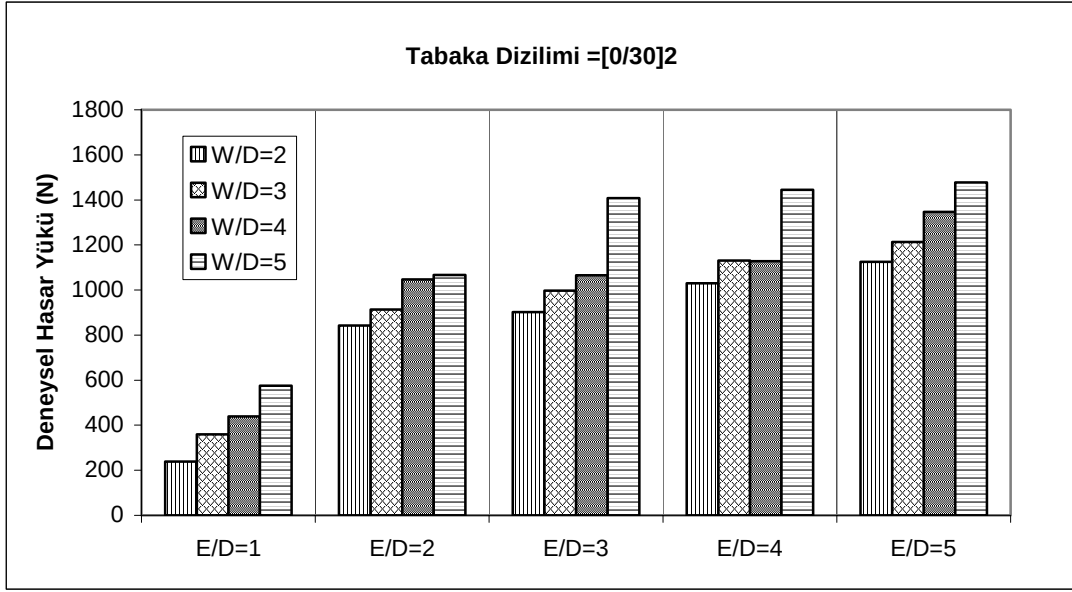
Şekil 6.32. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.33. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.34. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

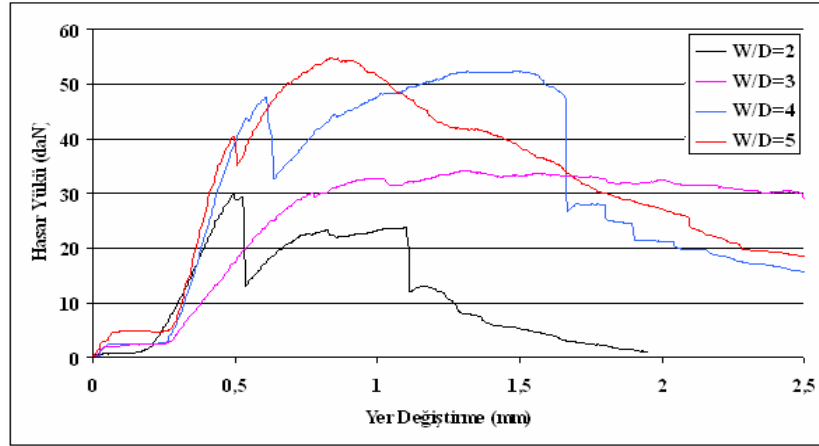


Şekil 6.35. $[0^\circ/30^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

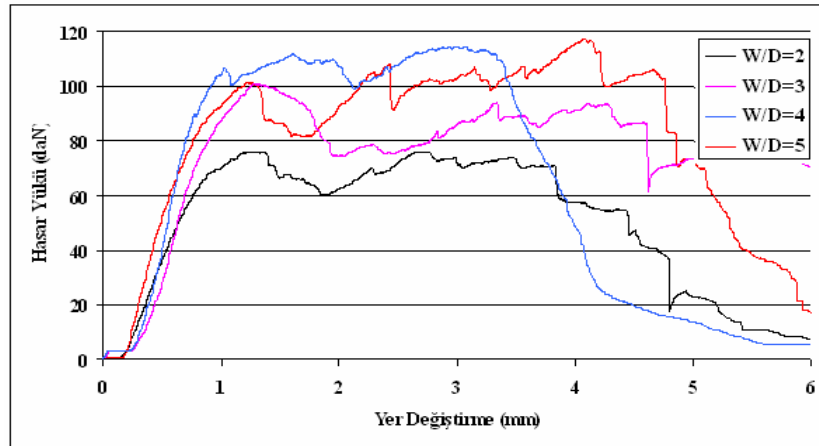
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/30^\circ]_2$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 238.023 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1478.151 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.30'daki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.31 – 6.34'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.35'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır. $E/D = 4$ oranında $W/D = 3$ ve 4 için hasar yüklerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

6.3.6. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

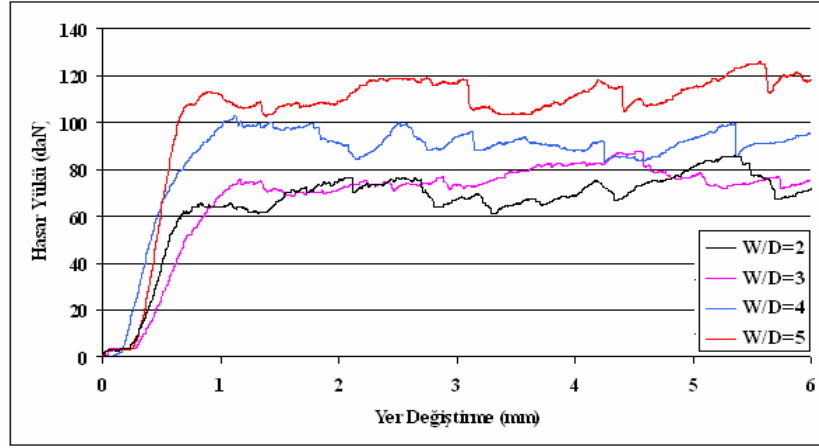
$[0^\circ/45^\circ]_s$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.36 – 6.41’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



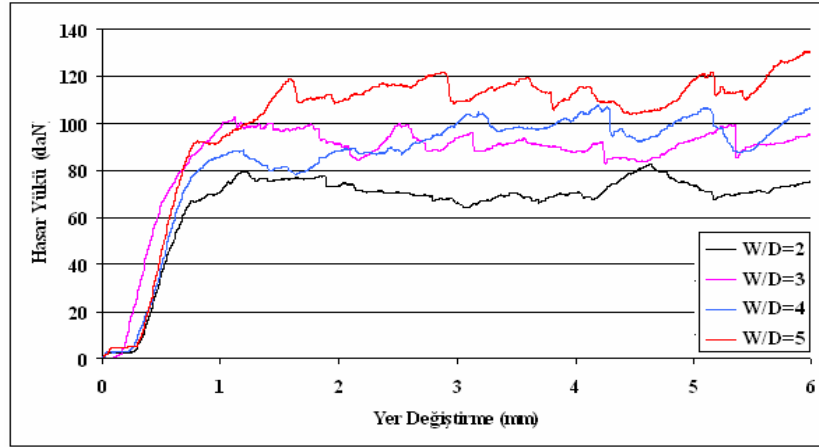
Şekil 6.36. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



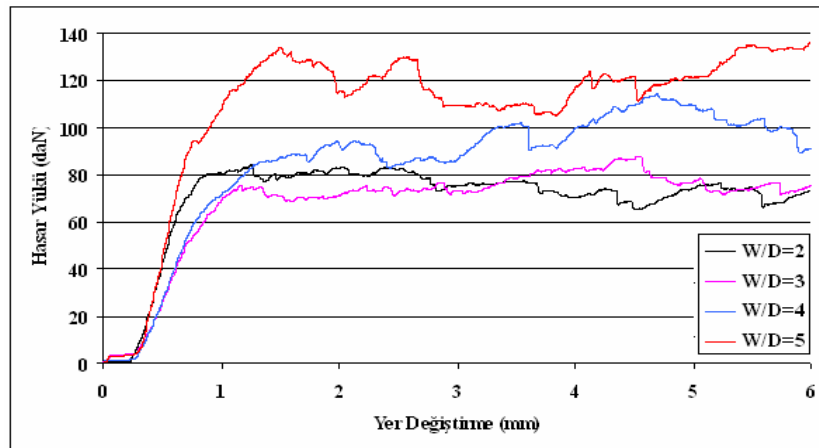
Şekil 6.37. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



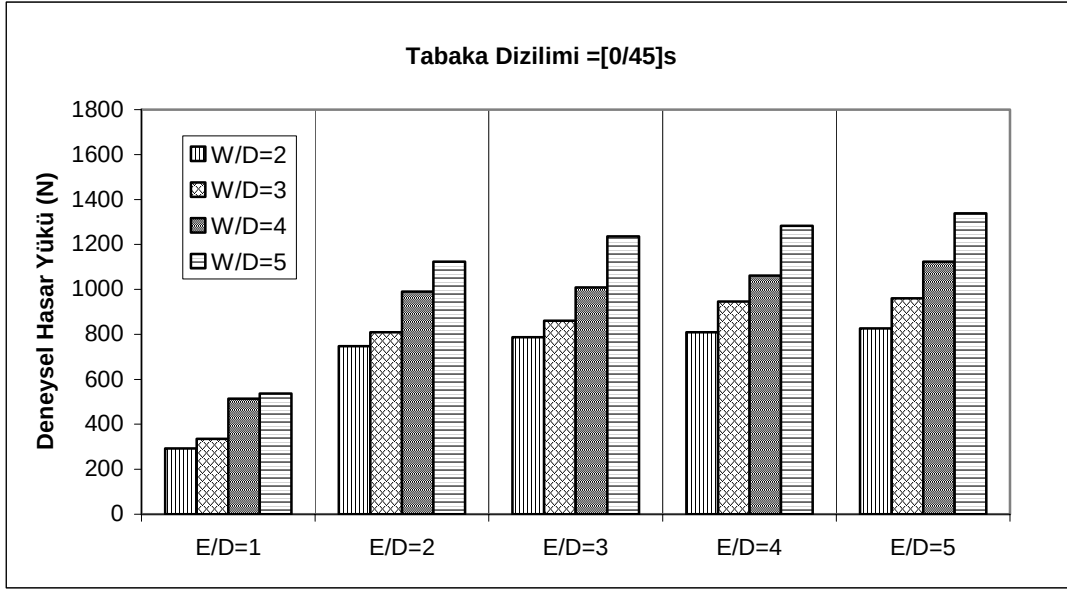
Şekil 6.38. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.39. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.40. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

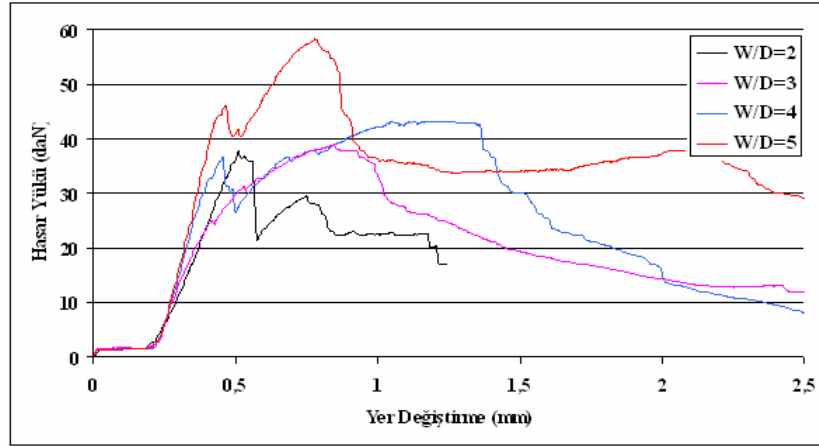


Şekil 6.41. $[0^\circ/45^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

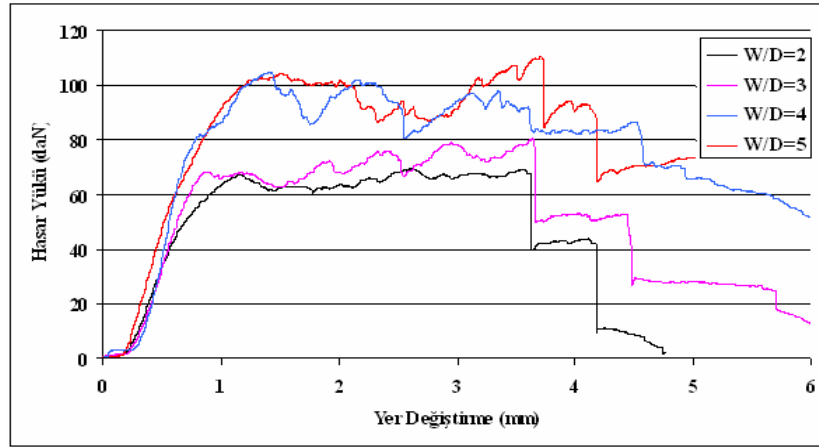
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/45^\circ]_s$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 292.697 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1338.689 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.36 ve 6.37'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.38–6.40'daki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.41'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır.

6.3.7. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

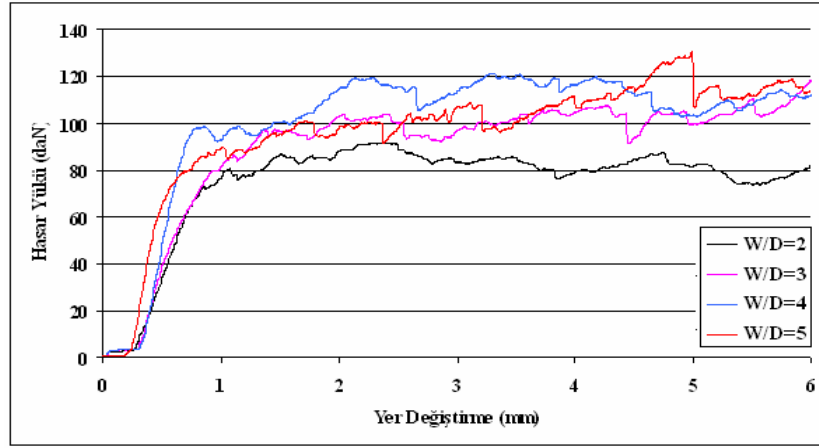
$[0^\circ/45^\circ]_2$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.42 – 6.47’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



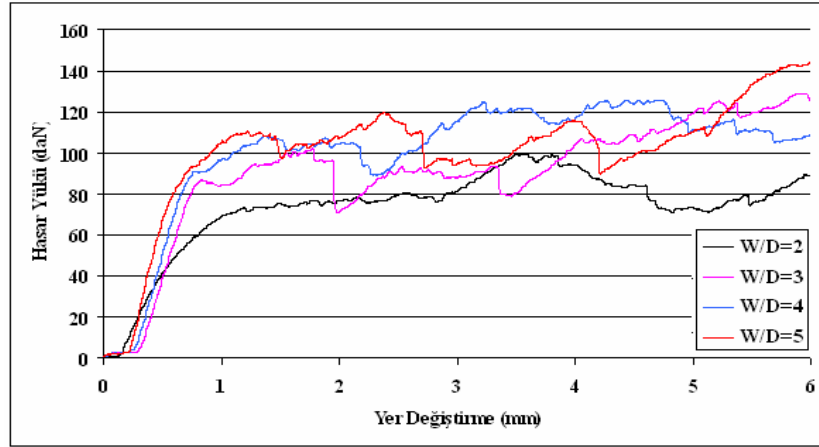
Şekil 6.42. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



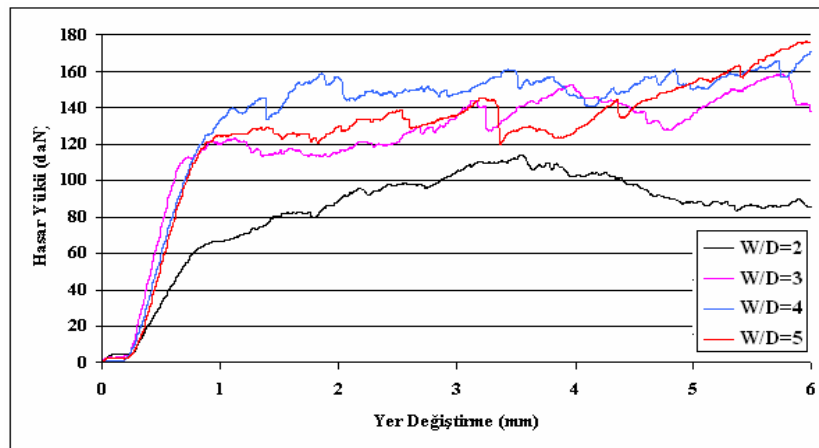
Şekil 6.43. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



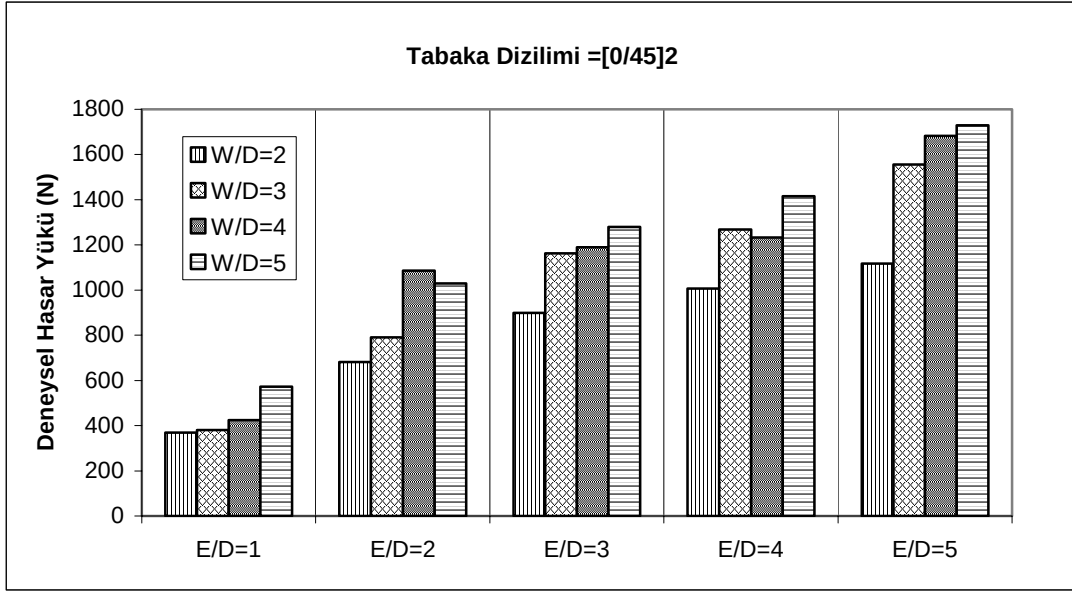
Şekil 6.44. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.45. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.46. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

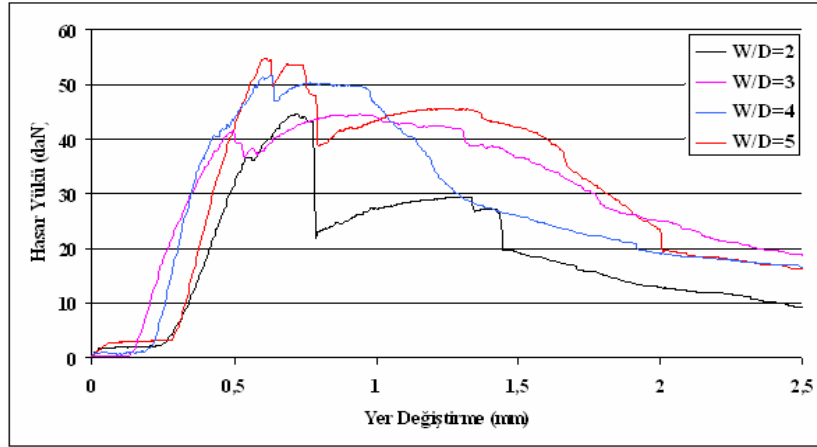


Şekil 6.47. $[0^\circ/45^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

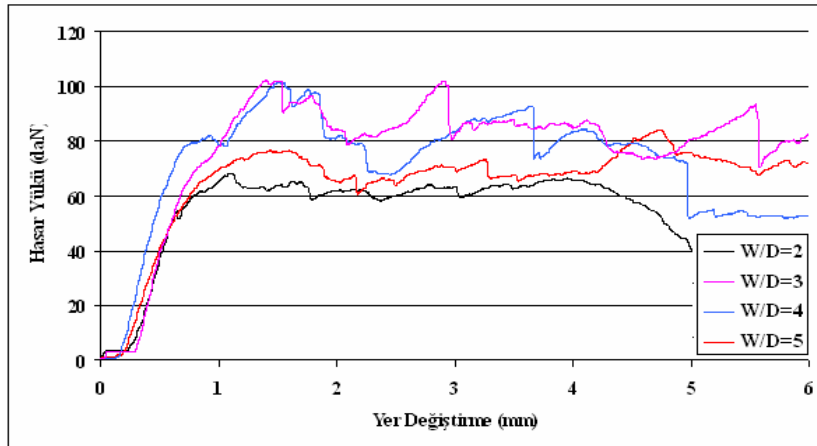
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/45^\circ]_2$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 369.402 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1729.607 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.42 ve 6.43'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.44 – 6.46'daki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.47'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır.

6.3.8. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

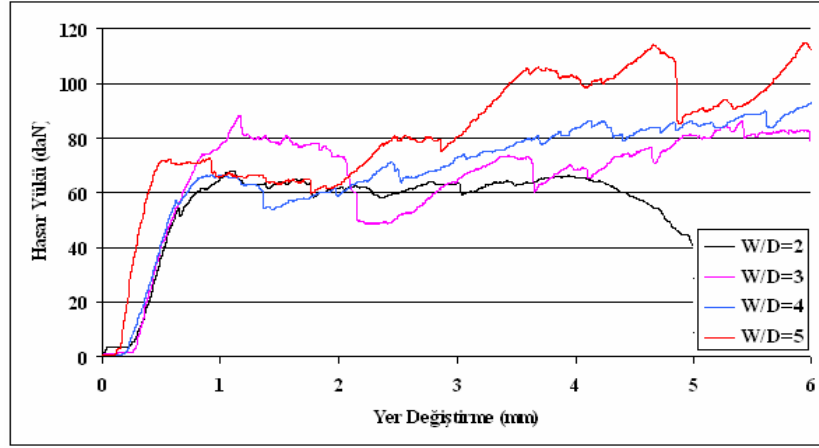
$[0^\circ/60^\circ]_s$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.48 – 6.53’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



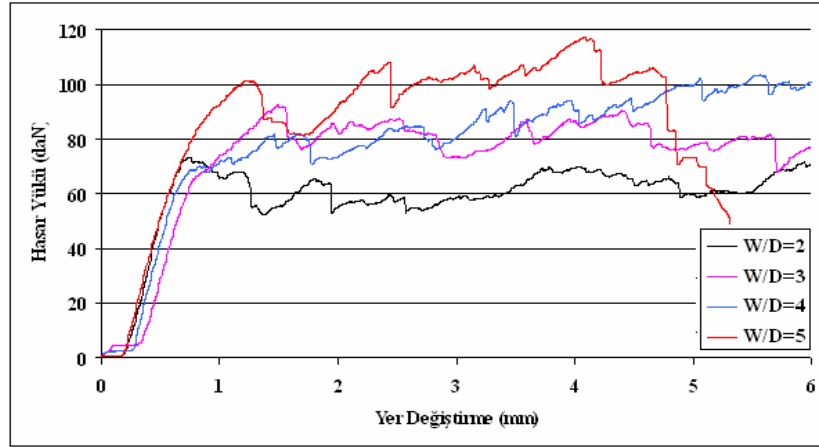
Şekil 6.48. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



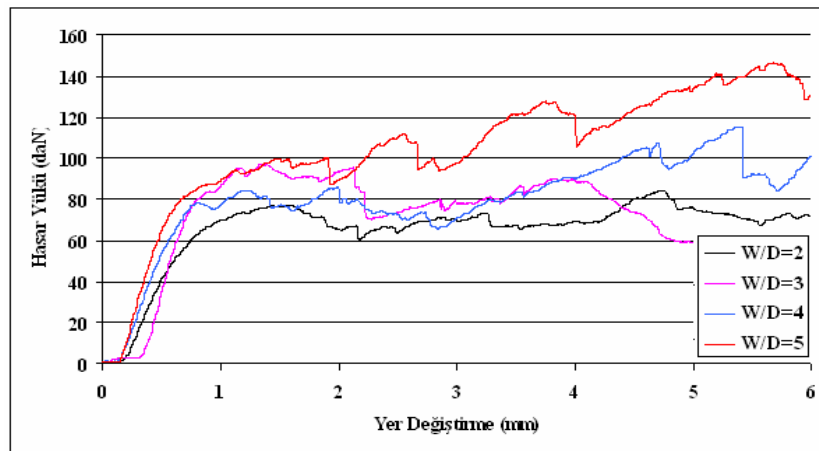
Şekil 6.49. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



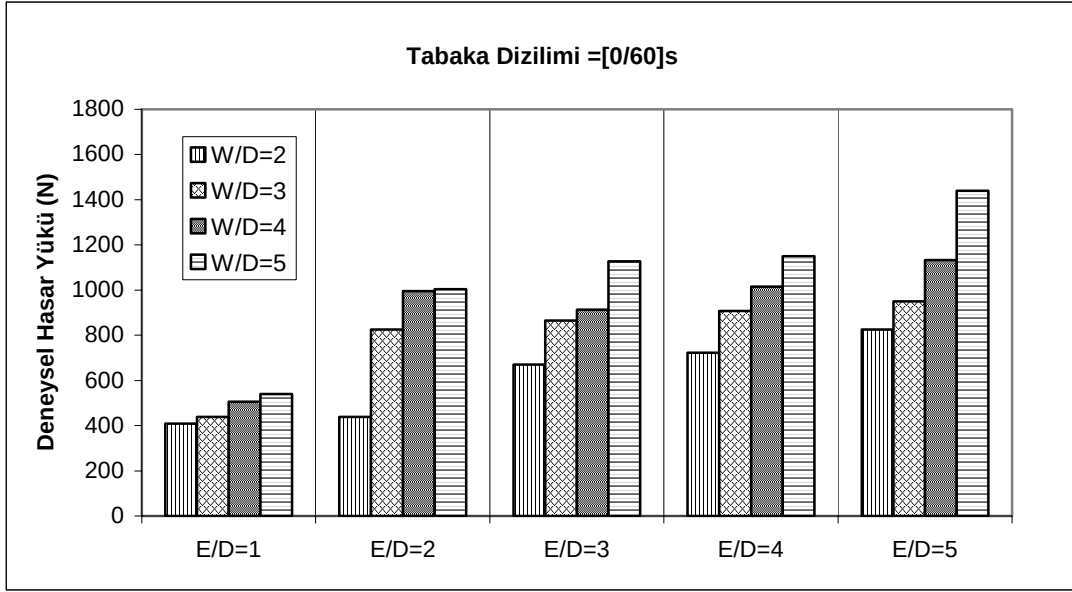
Şekil 6.50. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.51. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.52. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

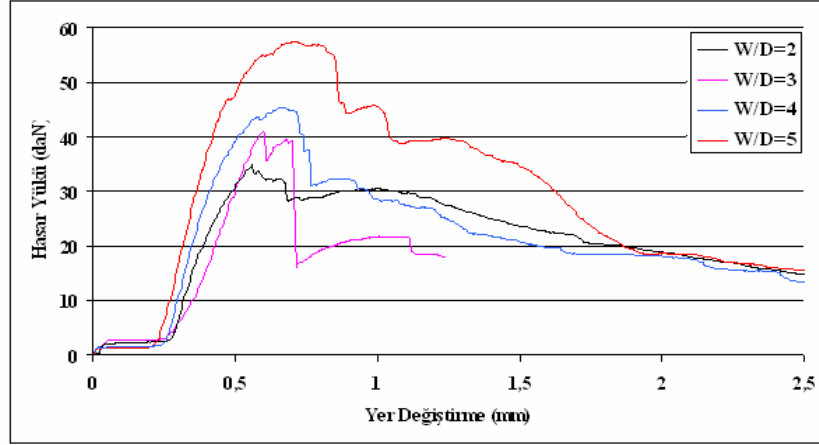


Şekil 6.53. $[0^\circ/60^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

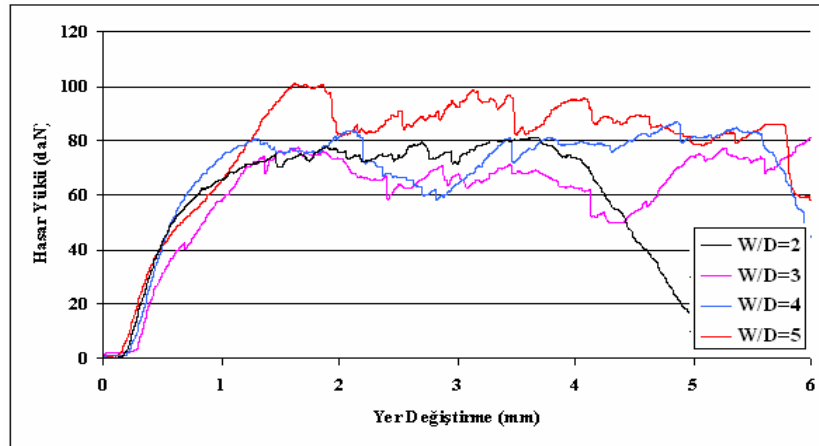
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/60^\circ]_s$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 407.938 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1439.161 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.48'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülürken Şekil 6.49'da grafikleri yer alan deney numunelerinde ise kesme ve ezilme hasarlarının bir arada gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 6.50 – 6.52'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.53'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır.

6.3.9. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

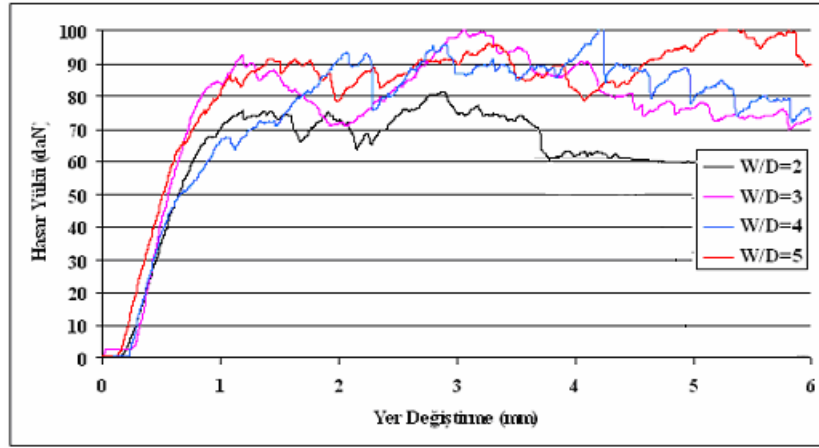
$[0^\circ/60^\circ]_2$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.54 – 6.59’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



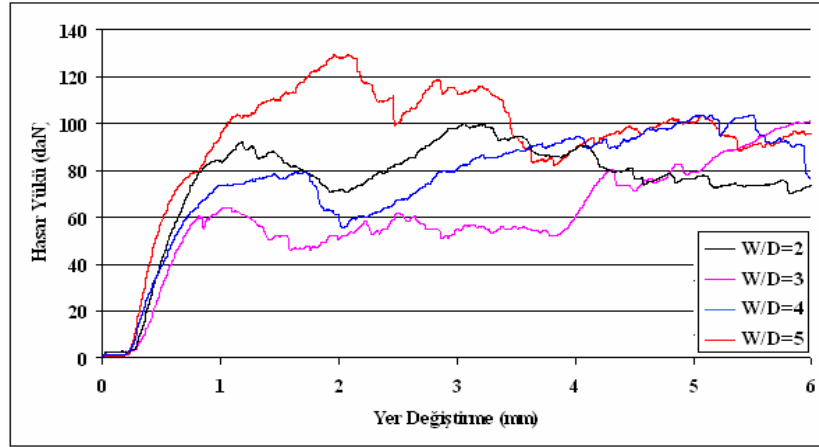
Şekil 6.54. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



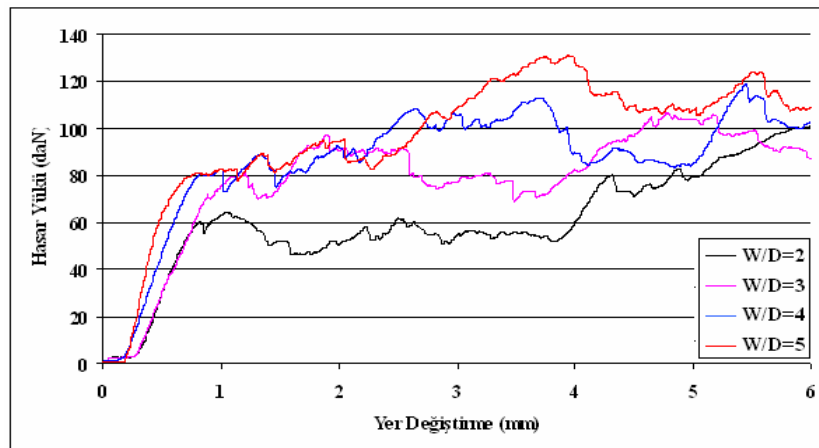
Şekil 6.55. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



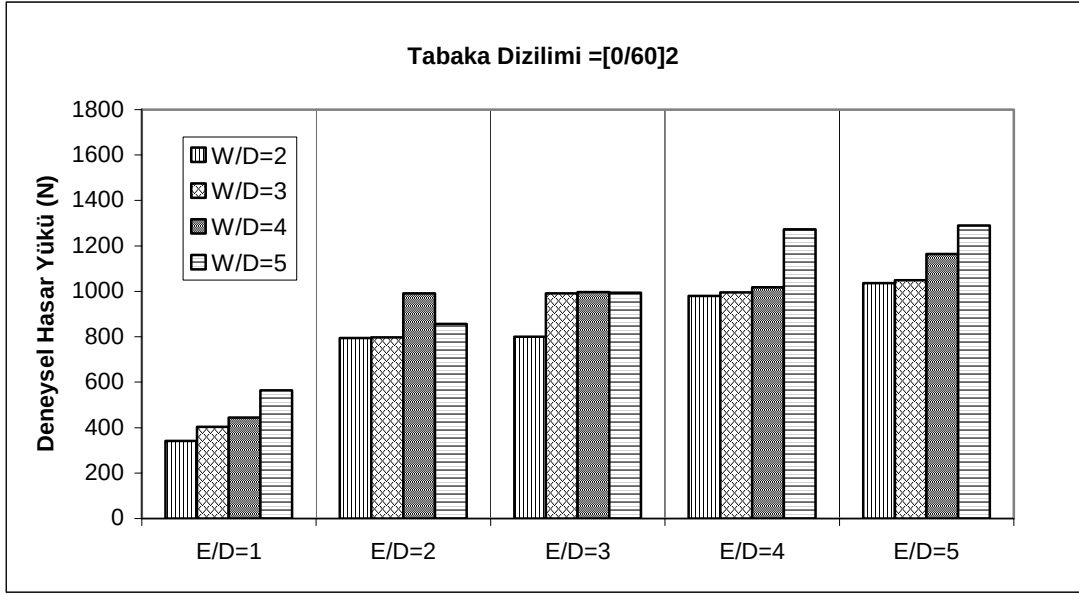
Şekil 6.56. $[0^{\circ}/60^{\circ}]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.57. $[0^{\circ}/60^{\circ}]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.58. $[0^{\circ}/60^{\circ}]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

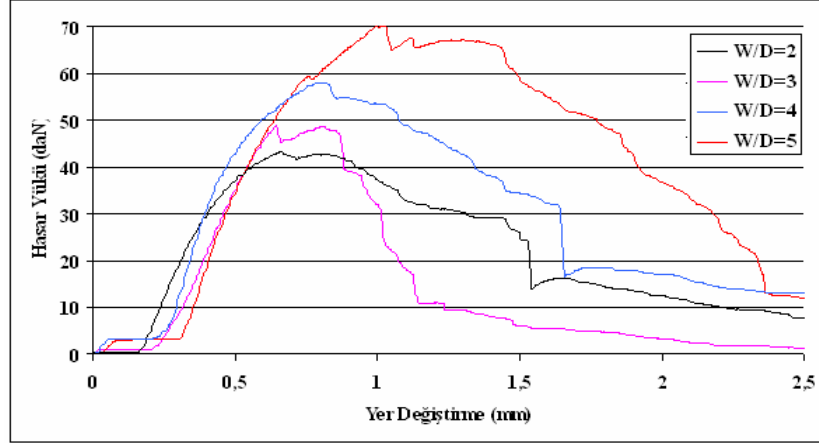


Şekil 6.59. $[0^\circ/60^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

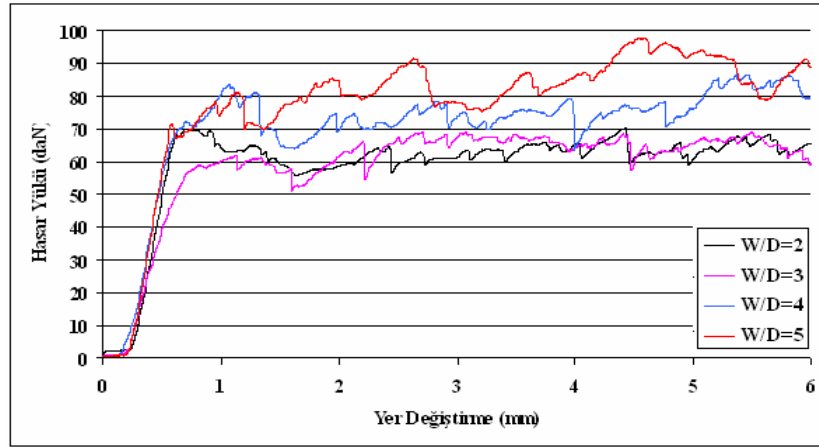
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/60^\circ]_2$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 342.305 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1288.991 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.54'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.55 – 6.56'daki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.59'daki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır.

6.3.10. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

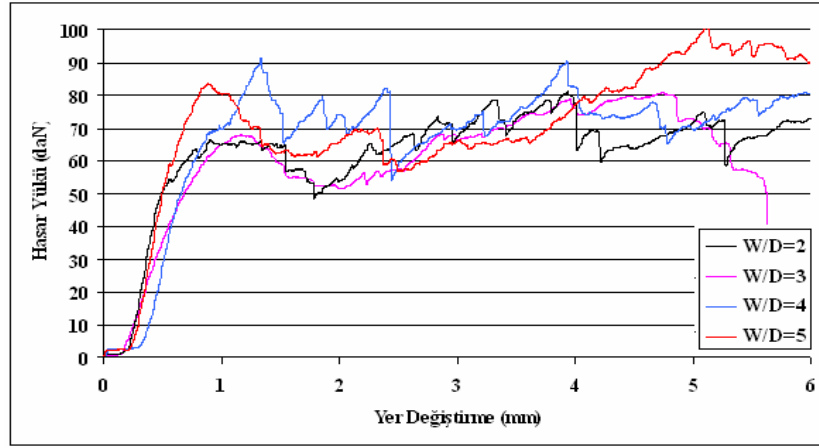
$[0^\circ/75^\circ]_s$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.59 – 6.64’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



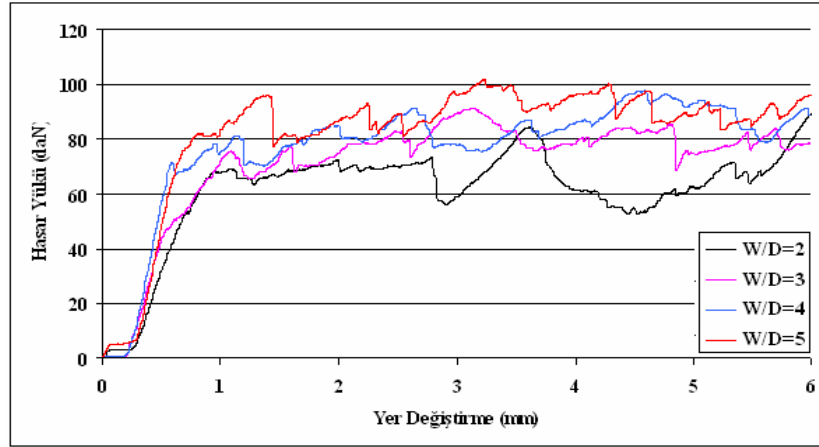
Şekil 6.60. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



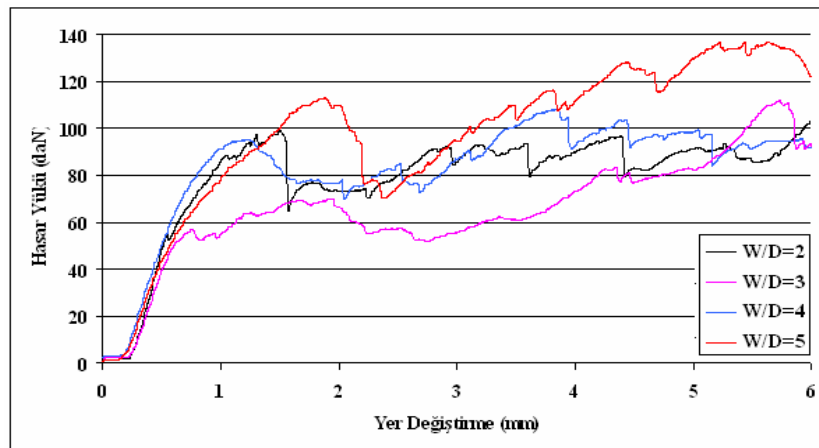
Şekil 6.61. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



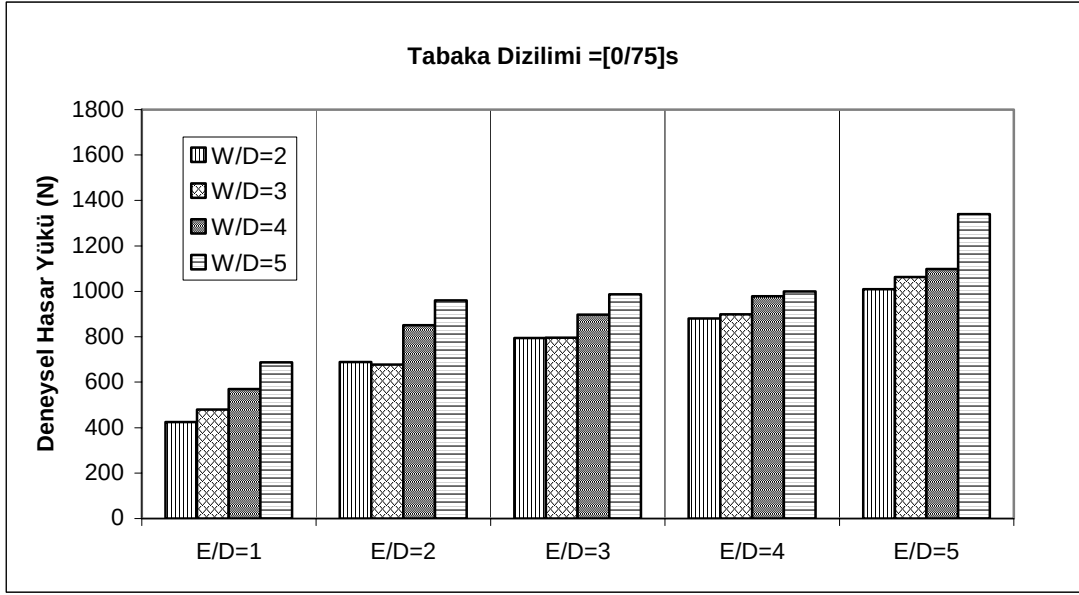
Şekil 6.62. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.63. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.64. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

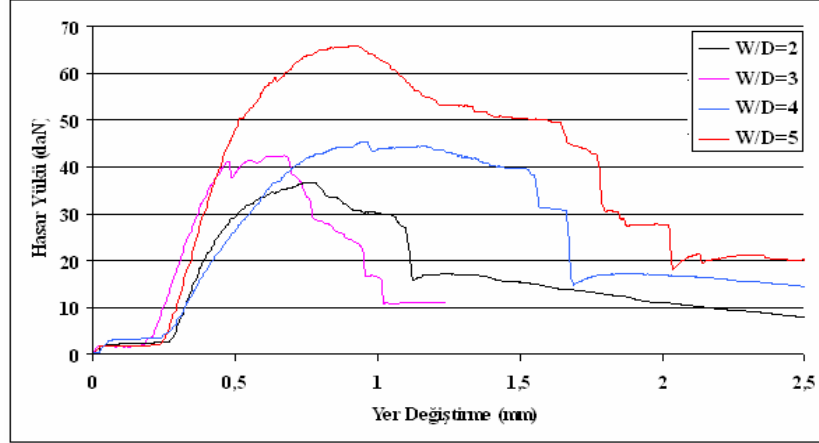


Şekil 6.65. $[0^\circ/75^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

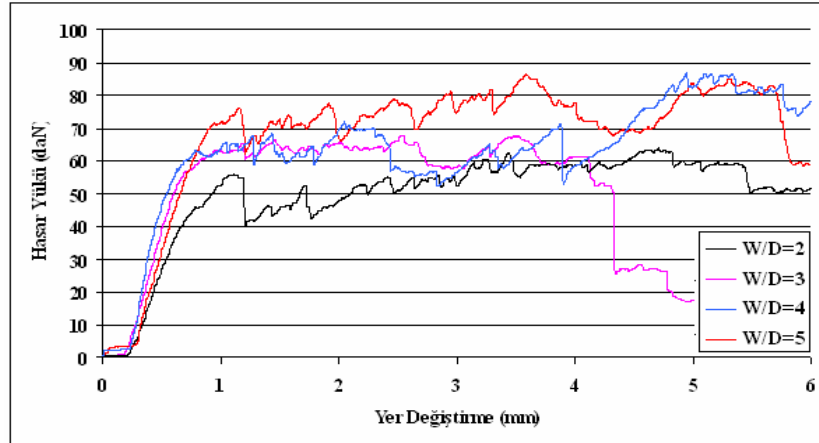
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/75^\circ]_s$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 424.488 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1340.181 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.60'daki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.61 – 6.64'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.65'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D oranının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır. Hasar yüklerinin değişimi üzerine W/D oranının etkisi incelendiği zaman genel olarak W/D oranının artmasına bağlı olarak hasar yüklerinin arttığı görülürken $E/D=2$ ve 3 oranlarında $W/D=2$ ve 3 için hasar yüklerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. $E/D=4$ içinse W/D oranındaki değişimin ve $E/D=5$ oranında $W/D=2, 3$ ve 5 oranları için hasar yükleri üzerinde çok fazla etkili olmadığı görülmüştür.

6.3.11. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

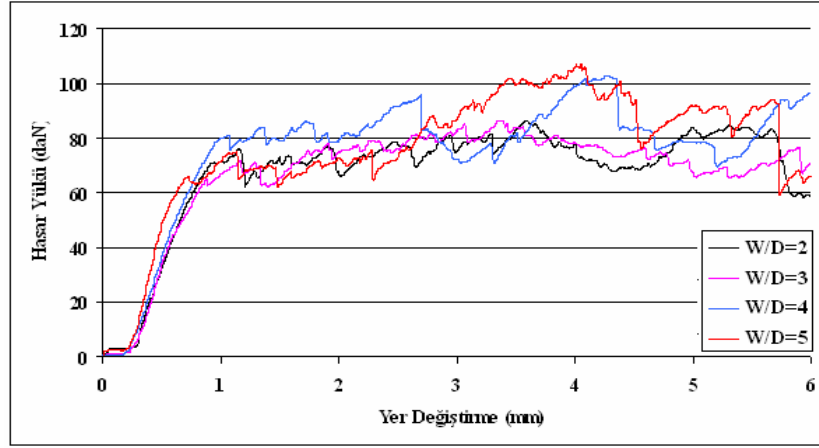
$[0^\circ/75^\circ]_2$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.65 – 6.70’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



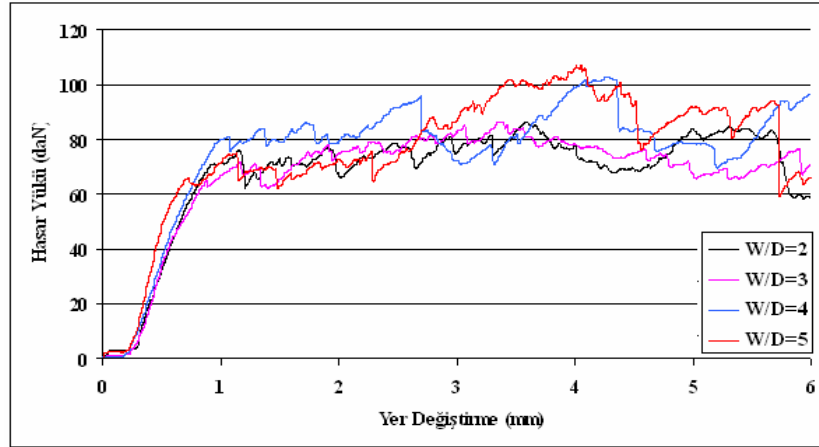
Şekil 6.66. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 1$ oranında $W/D = 2, 3, 4, 5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



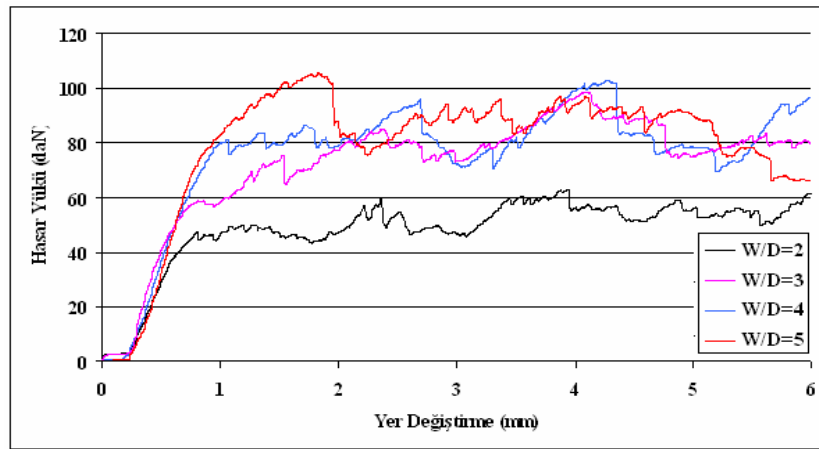
Şekil 6.67. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 2$ oranında $W/D = 2, 3, 4, 5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



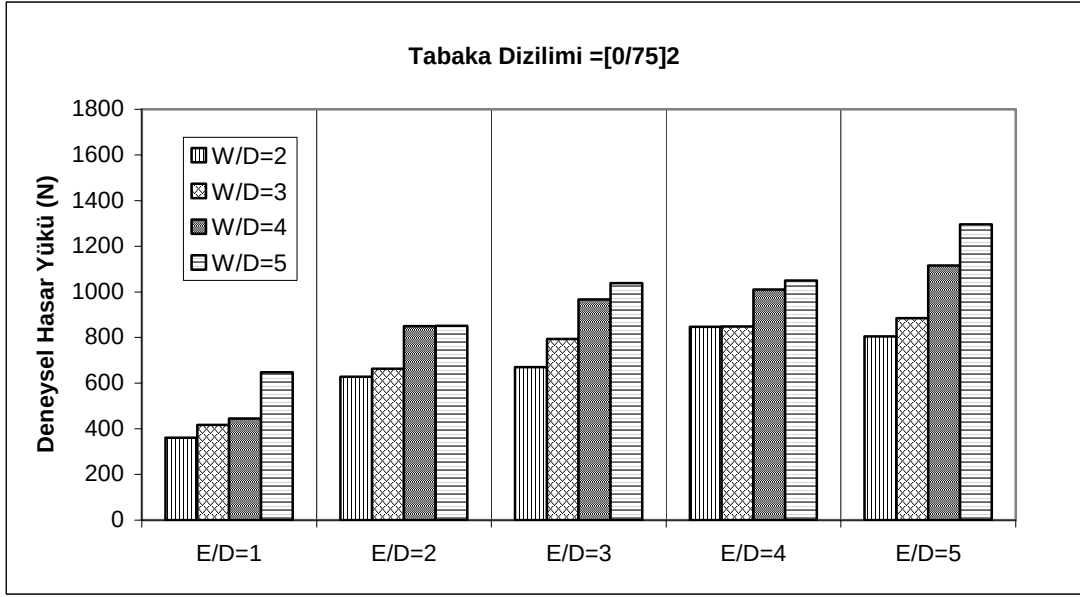
Şekil 6.68. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.69. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.70. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

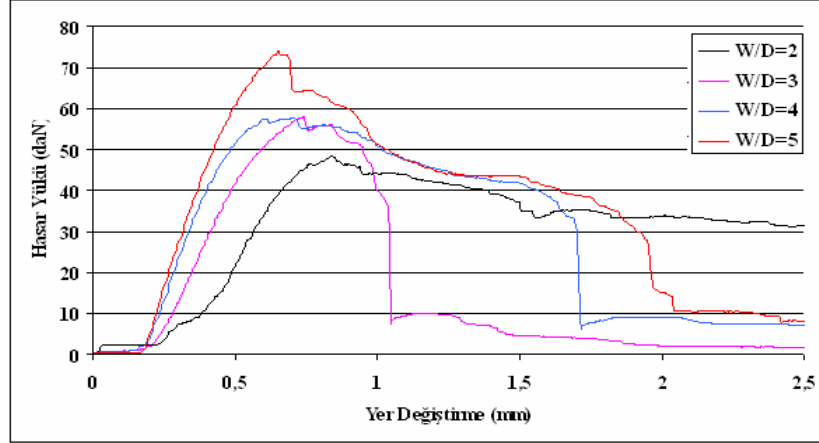


Şekil 6.71. $[0^\circ/75^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

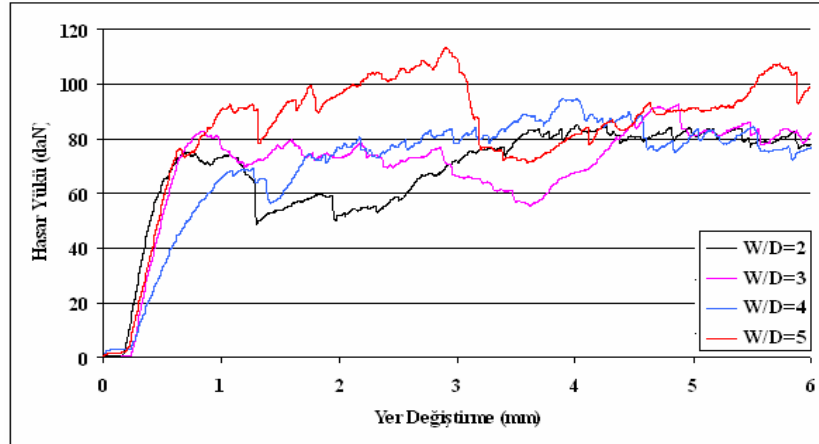
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/75^\circ]_2$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 360.621 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1296.007 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.66'daki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.67 – 6.70'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.71'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. Deneylerden elde edilen sonuçların geneli incelendiğinde E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artarken $E/D = 2$ oranında $W/D = 4$ ve 5 için ve $E/D = 4$ oranında $W/D = 2$ ve 3 için elde edilen hasar yüklerinin birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmektedir.

6.3.12. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

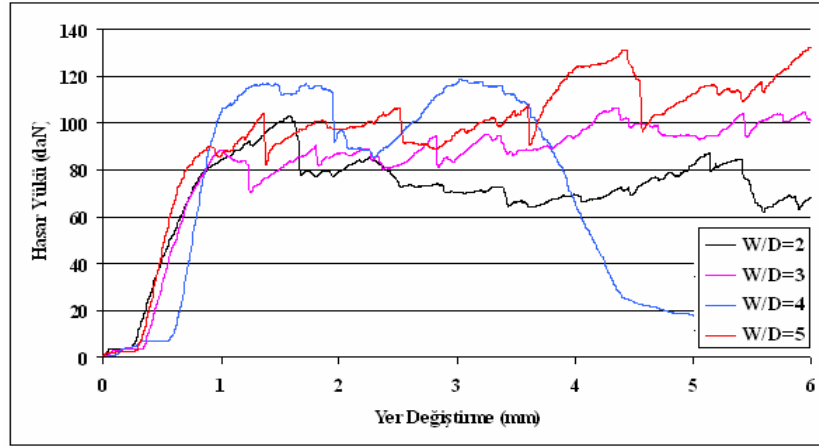
$[0^\circ/90^\circ]_s$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.71 – 6.76’de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



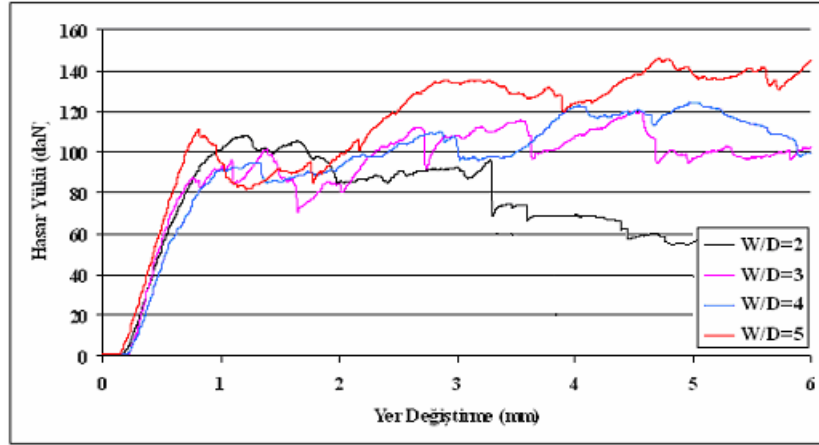
Şekil 6.72. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



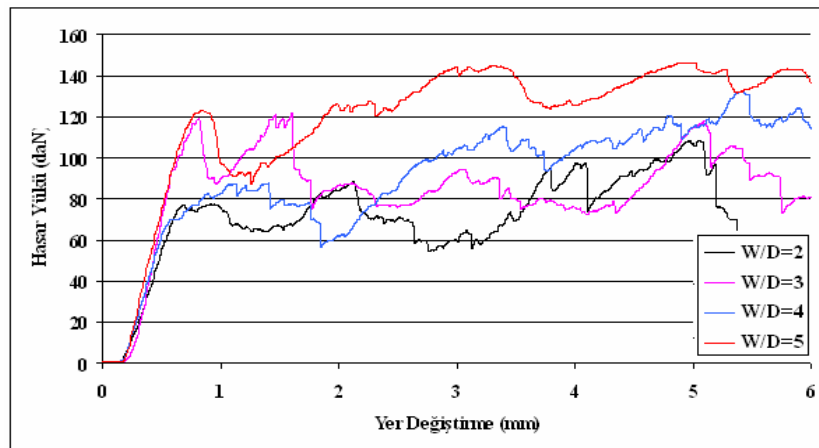
Şekil 6.73. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



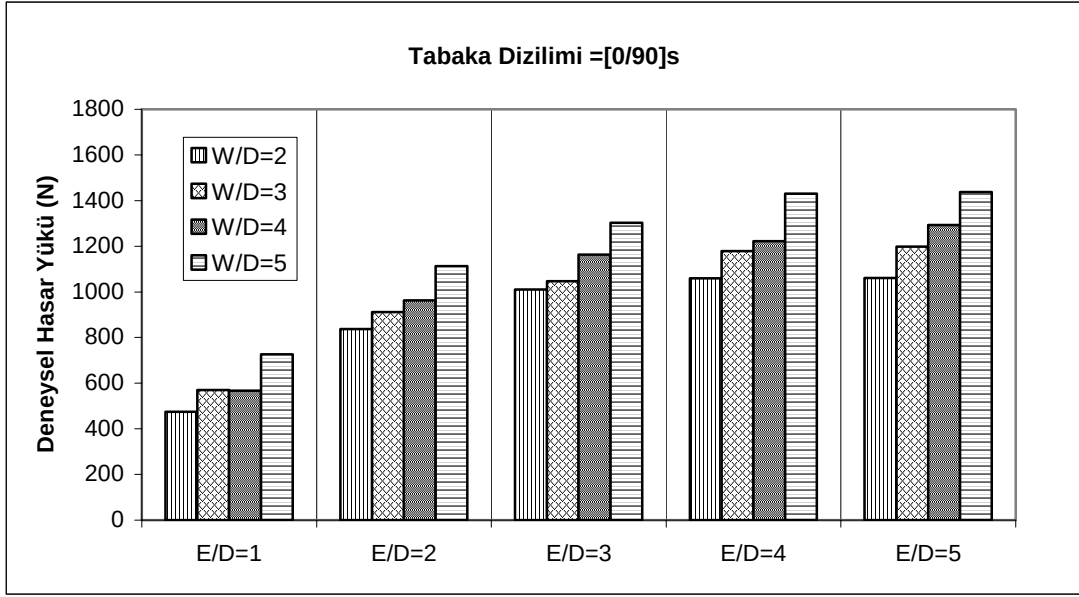
Şekil 6.74. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.75. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.76. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.

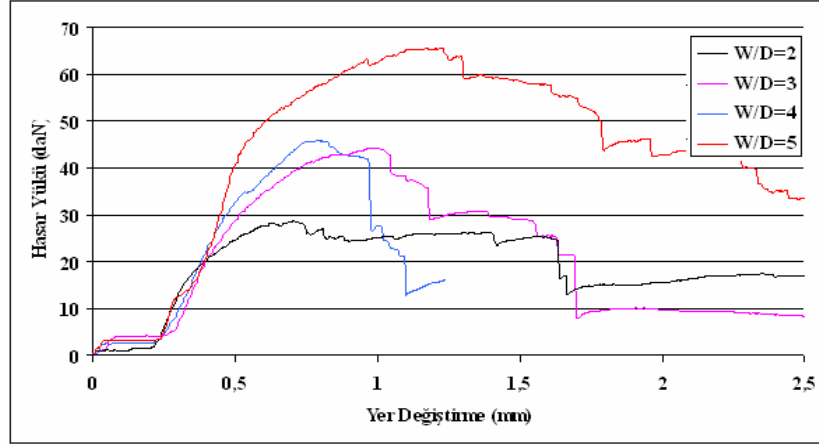


Şekil 6.77. $[0^\circ/90^\circ]_s$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

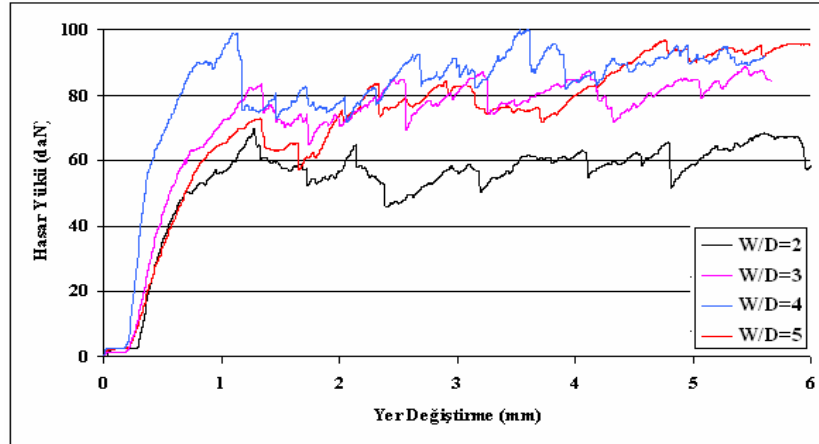
Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/90^\circ]_s$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 473.847 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1438.035 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.72'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.73 – 6.75'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.77'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır. W/D değişiminin $E/D = 1$ oranında $W/D = 2$ ve 3 için etkili olmadığı deney sonuçlarından görülmektedir.

6.3.13. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Tabaka dizilimine sahip levhaya ait deney sonuçları

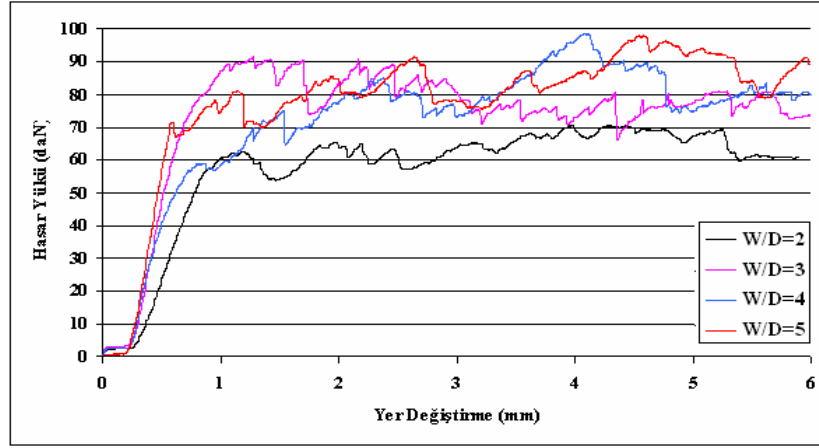
$[0^\circ/90^\circ]_2$ levhaya ait deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.77 – 6.82’ de geometrik parametrelerin (E/D, W/D) değişimine göre sunulmuştur.



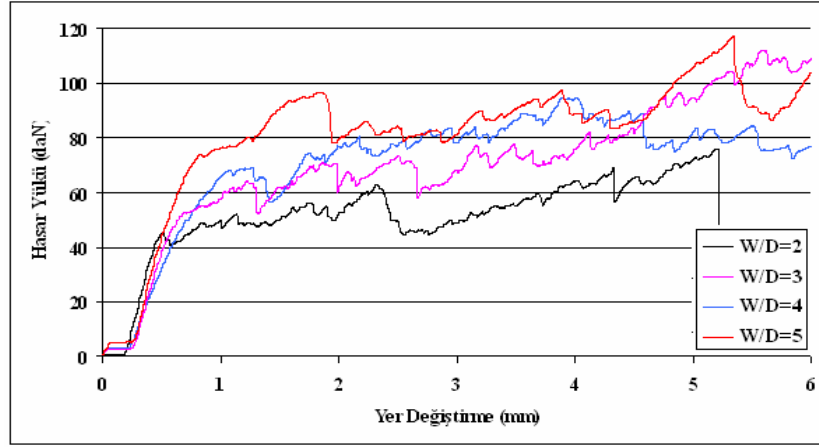
Şekil 6.78. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için E/D =1 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



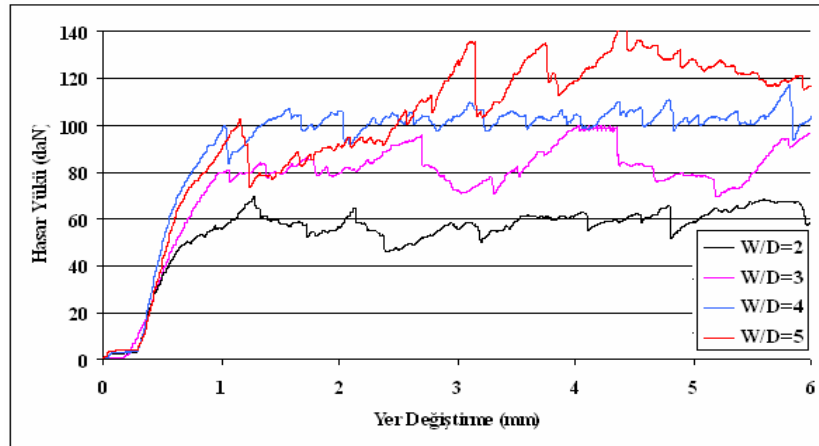
Şekil 6.79. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levha için E/D =2 oranında W/D =2,3,4,5 için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



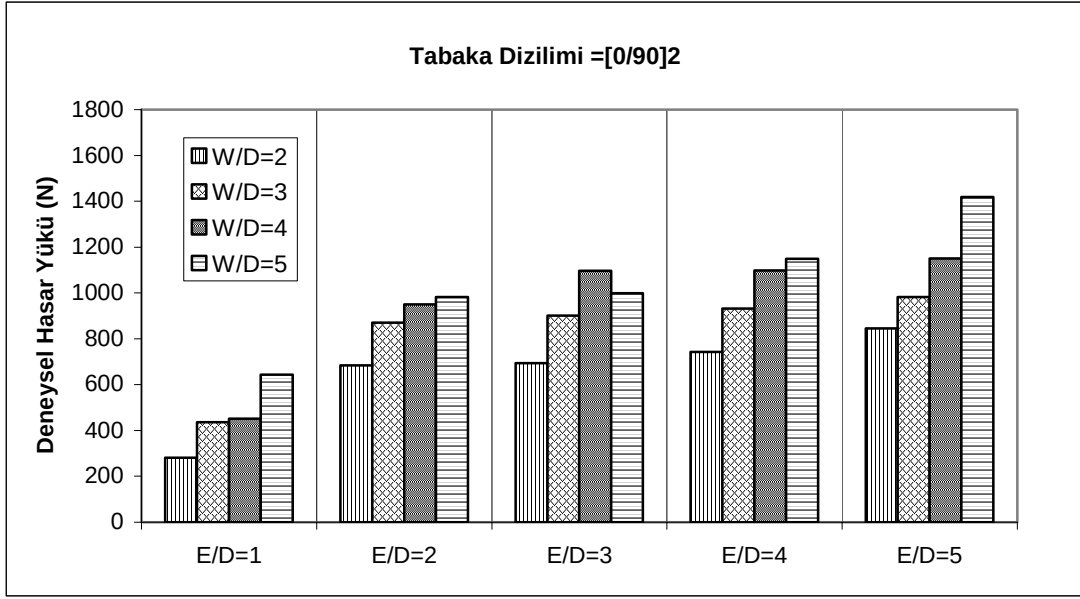
Şekil 6.80. $[0^0/90^0]_2$ Levha için $E/D = 3$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.81. $[0^0/90^0]_2$ Levha için $E/D = 4$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



Şekil 6.82. $[0^0/90^0]_2$ Levha için $E/D = 5$ oranında $W/D = 2,3,4,5$ için elde edilen yük – yer değiştirme değerleri grafiği.



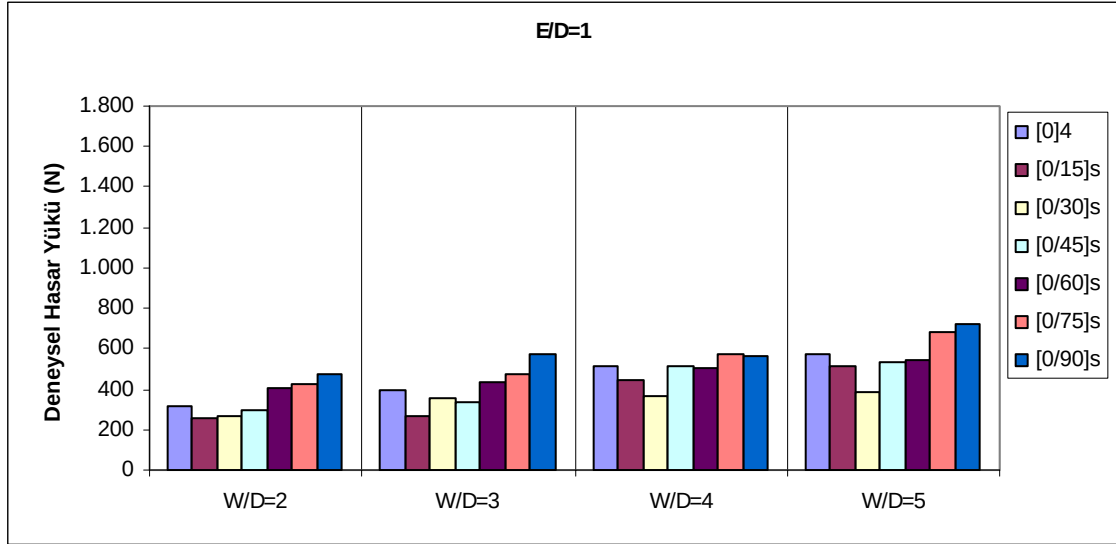
Şekil 6.83. $[0^\circ/90^\circ]_2$ Levhada deney sonucunda elde edilen maksimum yük değerlerinin geometrik parametrelerle değişimi.

Grafiklerden görüldüğü gibi $[0^\circ/90^\circ]_2$ levha kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 280.836 N değeri ile $E/D = 1$ ve $W/D = 2$ olan levha için, en yüksek hasar yükü ise 1418.108 N değeri ile $E/D = 5$ ve $W/D = 5$ olan levha için gerçekleşmiştir. Şekil 6.78'deki grafiklerinin elde edildiği deney numuneleri deney sonucunda incelendiği zaman kesme hasarına uğradıkları görülmüştür. Şekil 6.79 – 6.82'deki grafiklerin elde edildiği deneylere ait numuneler incelendiğinde numunelerde ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür. Şekil 6.83'deki grafik hasar yüklerinin E/D ve W/D geometrik parametreleri ile değişimini göstermektedir. E/D ve W/D oranlarının artmasına paralel olarak hasar yükleri artmıştır.

6.3.14. Deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırması

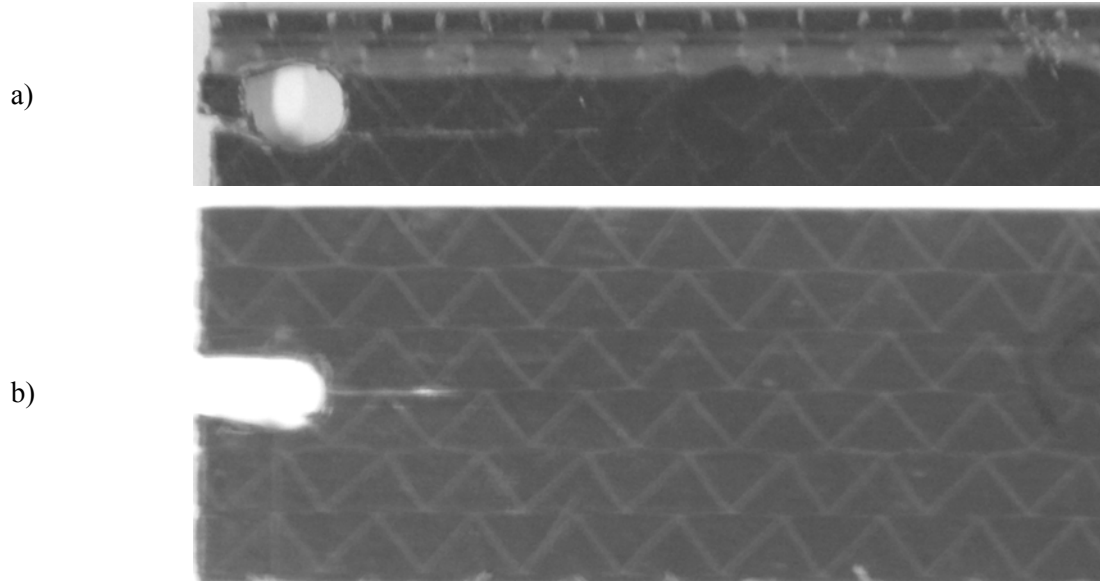
Bu bölümde deneylerden elde edilen hasar yüklerinin geometrik parametrelere bağlı olarak (E/D ve W/D oranları) fiber takviye açısına göre değişimi incelenmiştir.

Şekil 6.83’de $E/D = 1$ oranı için simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



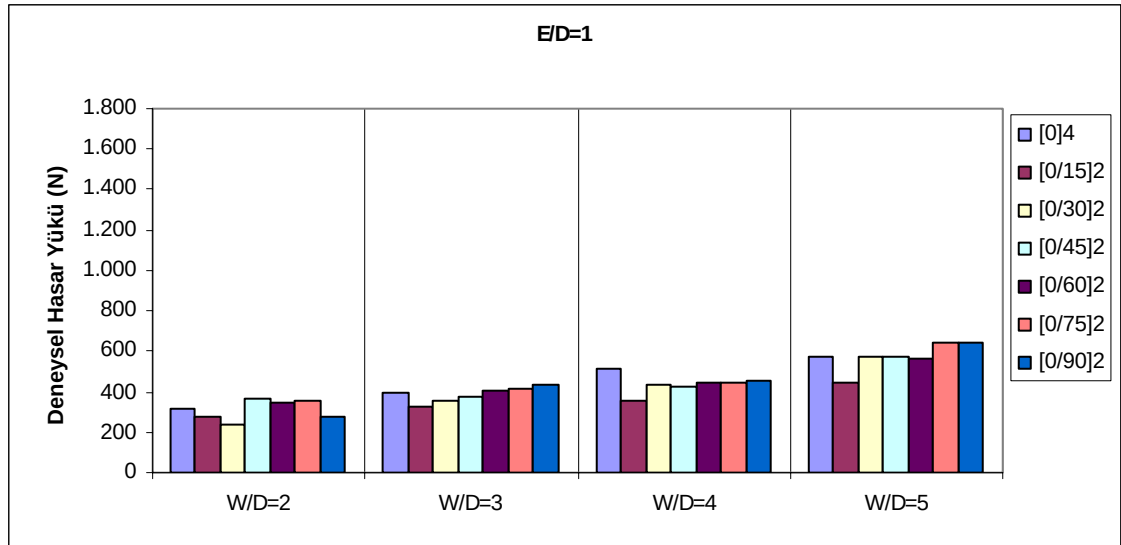
Şekil 6.84. $E/D = 1$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.84 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açı değerleri için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 256 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ/90^\circ]_s$ dizilimine sahip levhada 725.856 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 1$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak kesme hasarı görülmüştür. Şekil 6.85’de $[0^\circ/15^\circ]_s$ ve $[0^\circ/90^\circ]_s$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



Şekil 6.85. Deney sonrasında $E/D = 1$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha.

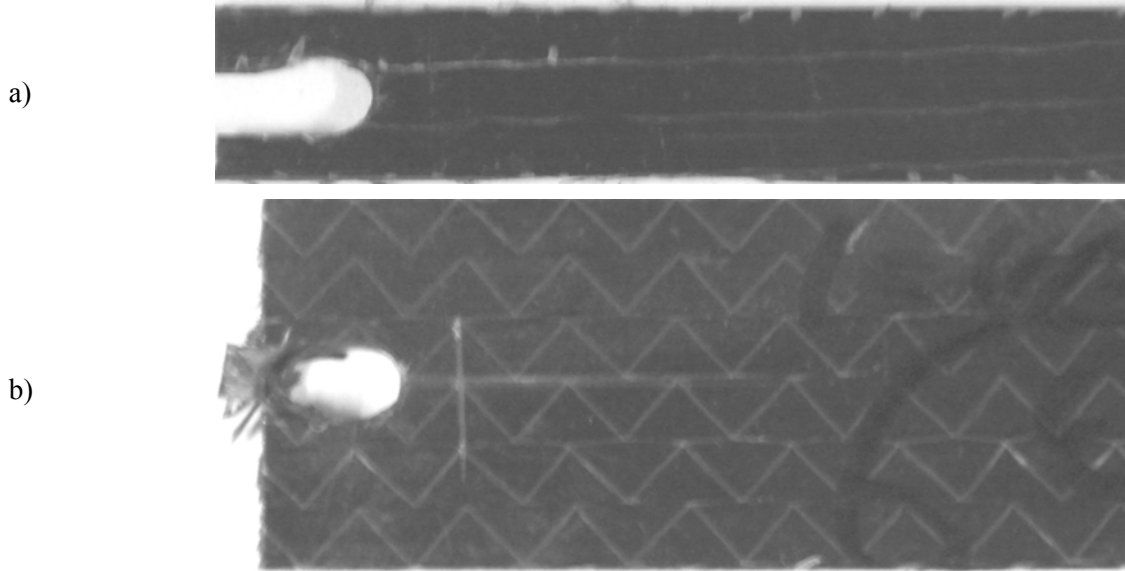
Şekil 6.85’de $E/D = 1$ oranı için anti - simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 6.86. $E/D = 1$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

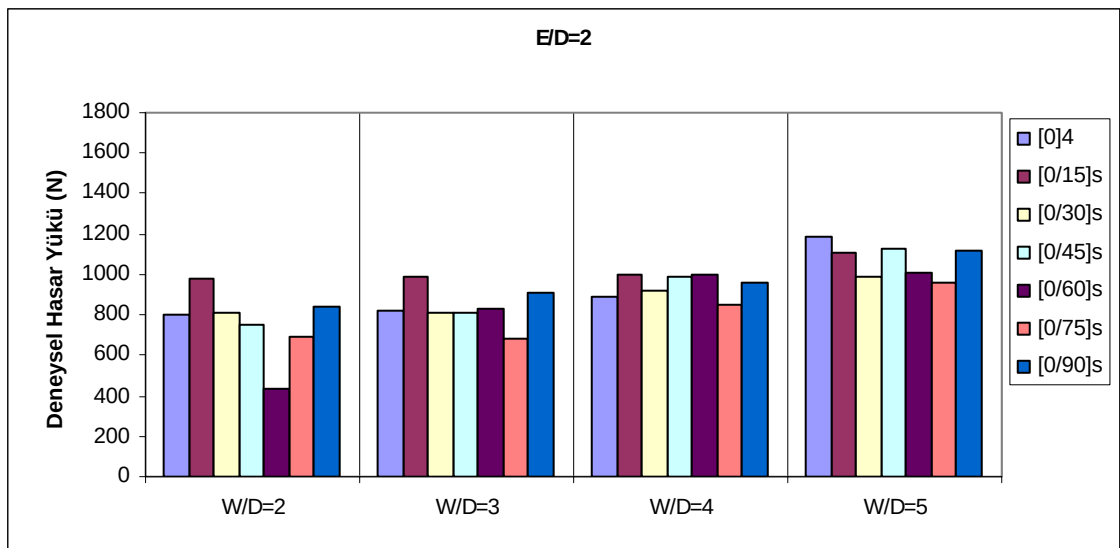
Şekil 6.86 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açılar için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada 239 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ dizilimine sahip levhada 647.611 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 1$ olan deney

numunelerinin tamamında hasar tipi olarak kesme hasarı görülmüştür. Grafikte göze çarpan en önemli unsurlardan biri ise $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha hariç diğer tüm levhalarda $W/D = 4$ ve 5 için hasar yüklerinin çok yaklaşık değerlerde olmasıdır. Bu durumda $W/D = 4$ ve 5 değişiminin etkisi çok fazla olmamaktadır. Şekil 6.87’de $[0^\circ/30^\circ]_2$ ve $[0^\circ/75^\circ]_2$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



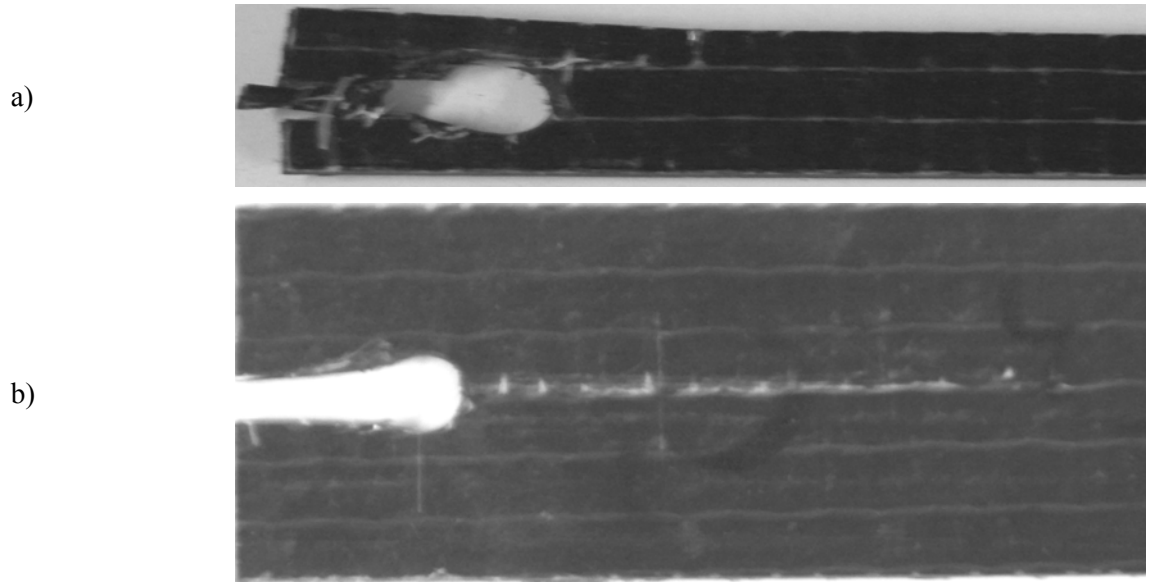
Şekil 6.87. Deney sonrasında $E/D = 1$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.88’de $E/D = 2$ oranı için simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



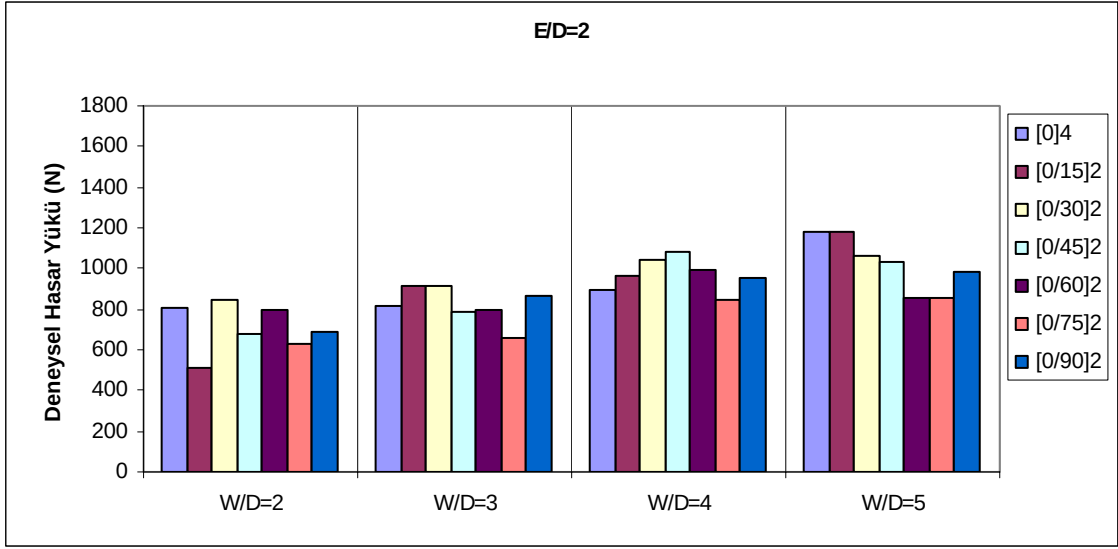
Şekil 6.88. $E/D = 2$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.88 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açılar için çok fazla artmadığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 438 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ dizilimine sahip levhada 1183.07 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 2$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak kesme hasarı görülmüştür. Grafikte göze çarpan en önemli unsurlardan biri ise genel olarak tüm levhaların 800 N ile 1100 N aralığında hasar yüküne sahip olduğudur. Şekil 6.89’da $[0^\circ/60^\circ]_s$ ve $[0^\circ]_4$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



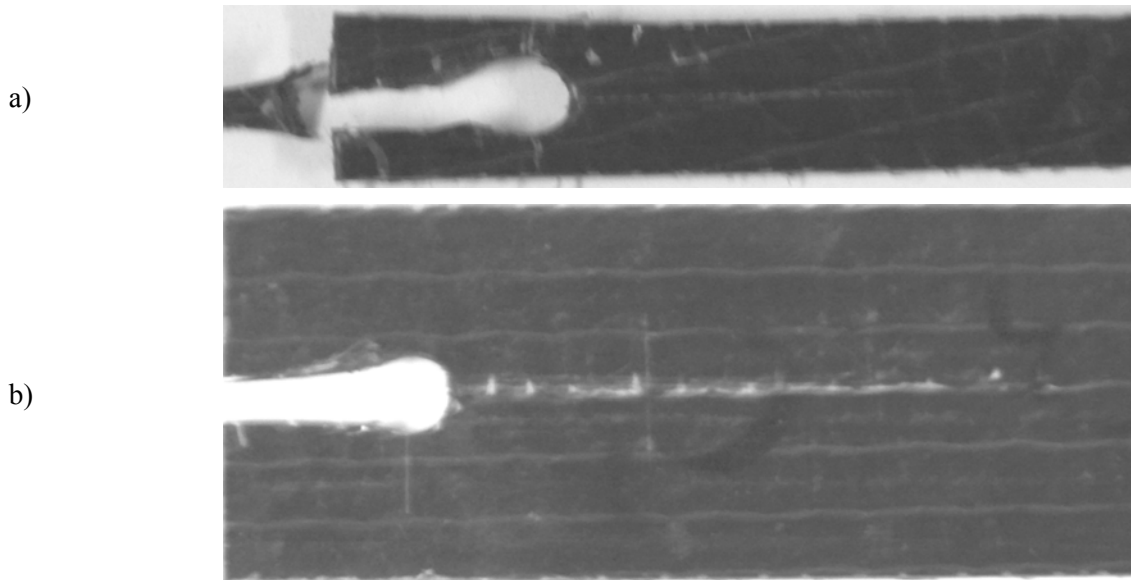
Şekil 6.89. Deney sonrasında $E/D = 2$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.90’da $E/D = 2$ oranı için anti - simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



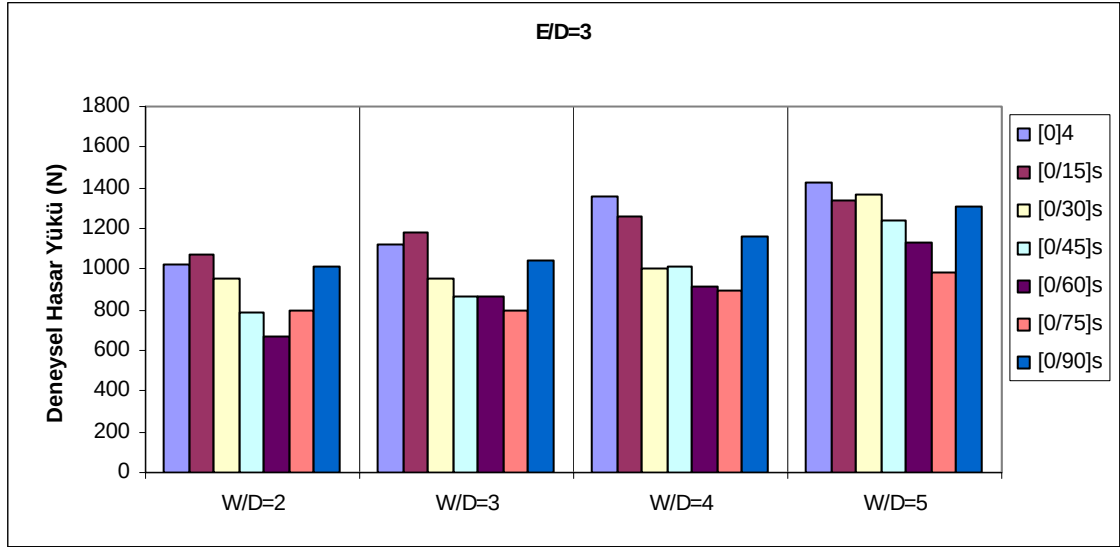
Şekil 6.90. E/D = 2 için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.90 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açılar için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü W/D =2 için $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada 509.773 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise W/D = 5 için $[0^\circ]_4$ dizilimine sahip levhada 1183.07 N olarak elde edilmiştir. E/D = 2 olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak kesme hasarı görülmüştür. Şekil 6.91’de $[0^\circ/15^\circ]_2$ ve $[0^\circ]_4$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



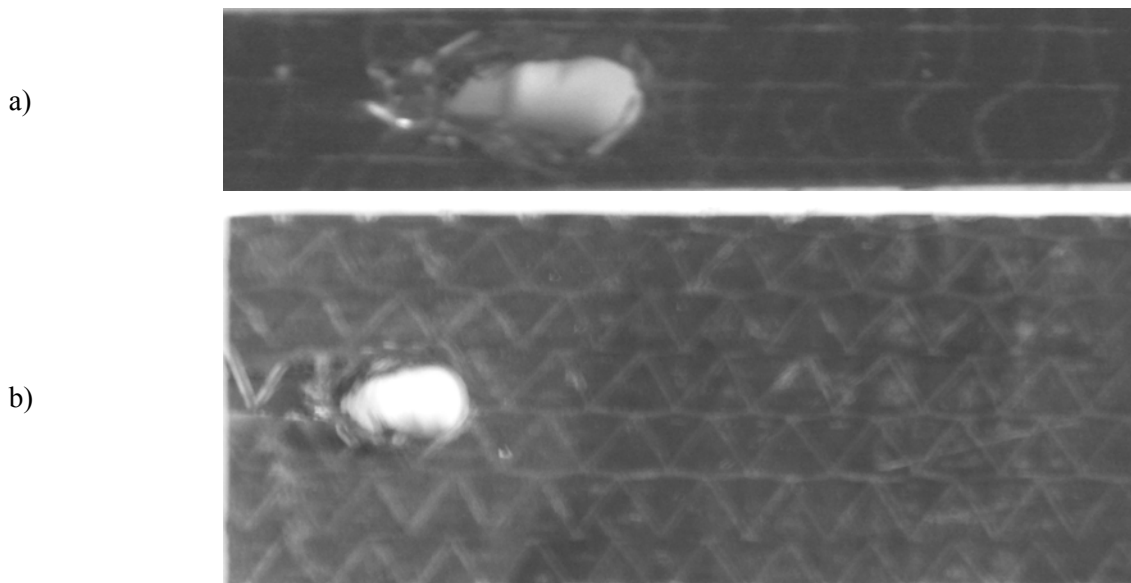
Şekil 6.91. Deney sonrasında E/D = 2 olmak üzere a) W/D = 2 için $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) W/D = 5 için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.92’de $E/D = 3$ oranı için simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



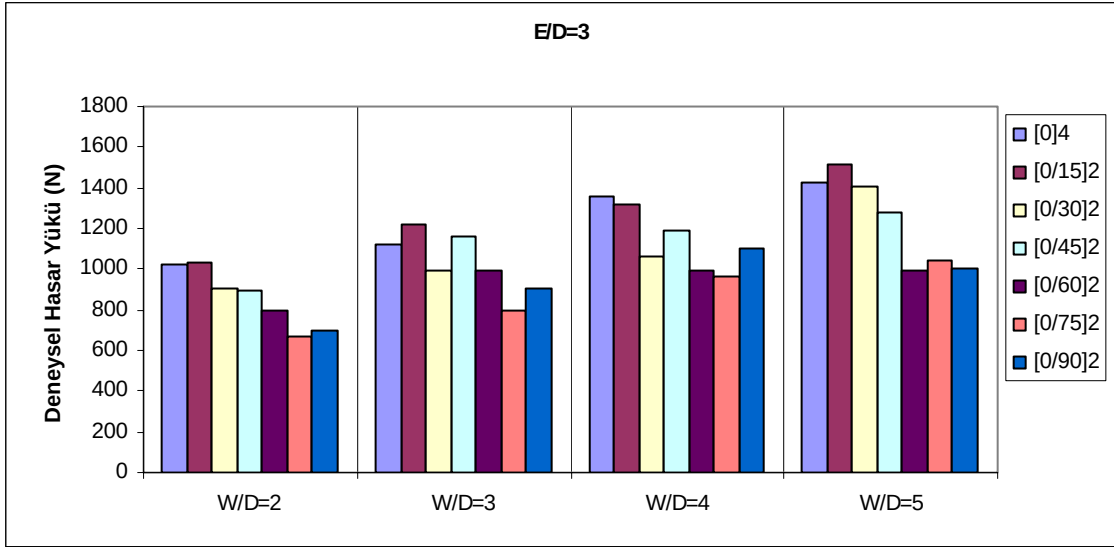
Şekil 6.92. $E/D = 3$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.92 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açılar için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 669.842 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ dizilimine sahip levhada 1421.906 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 3$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak ezilme hasarı görülmüştür. Şekil 6.93’de $[0^\circ/60^\circ]_s$ ve $[0^\circ]_4$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



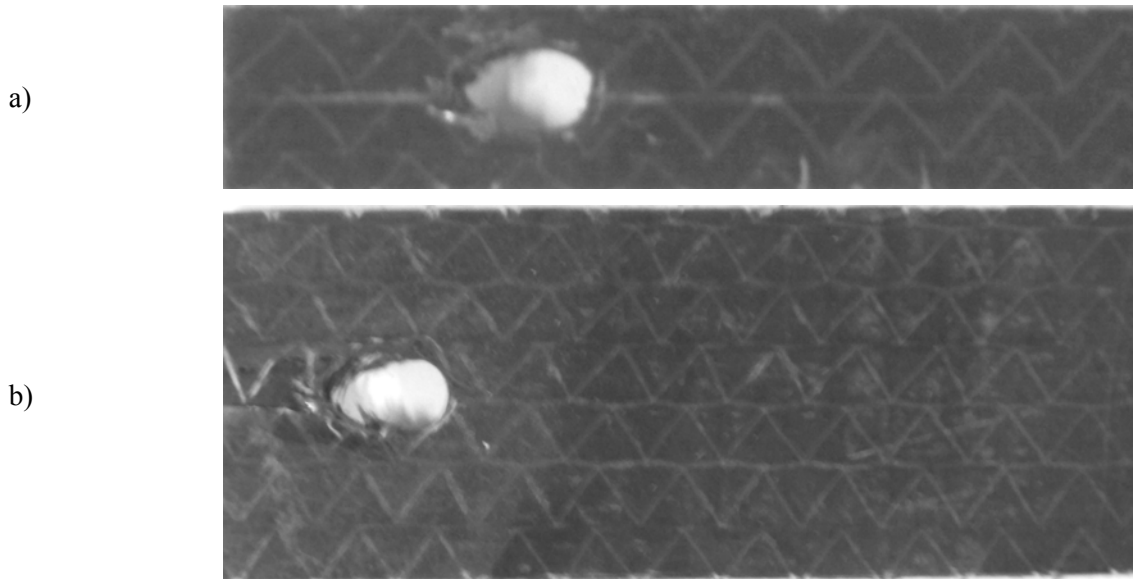
Şekil 6.93. Deney sonrasında $E/D = 3$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.94’de $E/D = 3$ oranı için anti – simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



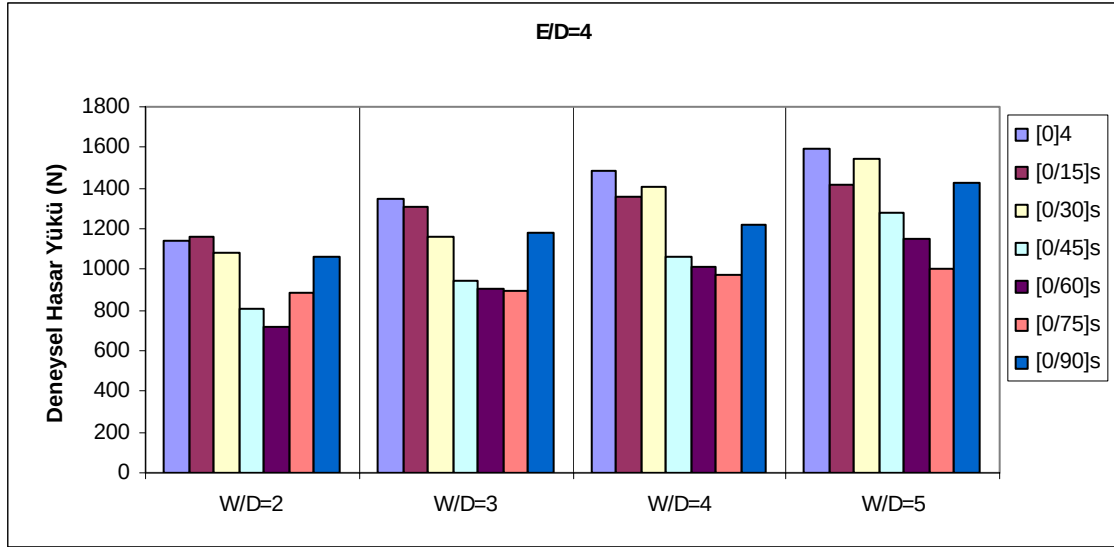
Şekil 6.94. $E/D = 3$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.94 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açılar için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada 670.183 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ/15^\circ]_2$ dizilimine sahip levhada 1509.888 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 3$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak ezilme hasarı görülmüştür. Şekil 6.95’de $[0^\circ/75^\circ]_2$ ve $[0^\circ/15^\circ]_2$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



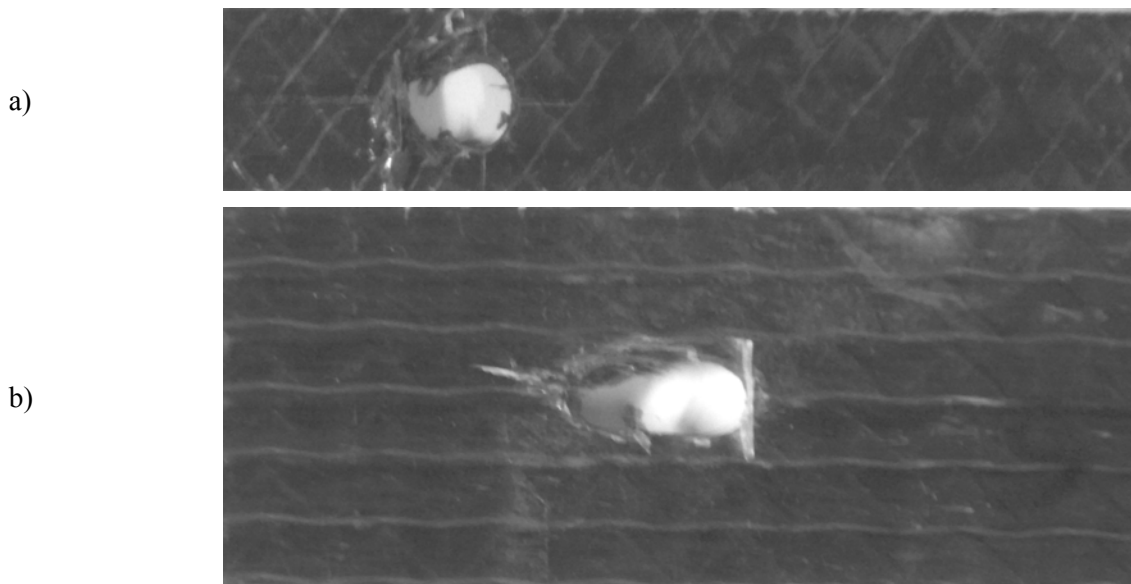
Şekil 6.95. Deney sonrasında $E/D = 3$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.96’da $E/D = 4$ oranı için simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



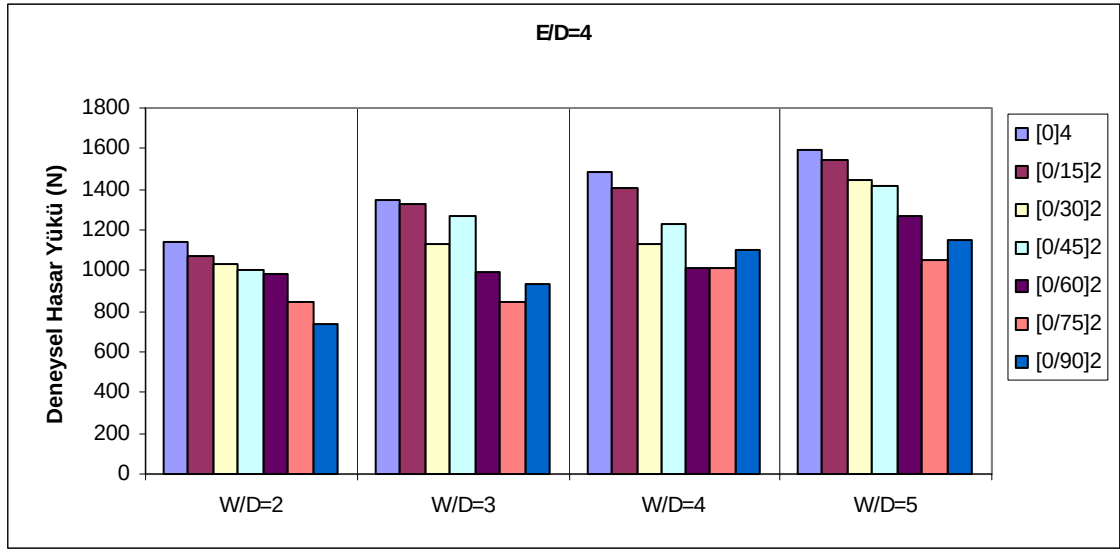
Şekil 6.96. $E/D = 4$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.96 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açı değerleri için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 721.95 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ dizilimine sahip levhada 1590.694 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 4$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak ezilme hasarı görülmüştür. Şekil 6.97’de $[0^\circ/60^\circ]_s$ ve $[0^\circ]_4$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



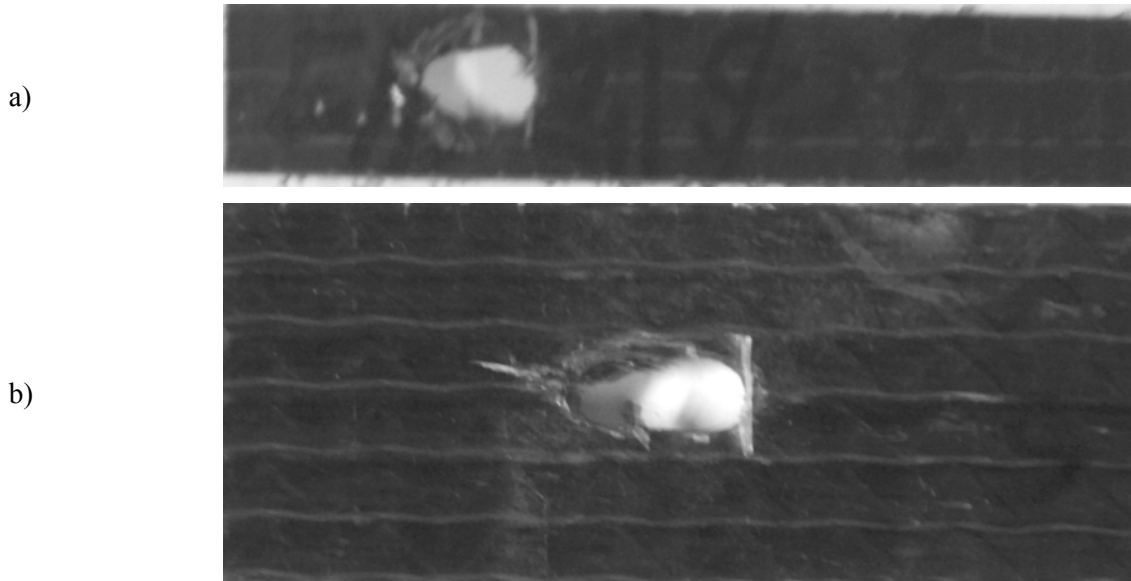
Şekil 6.97. Deney sonrasında $E/D = 4$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.98’de $E/D = 4$ oranı için anti - simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



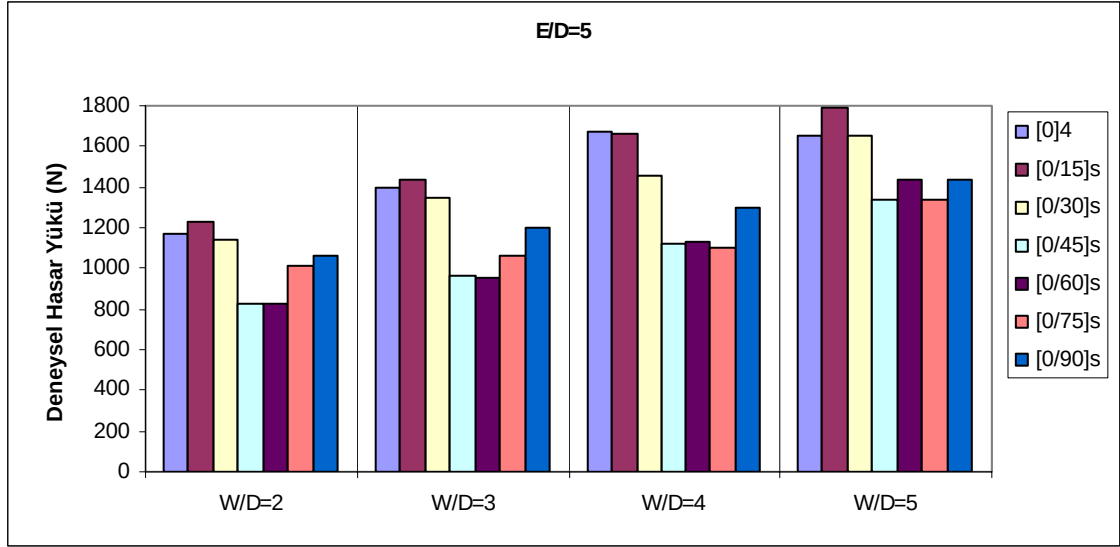
Şekil 6.98. $E/D = 4$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.98 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açı değerleri için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada 742.166 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ dizilimine sahip levhada 1590.694 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 4$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak ezilme hasarı görülmüştür. Şekil 6.99’da $[0^\circ/90^\circ]_2$ ve $[0^\circ]_4$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



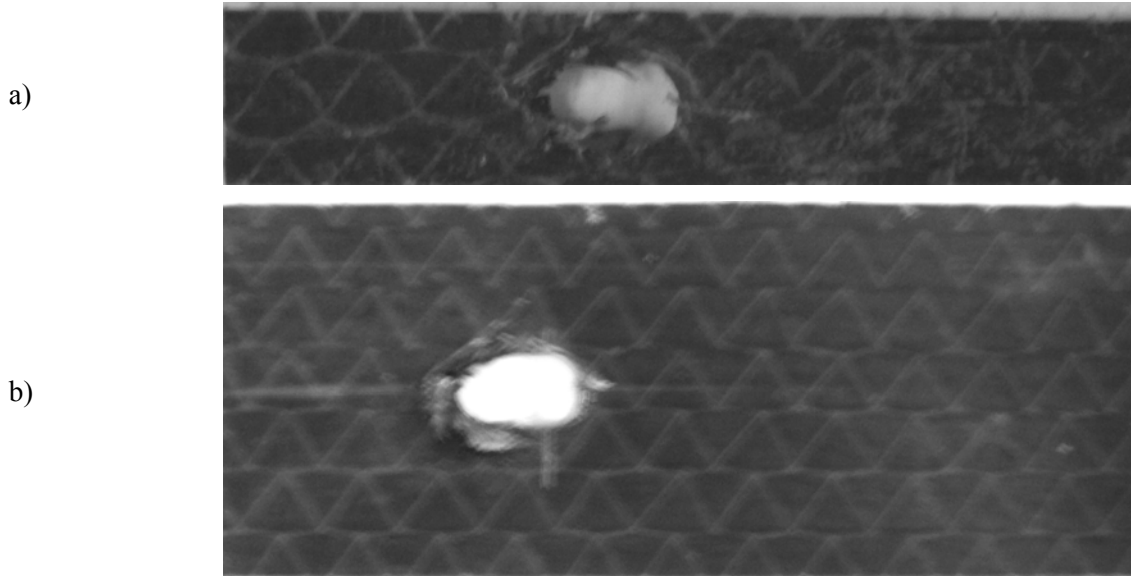
Şekil 6.99. Deney sonrasında $E/D = 4$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.100’de $E/D = 5$ oranı için simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



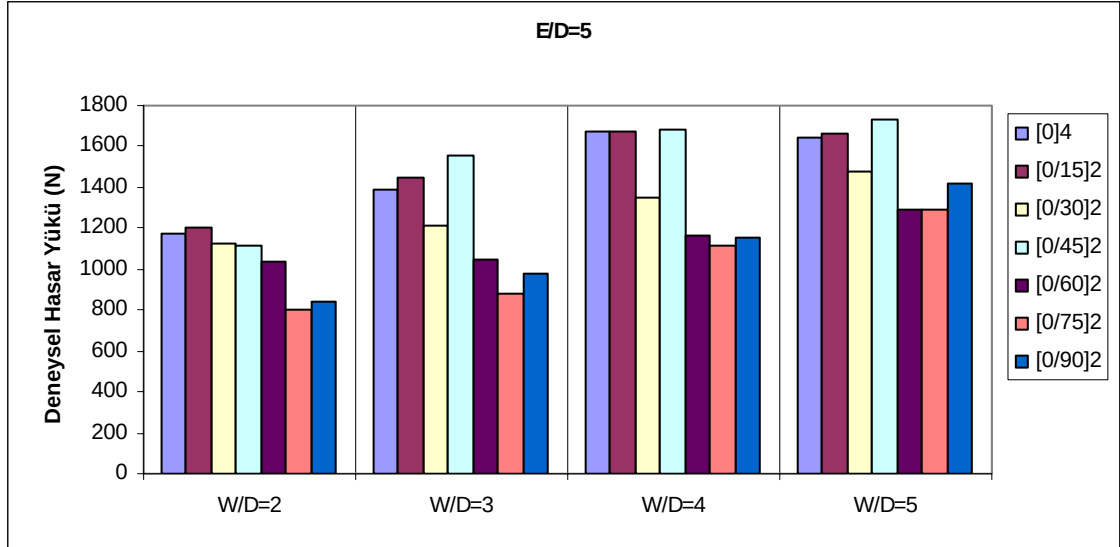
Şekil 6.100. $E/D = 5$ için simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.100 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açı değerleri için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 825.617 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ/15^\circ]_s$ dizilimine sahip levhada 1787.738 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 5$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak ezilme hasarı görülmüştür. Şekil 6.101’de $[0^\circ/60^\circ]_s$ ve $[0^\circ/15^\circ]_s$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



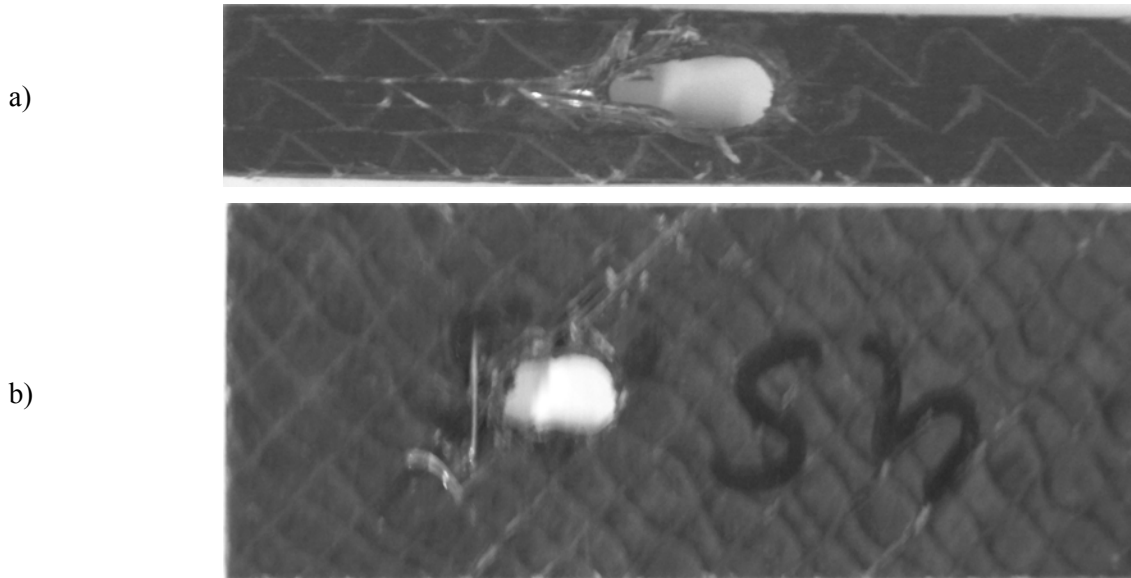
Şekil 6.101. Deney sonrasında $E/D = 5$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levha.

Şekil 6.102’de $E/D = 5$ oranı için anti - simetrik tabaka diziliminde hasar yüklerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ oranlarına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 6.102. $E/D = 5$ için anti - simetrik tabaka dizilimi durumunda hasar yüklerinin fiber takviye açısına göre değişimi grafiği.

Şekil 6.102 incelendiği zaman hasar yüklerinin W/D oranına bağlı olarak tüm açı değerleri için arttığı görülmektedir. En düşük hasar yükü $W/D = 2$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada 805.193 N olarak elde edilmiştir. En yüksek hasar yükü ise $W/D = 5$ için $[0^\circ/45^\circ]_2$ dizilimine sahip levhada 1729.607 N olarak elde edilmiştir. $E/D = 5$ olan deney numunelerinin tamamında hasar tipi olarak ezilme hasarı görülmüştür. Şekil 6.103’de $[0^\circ/75^\circ]_2$ ve $[0^\circ/45^\circ]_2$ numunelerine ait resimler görülmektedir.



Şekil 6.103. Deney sonrasında $E/D = 5$ olmak üzere a) $W/D = 2$ için $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha, b) $W/D = 5$ için $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levha.

6.4. Deneysel Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneyler sonucunda çizilen yük – yer değiştirme grafikleri deney numunelerinde yükleme sonucu meydana gelen hasar yükü değerlerinin elde edilmesine olanak sağladığı kadar hasar tipinin tespitini de sağlamaktadır. Yapılmış olan deneyler sonucunda pim bağlantıları ile ilgili olarak kesme ve ezilme hasarı olmak üzere sadece iki hasar tipinin gözlemlenmesi mümkün olmuştur. Deney maksimum uzama değerine ulaşır sonlandırıldığı zaman numunenin kesme hasarına uğradığının görüldüğü deneylerde yapılan gözlemler neticesinde yük – yer değiştirme eğrisinin bir maksimum değere ulaşmasının ardından dik bir şekilde sıfır değerine doğru indiği ve deneyin sonlandığı görülmüştür. Kesme hasarının görüldüğü tüm numunelerde yük – yer değiştirme eğrisinin karakteristiği bu şekilde olurken ezilme hasarına uğrayan numunelerde durum farklı olmaktadır.

Ezilme hasarı olması durumunda yük – yer değiştirme eğrisinde hasar yüklerinin maksimum bir değere ulaşmasının ardından bir miktar azaldığı daha sonra yaklaşık bir değerde sabit kaldığı ve maksimum uzama değerine bu şekilde ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 6.6). Bazı durumlarda ise numunenin yük – yer değiştirme grafiğinde bir maksimum yük değerine sahip olmasının ardından görülen azalma değeri ve sabit yük değerine karşın artan uzama olması durumunda belirli bir uzama değerinin ardından yüklerin arttığı ve ikinci bir maksimum noktasına ulaştığı görülmüştür. Daha sonra yük değeri azalarak uzama sınırına ulaşılmıştır. (Şekil 6.10) Bu durumlarda numunede ezilme hasarının olduğu tespit edilmiş ve hasar yükü değeri olarak ta maksimum yük değeri kabul edilmiştir.

6.4.1. Geometrik parametrelerin mekanik davranışa etkisi

Numune boyunun ve delik çapının sabit olması durumunda numuneler $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ olarak ve $W/D = 2, 3, 4, 5$ olarak değişmektedir. Deneysel çalışmada geometrik parametre olarak E/D ve W/D oranlarının değişimi göz önüne alınmıştır.

Farklı hasar tiplerinin ortaya çıkmasında en önemli parametre E/D oranının değişimidir. E/D oranının 1 ve 2 olduğu tüm deney numunelerinde hasar tipinin kesme hasarı olduğu ve 3, 4 ve 5 olduğu durumda ise hasar tipinin ezilme hasarı olduğu gözlemlenmiştir. E/D oranının artmasına bağlı olarak aynı fiber takviye açısına ve tabaka dizilimine sahip numunelerde hasar yükleri artmıştır.

Hasar yüklerinin değişimi sabit E/D oranına göre incelendiği zaman W/D oranının artmasına bağlı olarak hasar yüklerinin arttığı görülmektedir. W/D oranının dolayısı ile plaka genişliğinin artması durumu, fibere dik doğrultuda zayıf olan mukavemet değerinin genişliğin artmasına bağlı olarak genel malzeme mukavemetine etkisini azaltmaktadır. E/D oranının en

düşük değeri almasına karşın W/D değerinin en yüksek değerde olması durumunda hasar yüklerinin değişmesine karşın hasar tipinin değişmemesi hasar tipi üzerine W/D değişiminin etkili olmadığını göstermektedir.

6.4.2. Fiber takviye açısı ve tabaka diziliminin mekanik davranışa etkisi

Fiber takviye açısının değişiminin hasar tipinin belirlenmesi açısından etkili bir parametredir. Yapılmış olan çalışmada seçilen fiber takviye açısının $[0/\theta]_2$ olarak belirlendiği için tüm levhalarda 0° fiber takviye açısının olması hasar tiplerinin değişimi üzerine fiber takviye açısının etkisini önemli oranda sınırlandırmıştır. Fiber takviye açısının değişiminin hasar yükleri üzerinde farklı hasar tipleri için değişik etkilere neden olduğu yapılan deneyler sonucunda görülmüştür.

E/D= 1 oranına göre W/D oranının değişimlerinin yer aldığı Şekil 6.82 ve 6.83'teki grafiklerde fiber takviye açısının etkisi net bir şekilde görülmektedir. Tüm fiber takviye açıları için kesme hasarının elde edildiği deney sonuçlarında fiber takviye açısının 0° 'den 90° 'ye artmasına paralel olarak bir artma görülmektedir. Değerlerdeki artmanın pimin levhaya basma uyguladığı bölgede yer alan fiberlerin kesme hasarına engel olacak şekilde yerleşmiş olmalarından dolayı meydana geldiği söylenebilir. θ fiber takviye açısı değerinin 0° 'den 45° 'ye değişimi durumunda hasar yükleri yaklaşık olarak sabit kalırken, 45° 'den 90° 'ye hasar yüklerinde meydana gelen artma bu yaklaşımın doğruluğunu göstermektedir. Simetrik tabaka dizilimine sahip levhalarda bu durum net bir şekilde gözlemlenebilirken anti simetrik tabaka dizilimine sahip levhalarda hasar yükleri genel olarak aynı durumu göstermekle birlikte oldukça yakın değerlerin deney sonucunda elde edildiği görülmektedir.

E/D= 2 olduğu durumda fiber takviye açısının değişiminin etkisinin E/D= 1 olduğu durumdan farklı olmaktadır. Pimin levha üzerinde etkilediği bölgenin artmasından dolayı hasar tipi olarak kesme hasarı öncesinde gelişen ezilme hasarı ile bir arada gerçekleşmiştir. Yükleme eksenine daha yakın olan 0° ile 45° arasında yer alan θ değerleri için özellikle anti simetrik tabaka diziliminde bir artma meydana gelirken simetrik tabaka diziliminde durum çok fazla değişmemiştir.

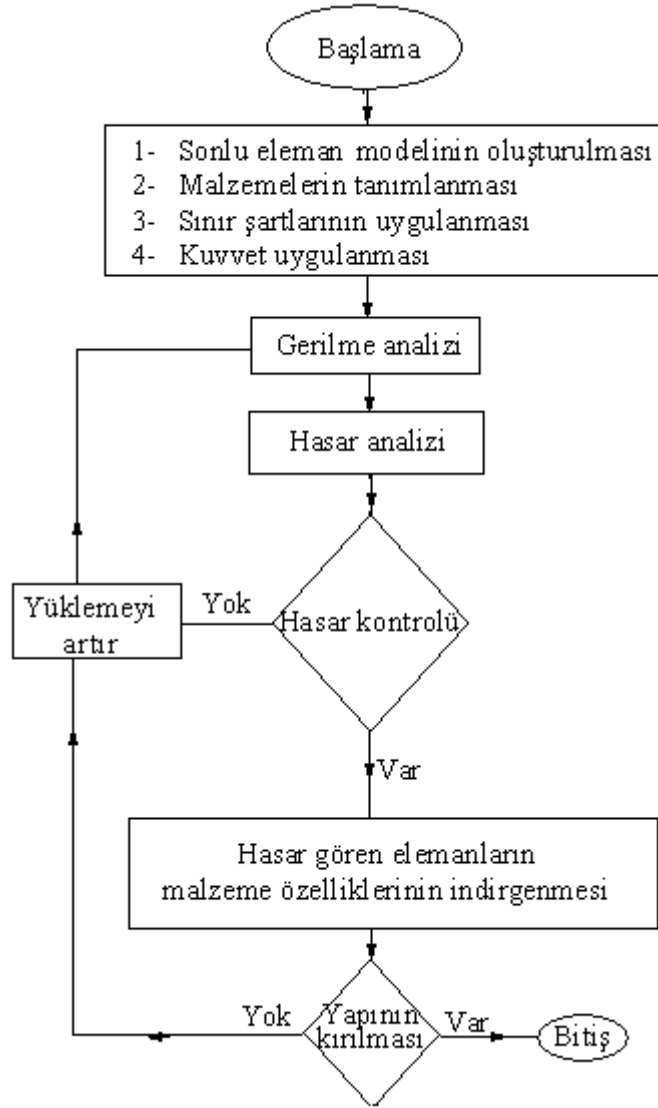
E/D= 3, 4 ve 5 oranına sahip tüm W/D oranlarında, farklı fiber takviye açıları ve tabaka dizilimleri için deneyler sonucunda levhaların ezilme hasarına uğradığı görülmüştür. Yükleme eksenine paralel $\theta= 0^\circ$ açısına sahip levhalarda hasar yükleri en yüksek değerde olmasına karşın θ değerinin 90° ye kadar değişen açı değerlerindeki hasar yüklerinin düştüğü görülmektedir. Ezilme hasarının görüldüğü bu numunelerde fiberlerin pimin basınç uyguladığı yüzeye dik olmasının yanı sıra özellikle $[0^\circ/15^\circ]_2$ simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimine sahip levhada

en büyük hasar yükleri elde edilmiştir. En düşük hasar yüklerinin $[0^\circ/75^\circ]_2$ simetrik ve anti simetrik dizilime sahip levhalarda görülmesine karşın $[0^\circ/90^\circ]_2$ simetrik ve anti simetrik dizilime sahip levhalarda ise hasar yükleri yeniden yükselmiştir. Bu durumun nedeni yükleme uygulanan yüzeyde yükleme eksenine tam dik doğrultuda matrikslerin kırılmasına rağmen içlerinde yer alan fiberlerin kırılmaya engel olması ve fiberlerin kırılmadan ezilmesinden dolayıdır.

7. ÇÖZÜLEBİLİR BAĞLANTILI TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ SAYISAL ANALİZİ

Bu bölümde çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının sayısal analizi sonlu elemanlar metodu kullanılarak Ansys paket programında üç boyutlu olarak incelenmiştir. Çözülebilir bağlantı türü olarak çift tesirli pim bağlantısı kullanılarak deneysel çalışmalar yapıldığı için sayısal modellemelerde de Şekil 6.1’de gösterilmiş olan aynı bağlantı türü kullanılmıştır. Ansys programında sayısal çalışmanın yapılabilmesi için APDL kodları kullanılarak yazılmış olan program kullanılmıştır. Pim bağlantılarının sayısal analizleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelendiği zaman sayısal çözüm metodu olarak hasar analizi kullanıldığı görülmektedir [1-49]. Literatürde yer alan çalışmalarda sayısal çözümleme yapılırken genellikle sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda araştırmacı tarafından geliştirilmiş olan bilgisayar programları kullanılırken [4,7,20,43], birçok araştırmacı Ansys, Lusas ve Abaqus gibi ticari amaçla yazılmış olan ve sonlu elemanlar metodunu kullanan programlar kullanılmıştır [1,3,10,12,14,16,19,34,35,37]. İki ve üç boyutlu olarak yapılmış olan modellemelerde genellikle takip edilen yol Şekil 7.1’ de akış şeması verilmiş olan yöntemdir.

Bu çalışmada üç boyutlu modelleme yapılarak deneysel çalışma şartlarına en yakın çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. İzlenen yöntem Şekil 7.1’ den görülen akış şemasına uyacak şekildedir. İlk olarak katı cismin sonlu elemanlar modeli oluşturularak gerekli sınır şartları uygulanmıştır. İkinci adımda gerilme analizi yapılmış ve her bir eleman için elde edilen gerilme değerleri tablolar halinde kaydedilmiştir. Son adımda ise Hashin hasar kriteri kullanılarak elemanda meydana gelmiş olan hasarın türüne göre malzeme özellikleri indirgenmiş ve son hasar yüküne ulaşılması durumunda program sonlandırılmıştır.



Şekil 7.1. Sayısal çözümleme akış diyagramı [1, 2, 10, 19].

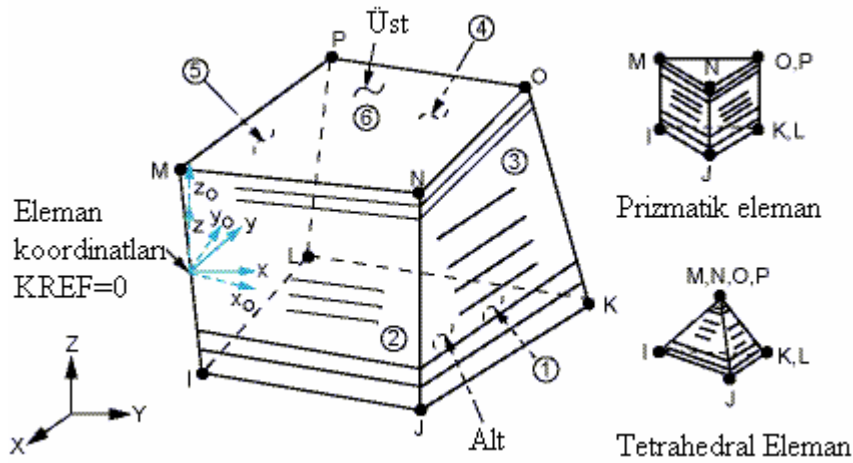
7.1. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerin sonlu elemanlar modelinin Ansys programında modellenmesi aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılmıştır:

1. Kullanılacak sonlu eleman tipinin programa girilmesi.
2. Katı cismin oluşturulması.
3. Malzeme özelliklerinin programa girilmesi.
4. Katı cismin sonlu elemanlara bölünmesi.
5. Sınır şartlarının oluşturulması ve yüklemelerin yapılması.

6. Her bir elemana ait gerilme bileşenlerinin hesaplanması.
7. Hashin hasar kriterine göre o elemana ait hasar kontrolünün yapılması.
8. Eğer hasar varsa o elemana ait malzeme indirgemesinin yapılması.
9. Yıkıcı hasar yükünün son elemana ulaşmaması halinde yükün artırılarak 5. maddeye dönülmesi.
10. Yıkıcı hasar yükünün son elemana ulaşması halinde programın durdurulması.

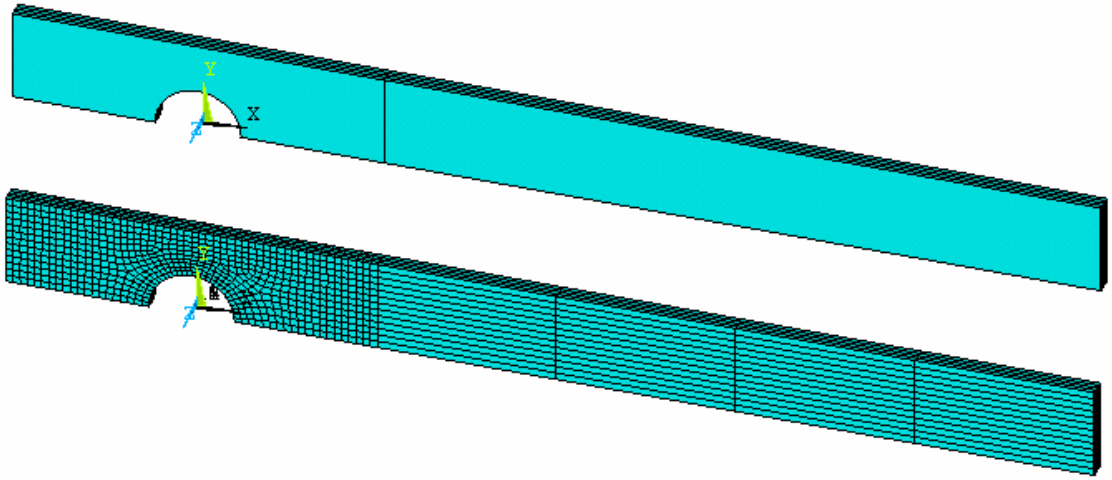
Sayısal analiz için Ansys programında sonlu eleman tipi olarak üç boyutlu tabakalı malzemeler için tanımlanmış olan Solid 46 elemanı kullanılmıştır. Solid 46 elemanı farklı fiber takviye açısına sahip en çok 250 tabakanın oluşturulabileceği üç boyutlu modellemelerde kullanılmaktadır [61]. Şekil 7.2’de Solid 46 elemanı ve modellemede tabakaların yerleştirileceği koordinat sistemi görülmektedir.



Şekil 7.2. Katı modelin sonlu elemanlara bölünmesi için kullanılan Solid 46 elemanı [61].

Katı cisim oluşturulurken farklı fiber takviye açısına sahip her bir tabaka için bir hacim oluşturulmuştur. Tabakaların bir arada bütün oluşturabilmeleri için ortak yüzey alanlarını paylaşmaları sağlanmıştır. Bu şekilde farklı tabakaların bir araya gelmesi ile oluşan yapı tek bir hacim içerisinde tabakalı kompozit malzemeye benzer bir şekilde farklı hacimlerden oluşmaktadır (Şekil 7.3). Modellemede simetriklikten dolayı fazla eleman kullanılabilmesi ve çözüm süresini kısaltabilmek amacı ile yarım model kullanılmıştır. Katı cisim oluşturulduktan sonra mekanik testlerle tespit edilmiş olan malzemenin mekanik özellikleri (elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı) ve hasara uğradıkları yük değerleri (fiber doğrultusunda çekme hasar yükü, fibere dik doğrultuda çekme hasar yükü vb.) programa girilerek mekanik davranışı belirlenmiştir. Katı cisim sonlu elemanlara bölünürken Şekil 7.3’de görüldüğü gibi rastgele

dağılımlı elemanlar kullanılmıştır. Özellikle rastgele dağılımlı elemanlar kullanılmasının sebebi hasar analizi yapılırken elemanlarda meydana gelecek olan hasarın belirli bir doğrultuda yönlendirilmesini engellemektir. Sınır şartlarının programa girilmesi sayısal çalışmanın en önemli noktalarından biridir. Sınır şartları problemin sayısal çözümünün ve probleme yaklaşım şeklinin belirlenmesinde en gerçekçi modellemelerin yapılabilmesi için gereklidir. Modelde analiz için hassas olmayan pim deliğine uzak bölgelerdeki elemanlar büyük, hassas bölgeler ise daha sık elemanlar kullanılarak sonlu elemanlara bölünmüştür.



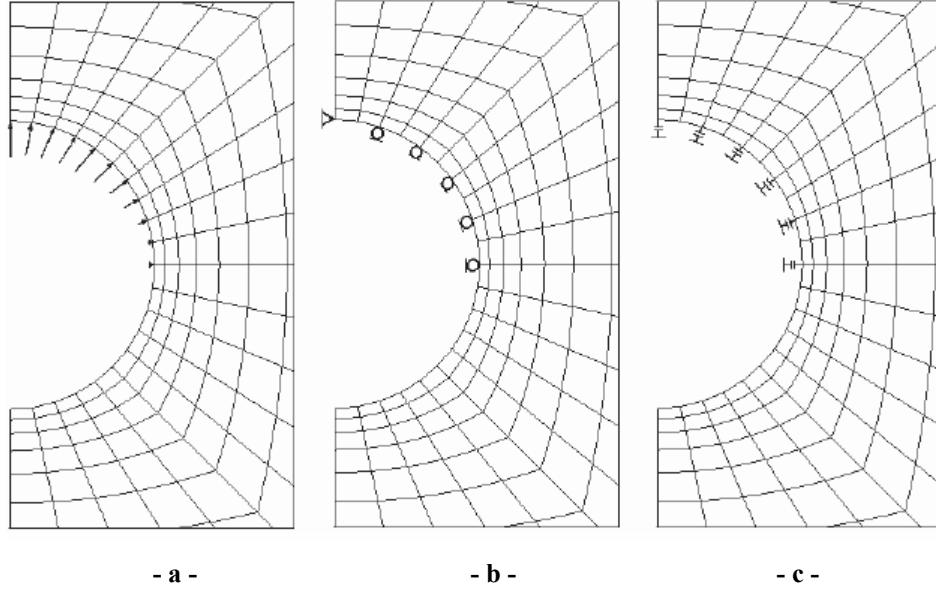
Şekil 7.3. E/D ve W/D=2 için katı model ve sonlu elemanlara bölünmüş olan model.

7.1.1. Sonlu elemanlar modelinde sınır şartlarının uygulanması

Çözülebilir bağlantılı kompozit plakaların çözümünde en önemli sınır şartı pimin modellenmesidir. Literatürde yer alan çalışmalarda pimin modellenmesi için başlıca üç farklı çözüm yolu mevcuttur:

1. Pimin katı cisim olarak modellenmesinin yerine, pimin temas ettiği kompozit levha delik kenarına etkiyeceği basınç kuvvetini kosinüsoidal yük dağılımı olarak uygulanması [1, 2, 4, 10, 25, 33] .
2. Pimin katı cisim olarak modellenmesinin yerine radyal sınır şartı kullanılarak pimin temas ettiği plaka delik yüzeyi etrafındaki elemanların normali doğrultusunda yer değiştirmelerin olmadığı kabulüyle modelleme yapılması [9, 10, 13, 17, 18, 19, 29, 47, 50, 53] .
3. Pimin katı cisim olarak modellenerek pim ile plaka arasındaki yüzeyin temas (kontak) elemanları kullanılarak modellenmesi [1, 3, 19, 26, 36, 37, 42].

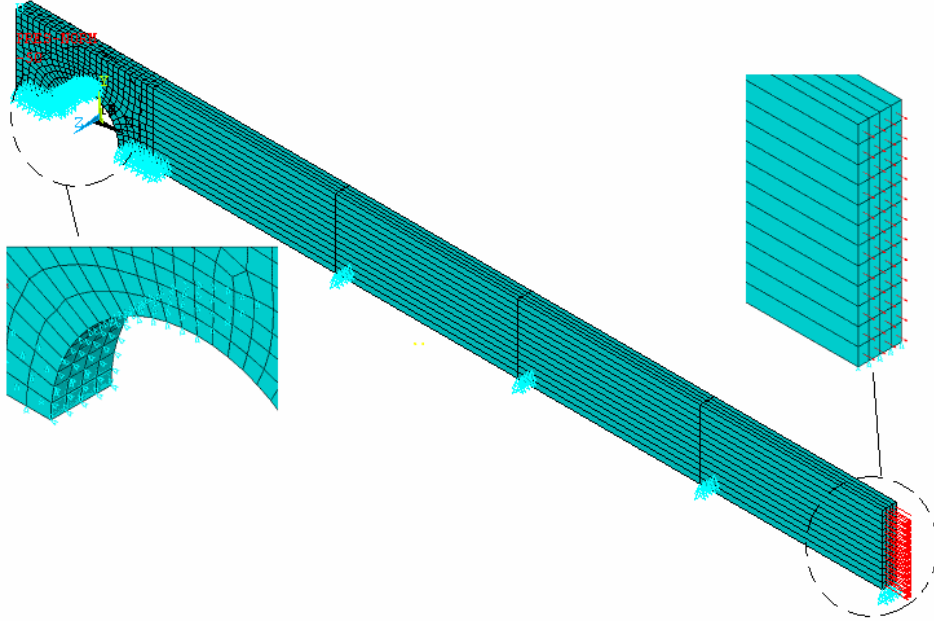
Şekil 7.4’de pim deliğine farklı yöntemlerle uygulanan sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Pim ile plaka arasındaki bağlantının modellendiği üç farklı durum, a) Kosinüsoidal yük dağılımı metodu, b) Radyal sınır şartı modeli, c) Temas elemanları ile modellemenin yapılması [10].

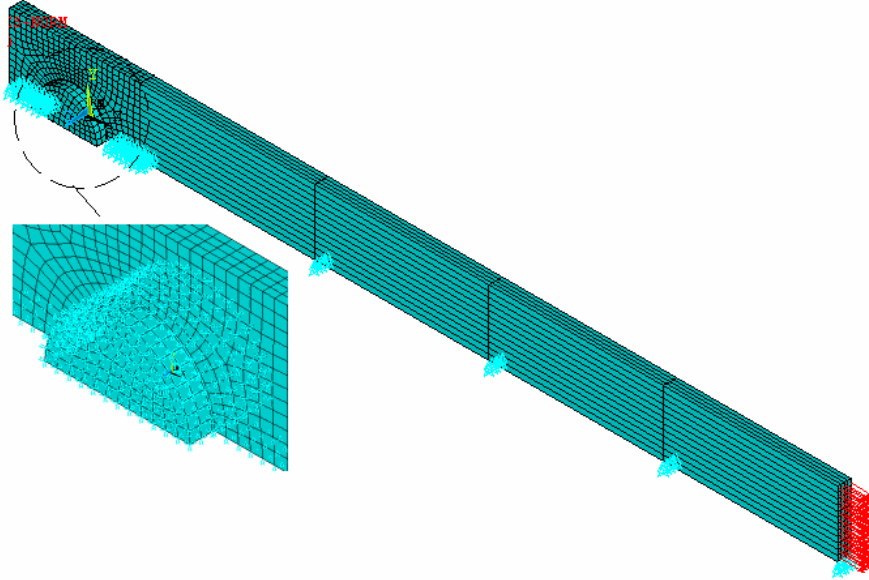
Birinci yöntem ile yapılan modellemede diğer iki yöntemden farklı olarak pim deliğine yük uygulanarak plaka uzun kenarından sabitlenmektedir. Sayısal analiz programları kullanılarak yapılan modellemeler ile yapılan çözüm yönteminde çok tutarlı sonuçlar elde edilememektedir. Radyal sınır şartlarının ve kontak modelinin kullanıldığı sayısal modellerden kosinüsoidal yük dağılımı metoduna göre daha uyumlu sonuçlar elde edilmektedir [10].

Şekil 7.5’de radyal sınır şartının uygulandığı sonlu eleman modeli görülmektedir. Radyal sınır şartının kullanıldığı yarım modelde levhanın kesilen yüzeyleri için sınır şartı olarak Ansys programının içerisinde bulunan simetri sınır şartı kullanılmıştır.



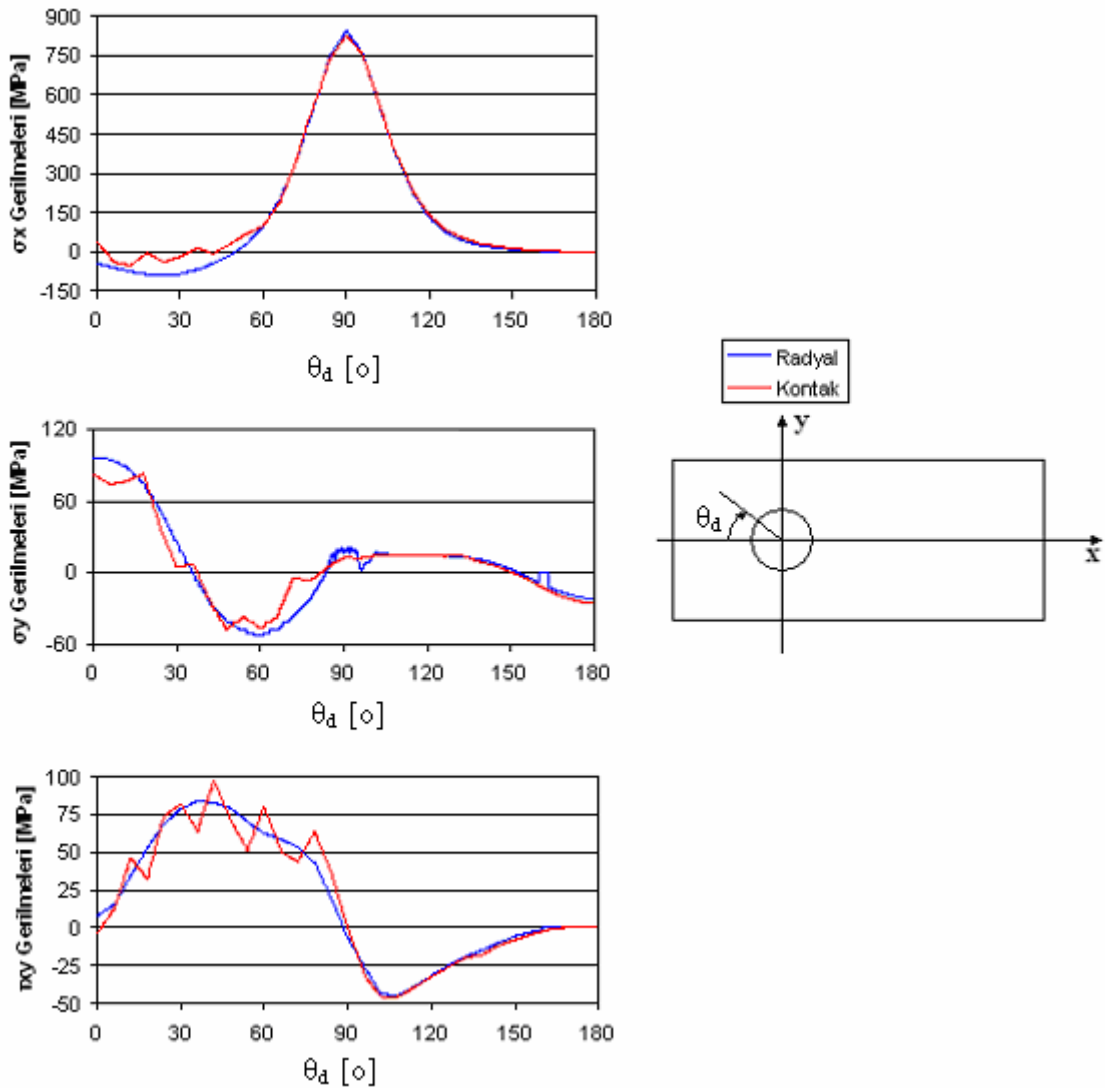
Şekil 7.5. Radyal sınır şartlarının kullanıldığı sonlu eleman modeli.

Şekil 7.6’da temas elemanları kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli görülmektedir. Temas durumu Ansys programında pim ile delik yüzeyleri yüzey – yüzey teması şeklinde modellenmiştir. Ansys programında temas modellemesi yapılırken öncelikle katı model sonlu elemanlara bölünür, daha sonra temas yüzeyleri seçilerek ikinci bir bölmeleme işlemi temas elemanları ile gerçekleştirilir. İkinci bölmeleme işlemi neticesinde birbiri ile temas durumundaki yüzeyler Targe 170 ve Conta 174 elemanları ile yeniden tanımlanır.



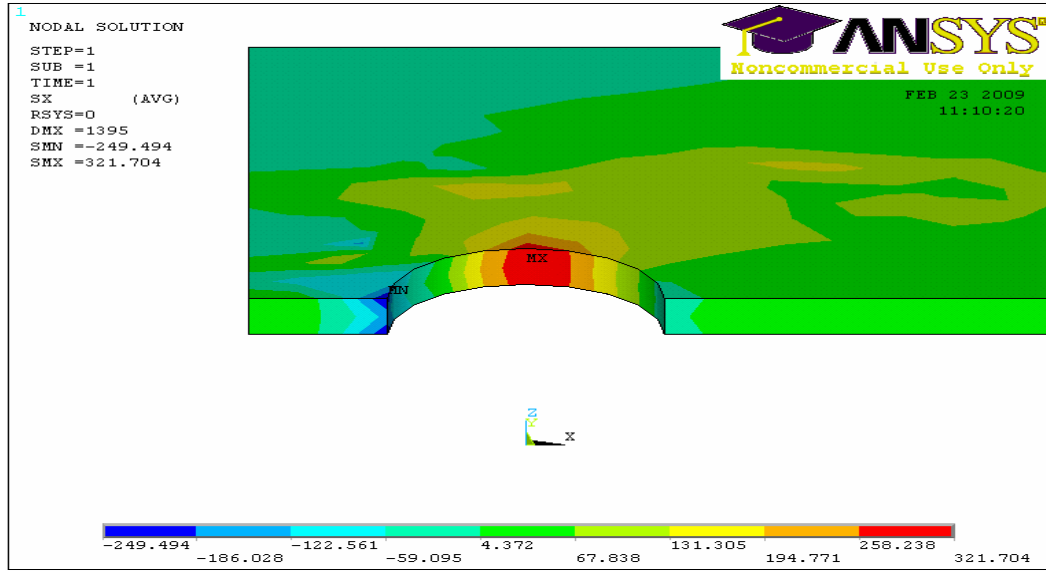
Şekil 7.6. Temas modellemesi yapılarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli.

Temas modellemesi ile problemin çözümü lineer olmayan bir çözüm metodudur ve çözümü oldukça uzun zaman almaktadır. Çözüm sırasında elde edilen sonuçlar program tarafından yakınsama testine tabi tutularak elde edilir. Yakınsama testi için Newton – Raphson iterasyon metodu kullanılmaktadır. Problemin en gerçekçi sayısal çözümü temas modellemesi ile sağlanmasına rağmen radyal sınır şartı kullanılarak yapılan çözümlerin temas modellemesine oldukça yakın olması sebebi ile araştırmacıların oldukça sık bir şekilde başvurdukları bir çözüm yöntemidir. Şekil 7.7’de pim modeli olarak radyal sınır şartı metodu ve kontak analiz metodu kullanılarak modellenmiş iki farklı modellenmiş levhada gerilmelerin pimin temas ettiği delik yüzeyi boyunca değişimi incelenmiştir.

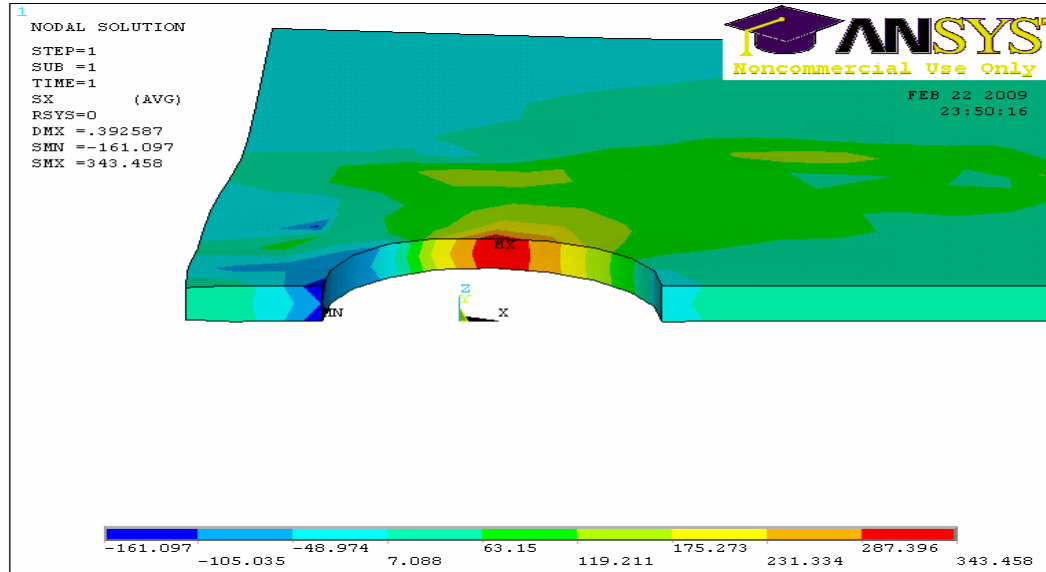


Şekil 7.7. $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip numunenin $E/D=1$, $W/D=2$ geometrik parametreleri için 200 MPa gerilme yükü altında delik çevresindeki düğümlerde gerilmelerin değişimi.

Şekil 7.7’de θ_d ; delik etrafındaki açının değişimidir. Şekildeki grafikler incelendiği zaman radyal sınır şartlarının kullanılması durumunda delik etrafında ortaya çıkan gerilme dağılımının düzgün bir değişime sahip olduğu görülmektedir. Gerilme analizi Şekil 7.1’de gösterilmiş olan akış şemasına göre çözülebilir bağlantılı kompozit malzemelerin mekanik davranışların analizini yaparken oldukça önemli bir yere sahiptir. Şekil 7.8’de radyal sınır şartı ve Şekil 7.9’de kontak elemanlar kullanılarak gerilme analizi yapılmış olan pim bağlantılı tabakalı kompozit levhaya ait renk dağılımlı grafikler görülmektedir.



Şekil 7.8. Radyal sınır şartı kullanılarak modellenmiş olan pim bağlantılı tabakalı kompozit levhada σ_x (MPa) gerilmelerinin dağılımı.

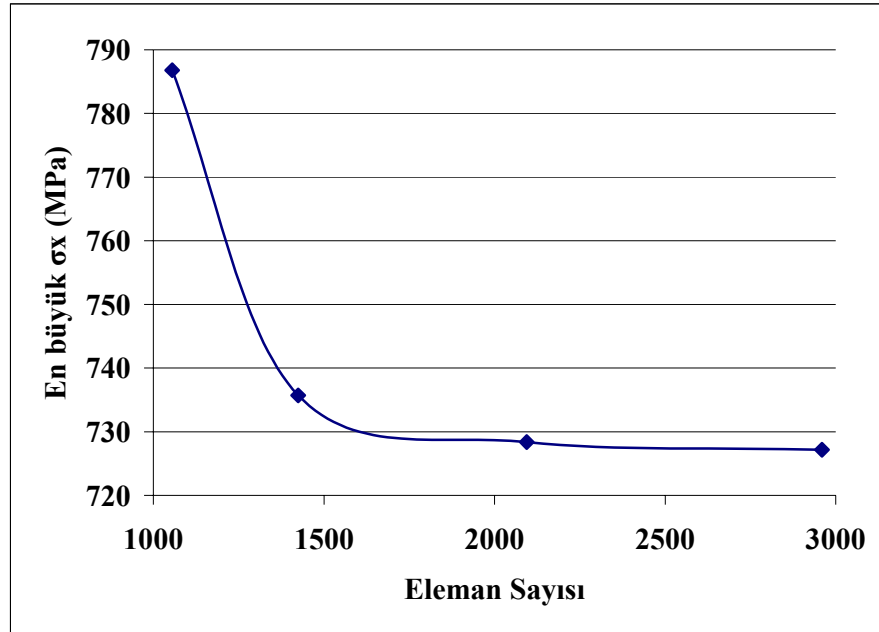


Şekil 7.9. Kontak elemanlar kullanılarak modellenmiş olan pim bağlantılı tabakalı kompozit levhada σ_x (MPa) gerilmelerinin dağılımı.

Şekil 7.7, Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 incelendiği zaman en büyük gerilme değerlerinin elde edildiği bölge ve yük dağılımındaki benzerlik nedeni ile temas modellemesi yerine problemin çözümü için radyal sınır şartı metodunun kullanılması daha uygundur. Bu nedenle de sayısal modellemede pimin kompozit levhaya teması radyal sınır şartı metodu kullanılarak yapılmıştır.

7.2. Çözülebilir Bağlantılı Tabakalı Kompozitlerde Gerilme Analizi

Gerilme analizi sayısal çalışmada kullanılacak bir yöntem olan ilerlemeli hasar analizinden uygun sonuçlar elde edilebilmesi için oldukça önemlidir. Bağlantı elemanının kullanılması, levha üzerine açılmış olan delik gerilme yığılmalarını arttıracığından delik etrafındaki gerilmelerin incelenmesi de bu nedenle önem kazanmaktadır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde kullanılan eleman ve düğüm sayıları çözümün hassasiyet değerini etkilemektedir. Tutarlı bir çözüm elde edebilmek için katı cismin mümkün olduğu kadar çok sonlu elemana bölünmesi gereklidir. Eleman sayısının dolayısı ile düğüm sayısının arttırılarak tekrar edilen çözümden elde edilen sonuçların farklılık göstermediği noktada artık daha fazla eleman kullanılması gereksizdir. Bu amaçla sonlu elemanlara bölünen katı cisimde sistem içinde meydana gelen σ_x gerilmesinin maksimum değeri referans alınarak çözüm, eleman sayısı arttırılarak tekrarlanmıştır. Sonuçta eleman sayısına karşılık elde edilen en büyük σ_x gerilmesi değerleri ile çizilen grafik Şekil 7.10’da gösterilmiştir.



Şekil 7.10. E/D = 1 ve W/D = 2 geometrik parametrelerine sahip $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabaka dizilimi için 200 MPa gerilme değeri ile yüklenmesi durumu için en büyük σ_x gerilmelerine karşılık eleman sayısının değişimi.

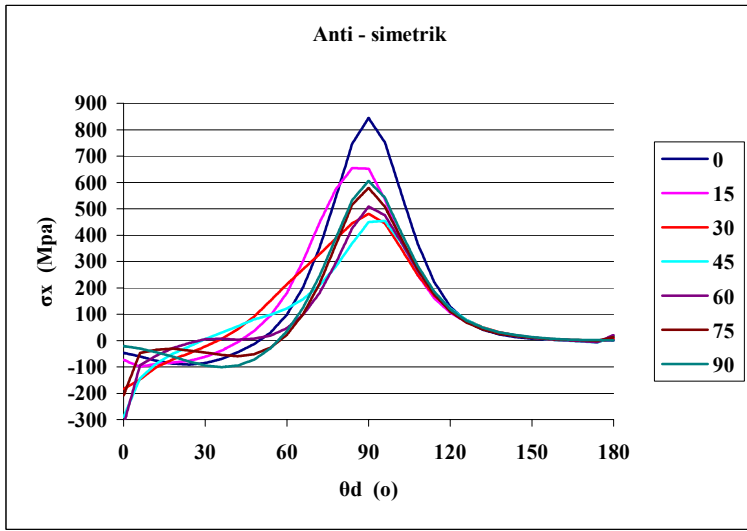
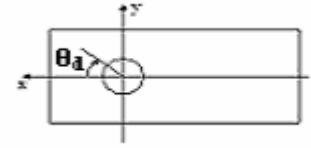
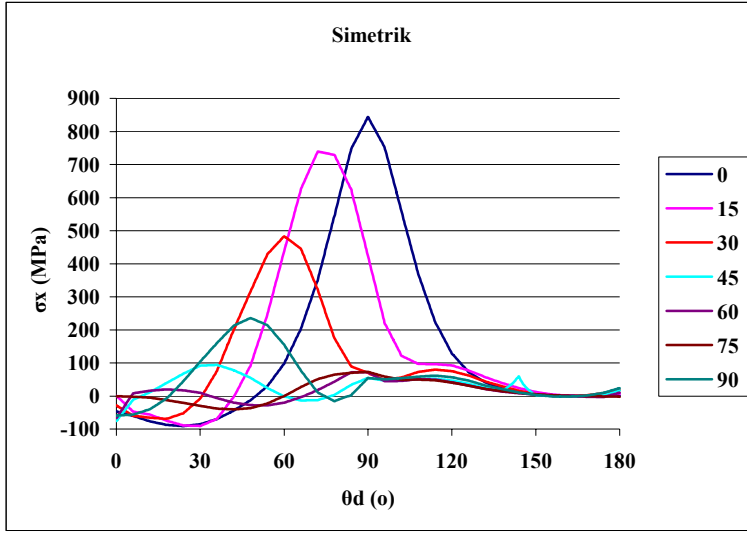
Şekil 7.10'daki durum göz önüne alınarak eleman sayısı 2095 olan model çözümde kullanılmıştır. Çözümde yarım model kullanılarak kesilen bölümlere simetri sınır şartı uygulanmıştır ve pimin kompozit levha ile teması radyal sınır şartı kullanılarak yapılmıştır. Eleman sayıları model geometrisine göre değişmektedir. Her bir modelin çözümünde Şekil 7.10'da görülen grafiğin çiziminde tespit edilmiş olan yöntem kullanılarak Tablo 7.1'deki eleman sayıları kullanılmıştır.

Tablo 7.1. Sayısal çözümde kullanılan modellerin sonlu eleman sayılarının geometrik parametrelere göre değişimi tablosu (D = 6 mm).

Geometrik parametreler	E/D=1	E/D=2	E/D=3	E/D=4	E/D=5
W/D=2	2095	2916	4244	5124	6976
W/D=3	2308	4504	6436	8348	10296
W/D=4	3032	5648	8424	11116	13428
W/D=5	3720	7480	10816	13948	17432

7.2.1. Pim deliği etrafında fiber takviye açısı değişimine bağlı olarak gerilme analizi

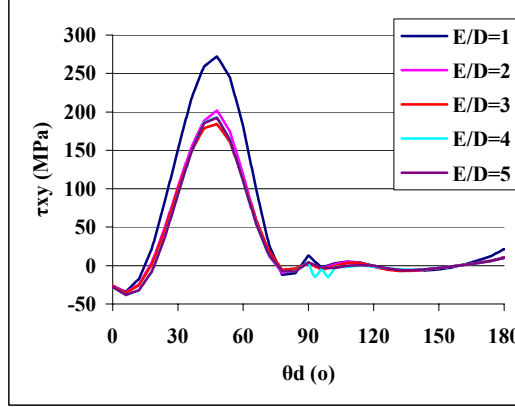
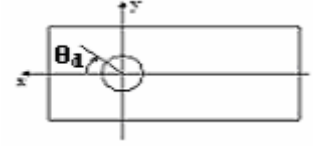
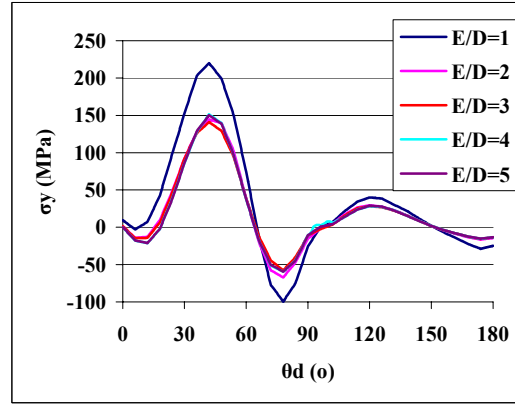
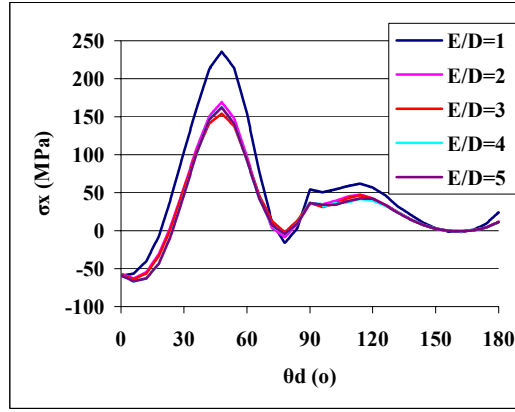
Şekil 7.11'de fiber takviye açısının değişimine bağlı olarak σ_x gerilmelerinin simetrik ve anti-simetrik tabaka dizilimleri için karşılaştırılmaları görülmektedir. Grafikte σ_x gerilmelerin en büyük değeri simetrik ve anti-simetrik dizilimin her ikisi için de 844.18 MPa değeri ile $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip levhada meydana gelirken simetrik dizilim için en düşük gerilme değeri -75.868 MPa ile $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada ve anti-simetrik dizilim için -290.040 MPa değeri ile $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada meydana gelmiştir.



Şekil 7.11. $E/D=1$ $W/D=2$ değerleri için simetrik ve anti-simetrik tabaka dizilimli levhanın, pim deliği etrafındaki bölgede σ_x gerilme değerlerinin değişimi grafiği.

7.2.2. Pim deliği etrafında E/D oranının değişimine göre gerilme analizi

Bu bölümde $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ değişimine göre $W/D=2$ için σ_x , σ_y ve τ_{xy} gerilmelerinin değişimleri incelenmiştir. Şekil 7.14'deki grafiklerde gerilmelerin E/D oranına göre değişimi görülmektedir.

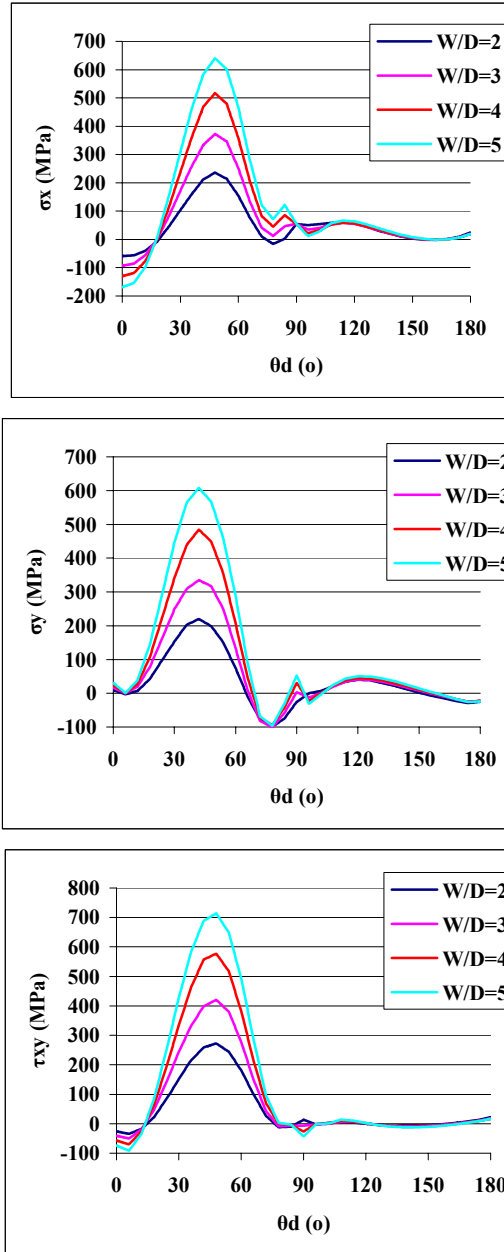


Şekil 7.12. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 370.5 N yük altında $W/D = 2$ için E/D oranının değişiminin gerilmelere etkisi.

Şekil 7.12'den görüldüğü gibi $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada E/D oranının değişimi ile tüm gerilme bileşenlerinin en büyük değerleri θ_d açısının 45° 'lik değeri için elde edilmiştir. Gerilme değerleri ise E/D oranının artmasına bağlı olarak düşüş göstermiş ve pim deliğinin sağ tarafında (radyal sınır şartı uygulanmamış bölge) yaklaşık olarak 0 MPa değerini almışlardır. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada E/D oranının değişimi ile σ_x gerilmelerinin en büyük değeri 230.19 MPa, σ_y gerilmelerinin en büyük değeri 215.77 MPa ve τ_{xy} gerilmelerinin en büyük değeri ise 269.54 MPa olarak gerçekleşmiştir.

7.2.3. Pim deliği etrafında W/D oranının değişimine göre gerilme analizi

Bu bölümde $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada $W/D = 2, 3, 4, 5$ değişimine göre $E/D=1$ için σ_x , σ_y ve τ_{xy} gerilmelerinin değişimleri incelenmiştir. Şekil 7.13'deki grafiklerde gerilmelerin W/D oranına göre değişimi görülmektedir.



Şekil 7.13. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada 370.5 N yük altında $E/D = 1$ için W/D oranının değişiminin gerilmelere etkisi.

Şekil 7.13'den görüldüğü gibi $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada W/D oranının değişimi ile tüm gerilme bileşenlerinin en büyük değerleri E/D oranının değişimine benzer şekilde θ_d açısının 45° 'lik değeri için elde edilmiştir. Tüm gerilme bileşenleri W/D oranının artışına bağlı olarak artmış ve W/D= 5 için en büyük değerine ulaşmıştır. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabaka dizilimine sahip levhada E/D oranının değişimi ile σ_x gerilmelerinin en büyük değeri 632.59 MPa, σ_y gerilmelerinin en büyük değeri 597.46 MPa ve τ_{xy} gerilmelerinin en büyük değeri ise 713.97 MPa olarak gerçekleşmiştir.

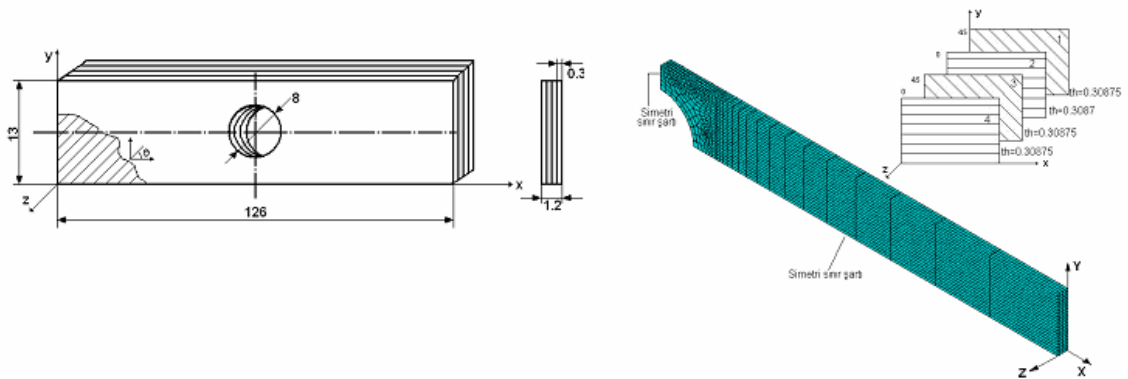
7.3. Tabakalı Kompozitlerde İlerlemeli Hasar Analizi

Çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit levhaların hasar analizi Şekil 7.1'de akış diyagramı verilen metoda göre yapılmıştır. İlerlemeli hasar analizi adı verilen bu metoda göre hasar başlangıcı ve yayılması 4. Bölümde bağıntıları verilmiş olan Hashin hasar teorisi ve Tablo 4.1'de verilmiş olan malzeme indirgeme kuralları göz önüne alınarak yazılmış olan APDL kodları ile Ansys 11.0 programında sayısal olarak modellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sayısal modelde hasarın başlangıcı ve yayılması çatlak başlangıcı ve yayılmasına benzer bir düşünce ile yapılmıştır. Sayısal modelde fiziksel bir çatlak yerine elemanın mekanik özelliklerinin zayıflatılması esasına dayanan bir çatlak oluşumu kullanılmıştır. Sayısal modelde yapılan gerilme analizi neticesinde hasar kontrolü sonucu hasara uğradığı kabul edilen elemanın mekanik özelliklerinin zayıflatılarak model üzerinde yok edilmesi dolayısıyla da hasar bölgesi etrafında bir tür geometrik süreksizlik (çatlak, çentik vb.) etkisi oluşturulmuştur. Gerilme analizini takip eden hasar analizi için her bir sonlu elemana ait üç boyutlu gerilme bileşenleri tablolar halinde kaydedilerek hasar kontrolleri yapılmıştır. İlerlemeli hasar analizinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için sayısal modelde kullanılan sonlu eleman sayısı, yük artım oranı ve sınır şartlarının doğru bir orantı ile kullanılması gerekir. Tablo 7.1'de verilen sonlu eleman sayılarının tespiti ve Şekil 7.7'deki pim deliğine uygulanan radyal sınır şartı ve simetri sınır şartı kullanılarak mesnetlenmesi kuralları göz önüne alınarak hazırlanmıştır. Kademeli yüklemeye bağlı olarak gerilme analizi yapılırken sonlu elemanlar modeline uygulanan yüklemelerin belirli bir oranda artırılması gerekmektedir. Yük artım oranının etkisi analizler yapılarak sayısal olarak araştırılmış ve sayısal model için en uygun yük artım oranının %1.5 olduğu belirlenmiştir. İlerlemeli hasar analizi metodu hasar tipi ve hasar yüklerinin sayısal olarak modellenmesine yarayan bir yaklaşım metodudur. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiği zaman deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmektedir [10, 19]. İlerlemeli hasar analizi yapılarak elde edilen sayısal çözümlerde ortaya çıkan hasar görüntüsü ile deneyler sonucunda kompozit levhalarda görülen hasar tipi benzerlik göstermektedir. İlerlemeli hasar

analizi metodunun doğruluğunu araştırmak amacı ile farklı deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır.

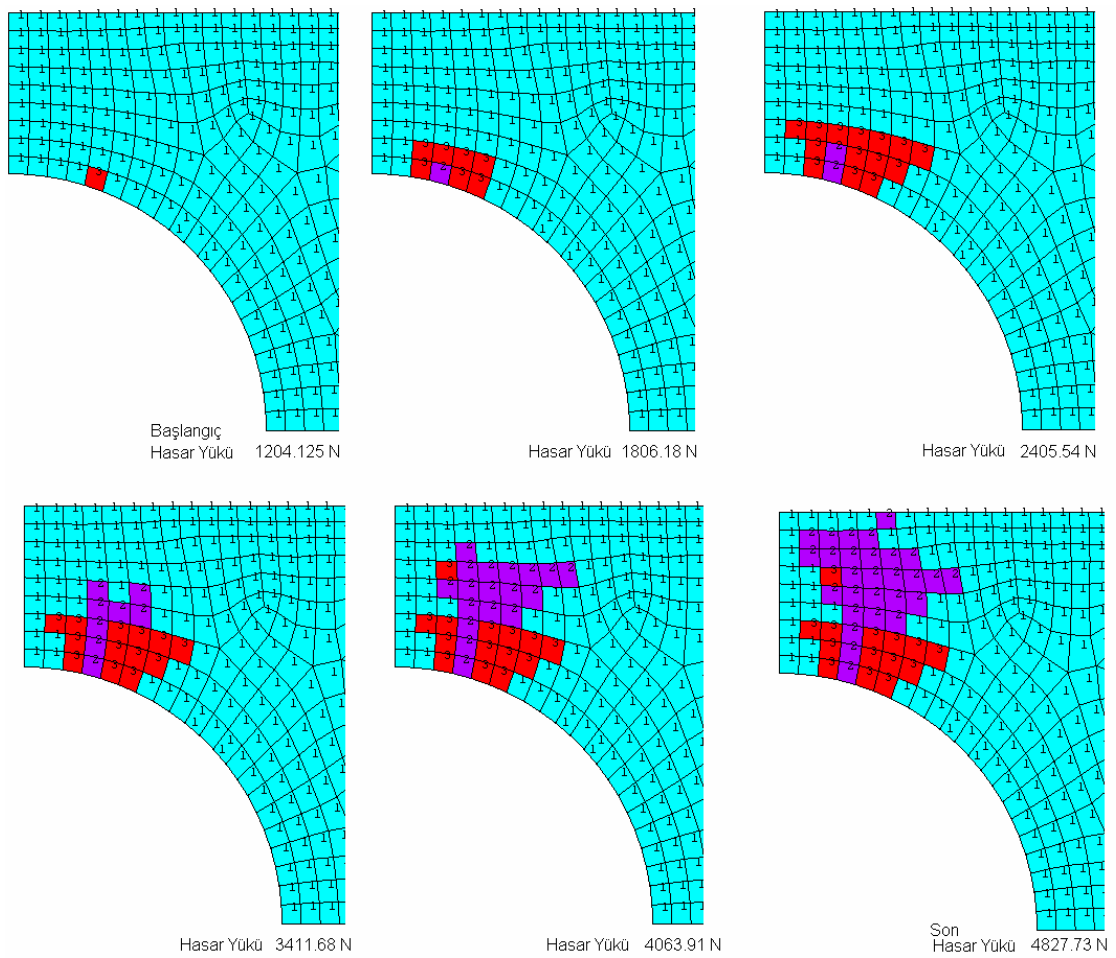
7.3.1. Dairesel delikli tabakalı kompozit levhalarda hasar analizi

Çekme yükü tesirindeki düz bir levhada yer alan delik gerilme yığılmalarına ve hasara neden olmaktadır. Bu çalışmada ortasında dairesel delik bulunan karbon takviyeli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit bir levhada hasar analizi sayısal ve deneysel olarak yapılmıştır. Deneysel çalışmada $[0^\circ/\theta^\circ]_2$ simetrik ve anti simetrik dizilime sahip dört tabakalı kompozit levhalar kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Fiber takviye açısının değişimi θ ; 0° , 15° , 30° , 45° ve 90° olarak seçilmiştir. Bu sayede fiberin açı değişiminin hasar yükleri üzerine olan etkilerinin görülmesi amaçlanmıştır. Çekme işleminde çekme hızı 0.5 mm/dk olarak alınmış ve plakaya iki ucundan eksenel çekme yükü uygulanmıştır. Sayısal çalışma için Ansys sonlu eleman paket programında APDL kodları kullanılarak hasar ilerlemesini modelleyen bir program geliştirilmiştir. Sayısal çalışmada problemin üç boyutlu bir katı modeli Ansys programında oluşturulmuştur. Modellemede tabakalardaki takviye açısının değişimini her bir hacim için farklı tanımlayabilmek için her tabakaya karşılık ayrı bir hacim oluşturulmuştur. Yapının bütünlüğünü korumak için farklı hacimlerin aynı alanları paylaşmaları sağlanmıştır. Bu sayede her bir tabakada ayrı ayrı hasar yükleri ve hasar tiplerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Katı modelin sonlu elemanlara bölünmesinde Solid 46 tabakalı yapı elemanı kullanılmıştır. Problemin çözümünde kullanılan $\frac{1}{4}$ ’lük kısmın modeli Şekil 7.14’ de gösterilmiştir. Sonlu elemanlara bölme işleminde gerilme yığılmalarının olduğu bölge olan delik kenarı daha sık elemanlara bölünmüştür.



Şekil 7.14. Plakanın boyutları ve $\frac{1}{4}$ ’lük kısmın sonlu eleman modeli.

Sınır şartı olarak, plakanın serbest kenarından düzgün yayılı çekme yükü uygulanmış ve simetrik olarak bölünmüş diğer yüzeylere ise simetri sınır şartı uygulanmıştır. Her bir hacme ayrı takviye açısı tanımlamak için (Real Constant) eleman özellikleri atanmıştır. Eleman özellikleri ilerlemeli hasar analizi yapılırken elemanların malzeme özelliklerini değiştirmek için kullanılmıştır. Kompozit levha önce az sayıda sonlu elemanlara bölünmüş daha sonra eleman sayısı artırılarak çözümler tekrarlanmıştır. Sayısal çözüm değerlerinin değişmediği ideal sonlu eleman sayısı 9800 olarak belirlenmiştir. Sayısal çalışma sonucunda $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip kompozit levhada hasar ilerlemesi ve son hasar yüküne ulaşılması Şekil 7.15’de gösterilmiştir.



Şekil 7.15. $[0^\circ]_4$ tabaka dizilimine sahip kompozit levhada hasar başlangıcı ve ilerlemesi.

Şekil 7.15’de sayısal analiz sonucunda elde edilen hasar yükleri ve son hasar yükü çeşitli renkler ve indisler kullanılarak ifade edilmiştir. Burada temsil edilen renkler ve indisler Ansys programında hasar analizi neticesinde değişen eleman özelliklerini temsil etmektedir ve program tarafından yapılan renklendirme neticesinde elde edilmektedir. Şekilden de görüldüğü

gibi $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada hasar fiber malzemesine göre daha az mukavemete sahip olan matriksden başlamıştır. Çekme yönüne paralel olan fiberler daha sonra hasara uğrayarak kırılmışlardır. Fiberlerin kırılarak malzeme eksenine dik bir şekilde ilerleyen hasarın levha kenarına ulaşması ile analiz sona erdirilmiştir. Tablo 7.2’de ilerlemeli hasar analizinde Şekil 7.15’de görülen renkler ve temsil ettikleri hasar tipleri görülmektedir.

Tablo 7.2. Hasar ilerleme modelindeki renkler.

Renk	İndis	Açıklama
Açık Mavi	1	Hasarsız eleman
Mor	2	Fiber Hasarı olan eleman
Kırmızı	3	Matriks Hasarı olan eleman
Sarı	9	Hasarsız eleman
Koyu Mavi	10	Fiber Hasarı olan eleman
Açık Mavi	11	Matriks Hasarı olan eleman

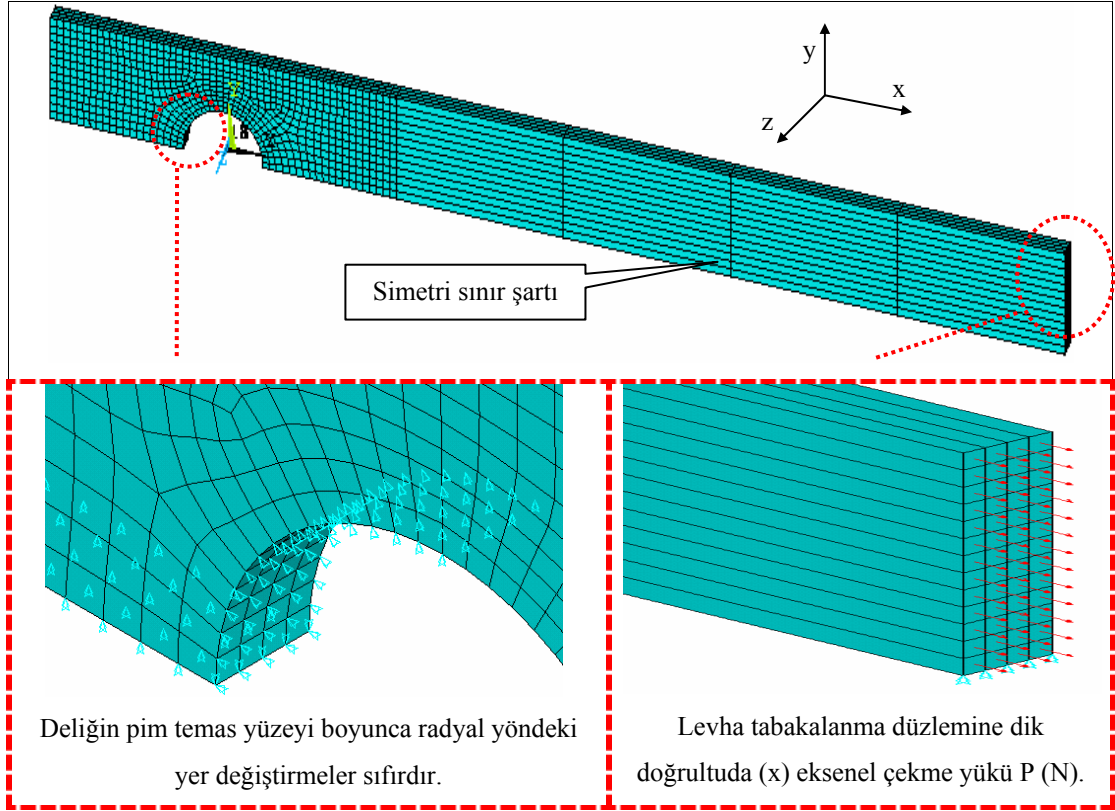
Deneysel ve sayısal çalışma sonucunda elde edilen hasar yüklerinin değişimi Tablo 7.3’de gösterilmiştir.

Tablo 7.3. Dairesel delikli tabakalı kompozit malzemede hasar yüklerinin deneysel ve sayısal olarak değişimi tablosu.

Tabakaların Dizilimi	Simetrik Dizilim Hasar Yükleri (N)			Anti-Simetrik Dizilim Hasar Yükleri (N)			Hasar Tipi
	Deneysel	Sayısal	Yaklaşım oranı (%)	Deneysel	Sayısal	Yaklaşım oranı (%)	
$[0^\circ]_4$	4651.973	4828	3.7	4651.973	4828	3.7	Fiber Çekme Hasarı
$[0^\circ/15^\circ]_2$	3263.061	3374	3.4	4646.553	4437	4.5	
$[0^\circ/30^\circ]_2$	3053.774	3185	4.2	3256.855	3412	4.7	
$[0^\circ/45^\circ]_2$	2847.817	2968	4.2	3271.336	3134	4.1	
$[0^\circ/90^\circ]_2$	2125.290	2288	7.6	2827.707	2946	4.1	

7.3.2. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi

Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının değişiminin hasar yükleri ve hasar tipleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Analizlerde özellikleri Tablo 5.2’de



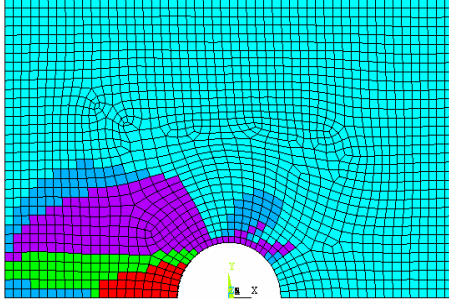
Şekil 7.17. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhanın sonlu eleman modeli ve sınır şartları.

Çalışmanın bu kısmında özellikle aynı fiber takviye açısı ile takviye edilmiş malzemede deneysel çalışmada görülebilecek olan hasar tipi ile ilerlemeli hasar analizi neticesinde sayısal çalışmada ortaya çıkacak olan hasar tipinin karşılaştırılması amaçlanmıştır. İlerlemeli hasar analizi kullanılarak yapılan çözümde Tablo 7.4’de hasar kriteri ve hasar oluşması durumunda sonlu elemanlara bölünmüş levhada ortaya çıkan renklerin anlamları verilmiştir. Sayısal çalışmada kullanılan yöntemde yer alan hasar kriteri ve malzeme indirgeme kuralları Tablo 7.4’de yer alan şekli ile uygulanmıştır.

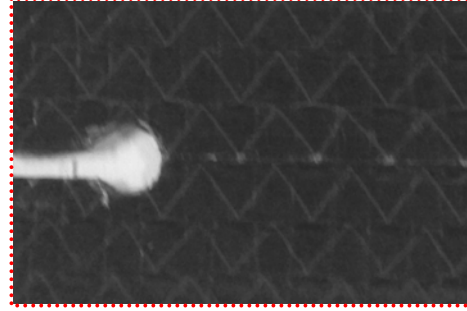
Tablo 7.4. Üç boyutlu Hashin hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler.

Hasar tipi	Hasar şartı	Hasar Kriteri bağıntısı	Renk
Hasara uğramamış eleman	-	-	Açık mavi 
Fiber Çekme	$\sigma_1 > 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	Mor 
Fiber Basma	$\sigma_1 < 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right) \geq 1$	Kırmızı 
Matriks çekme	$\sigma_2 > 0$	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	Koyu mavi 
Matriks Basma	$\sigma_2 < 0$	$\left(\frac{\sigma_2}{Y_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1$	Pembe 
Fiber Matriks Kayma	$\sigma_1 < 0$	$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1$	Yeşil 

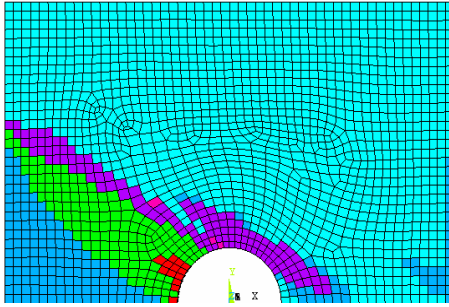
Şekil 7.18’de elde edilen hasar tipleri deneysel ve sayısal çalışmanın sonucu olarak görülmektedir.



$[0^\circ]_4$; Sayısal hasar yükü=701.155 N



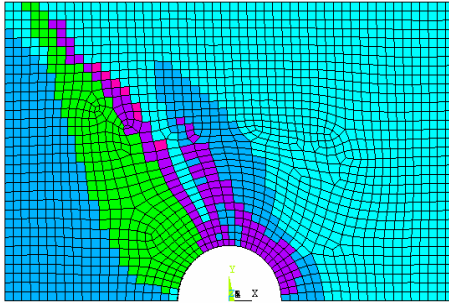
Deneysel hasar yükü=694.053 N



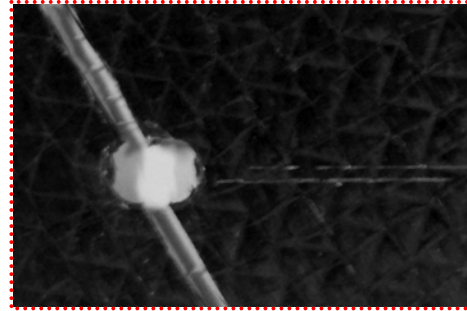
$[30^\circ]_4$; Sayısal hasar yükü=651.091 N



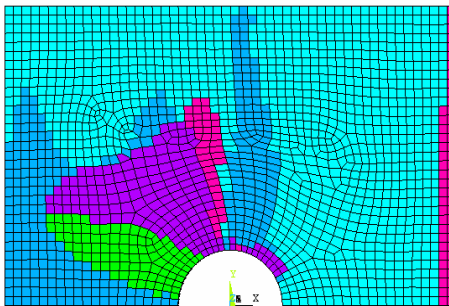
Deneysel hasar yükü=640.776 N



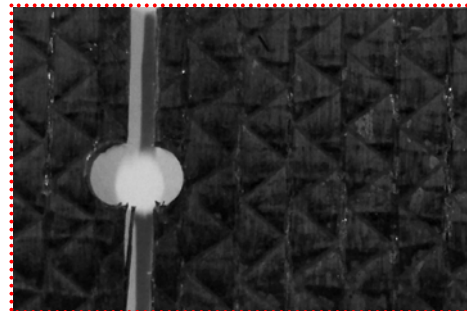
$[60^\circ]_4$; Sayısal hasar yükü=512.679 N



Deneysel hasar yükü=467.483 N



$[90^\circ]_4$; Sayısal hasar yükü=502.397 N

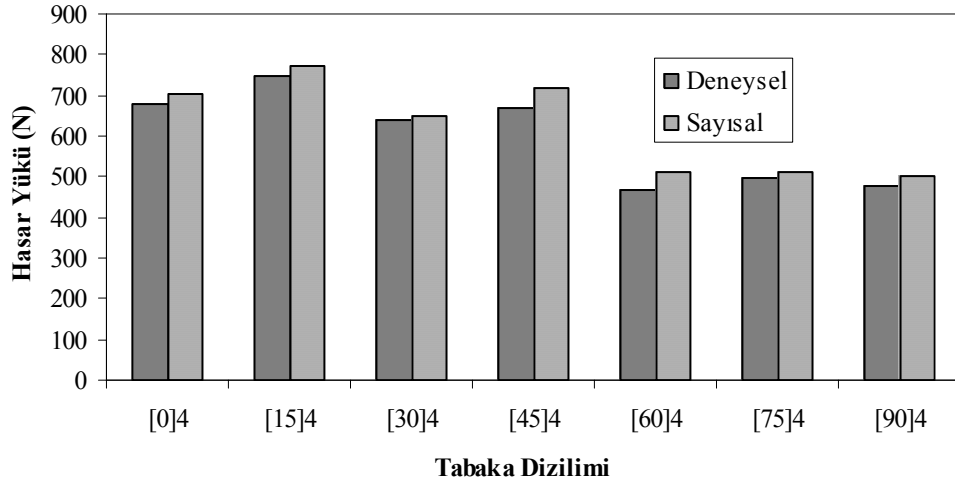


Deneysel hasar yükü=475.967 N

Şekil 7.18. Tabaka dizilimleri $[\theta^\circ]_4$ olmak üzere farklı tabaka dizilimleri için sayısal ve deneysel hasar yüklerinin ve hasar tiplerinin karşılaştırılması.

Şekil 7.18’de görüldüğü gibi hasar tipleri önemli oranda fiber takviye açısının değişiminden etkilenmektedir. Sayısal ve deneysel çalışma son hasar tipleri arasında oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

$[90^0]_4$ tabaka diziliminde fiberlerin yük taşıması mümkün olmadığı ve sadece matriks tarafından taşındığı için yırtılma hasarı meydana gelmiştir. $[0^0]_4$ tabakalı kompozit malzemede fiberler yükleme doğrultusuna paralel olduğu için kesme hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 7.19. Fiber takviye açısının değişimine göre sayısal ve deneysel hasar yüklerinin karşılaştırılması

Yükün artışına bağlı olarak aynı doğrultulu dört tabakalı kompozit levhalardaki son hasar tipleri; $[30^0]_4$ ve $[45^0]_4$ için fiber matriks kayma ve fiber çekme hasarı, $[60^0]_4$ için fiber matriks kayma hasarı ve $[90^0]_4$ için matriks çekme hasarı olarak gerçekleşmiştir. Ancak pim temas yüzeyi boyunca ve pim deliğine yakın bölgelerde $[0^0]_4$ tabaka dizilimi için eksenel çekme doğrultusunda olan fiberlerin basma hasarı etkisinde kaldığı Şekil 7.18’de görülmektedir. Takviye açısının çekme doğrultusundan uzaklaşmasıyla bir başka deyişle fiber takviye açısının artmasıyla delik etrafında fiber basma hasarı oluşumu ortadan kalkmaktadır. Fiber takviye açısının değişimine göre tabakalı kompozit levhaların sayısal ve deneysel hasar yükleri Şekil 7.19’da gösterilmiştir. En büyük deneysel hasar yükü 749.917 N ile $[15^0]_4$ dizilimi için, en düşük hasar yükü ise 467.483 N ile $[60^0]_4$ dizilimi için elde edilmiştir. Sayısal hasar yükleri tüm takviye açılarında deneysel hasar yüklerinden daha büyüktür. Deneysel ve sayısal hasar yükleri arasındaki en büyük fark 51.13 N olarak $[90^0]_4$ diziliminde bulunmuştur. Sayısal ve deneysel sonuçları; en düşük %92.87 yaklaşım oranıyla $[90^0]_4$ için, en yüksek ise %98.41 olarak $[30^0]_4$ için tespit edilmiştir.

7.3.3. Hasar ilerleme metodunun doğrulanması için çözümlerin karşılaştırılması

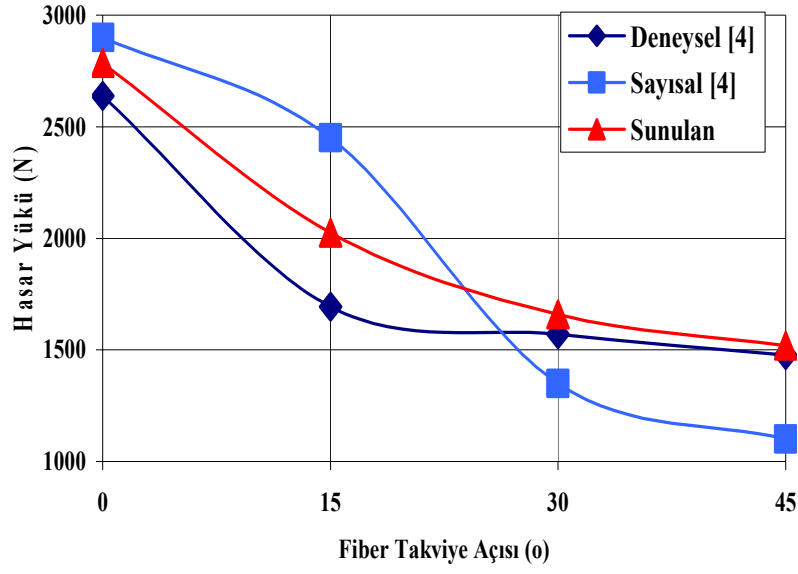
Bu bölümde hasar ilerleme analizi için tezde kullanılmak üzere geliştirilmiş olan APDL kodlarını farklı çalışmalar için uyarlayarak daha önce yapılmış olan çalışmaların çözümleri ile programın doğruluk ve yakınsama kontrolü yapılmıştır. Yapılan çözümlerde; yayımlanmış çalışmalarda yer alan malzeme özellikleri ve geometrik özellikler aslına uygun olarak kullanılırken sınır şartları ve yüklemeler tezde kullanılan metoda göre ilerlemeli hasar analizi yapılacak şekilde seçilmiştir.

[4] numaralı referansta yer alan çalışmada örgülü karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli çift tesirli pim bağlantılarının ilerlemeli hasar analizi yazar tarafından geliştirilmiş olan bilgisayar programında sonlu elemanlar metodunu kullanarak sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada pim deliği çapı 5mm ve levha kalınlığı 1.45 mm olarak alınmıştır. Fiber takviye açısı olarak $[0^\circ]_4$, $[15^\circ]_4$, $[30^\circ]_4$, $[45^\circ]_4$ dizilimine sahip levhalar kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5. [4] numaralı referans çalışmada kullanılan örgülü karbon fiber takviyeli epoksi matriks reçineli kompozit malzemenin mekanik özellikleri.

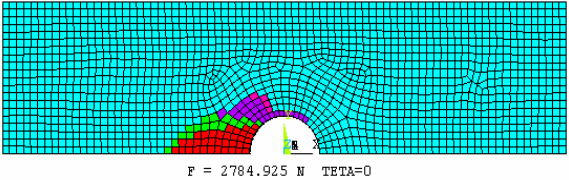
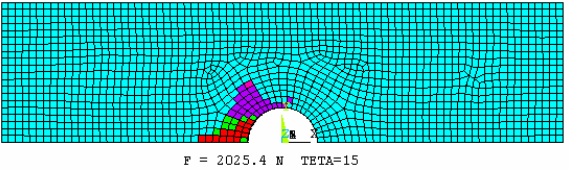
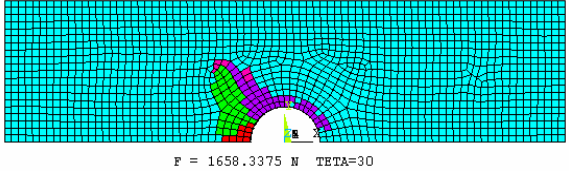
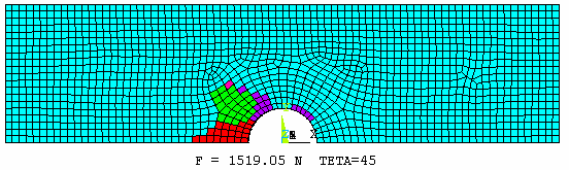
$E_1 = E_2$ (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	$X_\varphi = Y_\varphi$ (MPa)	$X_b = Y_b$ (MPa)	S (MPa)	V_f (%)
100	7.12	0.04	1027	390	143	65

İlerlemeli hasar analizi kullanılarak tekrar yapılan çalışmada $E/D=4$ ve $W/D=4$ için fiber takviye açısının değişiminin hasar yükleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar referans çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak Şekil 7.20'deki grafikte sunulmuştur. Tablo 7.6'de sayısal çalışmadan elde edilen hasar yükleri ve hasar tipleri gösterilmiştir.



Şekil 7.20. [4] numaralı referansta yer alan deneysel ve sayısal çalışma sonuçları ile kullanılan metotla elde edilen sayısal hasar yüklerinin karşılaştırılması.

Tablo 7.6. Sayısal çalışma sonucu Ansys programından elde edilen hasar yükleri ve hasar tiplerinin [4] numaralı referans sonuçları ile karşılaştırma tablosu.

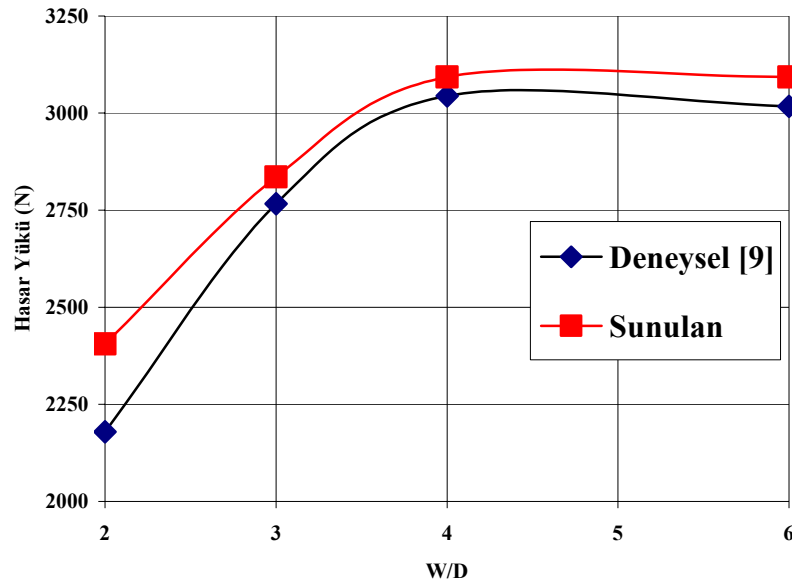
E/D=4 W/D=4	Deneyisel Hasar Yükü (N), [4]	Sunulan Hasar yükleri (N)	Hasar Tipi ve Yaklaşım Oranı	ANSYS
[0°] ₄	2638	2784.9	Ezilme Hasarı	
			% 5	
[15°] ₄	1693	2025.4	Ezilme Hasarı	
			% 19	
[30°] ₄	1570	1658.3	Ezilme Hasarı	
			% 6	
[45°] ₄	1476	1519.0	Ezilme Hasarı	
			% 3	

[9] numaralı referansta deneysel olarak yapılmış olan çalışmada tek yönlü karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli tabakalı kompozit malzemelerde çift tesirli pim bağlantısının mukavemeti araştırılmıştır. Çalışmada fiber takviye açısı ve tabaka dizilimi olarak $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ ve $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ]_s$ konfigürasyonlarını kullanılmıştır. [9] numaralı referansta yer alan mekanik özellikler kullanılarak pim bağlantısının hasar analizi tezde kullanılan metot kullanılarak araştırılmıştır. [9] numaralı referans çalışmada kullanılan malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 7.7’de verilmiştir.

Tablo 7.7. [9] numaralı referans çalışmada kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri.

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	X_ϕ (MPa)	X_b (MPa)	V_f (%)
88	8.8	2.8	0.28	811	457.7	62

Bu çalışmada pim çapı $D= 6.35$ mm olarak ve plaka kalınlığı $t=2.64$ mm olan 8 tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Karşılaştırma amacı ile yapılan çözümde modelin geometrik özellikleri ve mekanik özellikleri aynı kalmak üzere tezde modellenmiş olan pim bağlantısına ait sınır şartları ve ilerlemeli hasar analizi metodu kullanılarak çözüm yapılmıştır. Karşılaştırma çalışmasında $E/D=4$ olarak sabit olmak üzere $W/D = 2, 3, 4, 6$ için analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.21’de karşılaştırmalı olarak grafik şeklinde verilmiştir. Hasar tipi olarak referans çalışmada ve sunulan çalışmada tüm numuneler için ezilme hasarı tespit edilmiştir.



Şekil 7.21. [9] numaralı referans çalışmada yer alan çözümün tezde kullanılan metot ile elde edilen hasar yüklerinin karşılaştırılması.

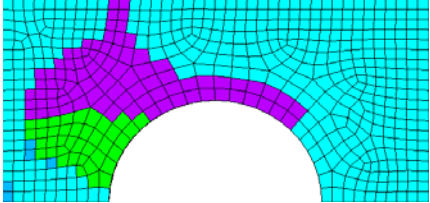
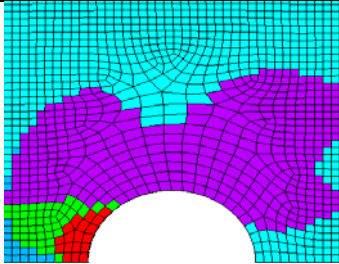
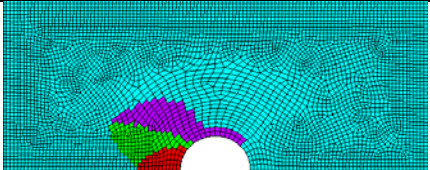
[13] numaralı referansta yapılmış olan çalışmada örgülü cam fiber takviyeli vinlyester matriksli tabakalı kompozit yapılarda çift tesirli pim bağlantılarının deneysel ve sayısal hasar analizi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan kompozit malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 7.8’de verilmiştir.

Tablo 7.8. [13] numaralı referans çalışmada kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri.

$E_1 = E_2$ (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	$X_c=Y_c$ (MPa)	$X_b=Y_b$ (MPa)	S (MPa)	V_f (%)
20.769	4.133	0.09	395	260	75	63

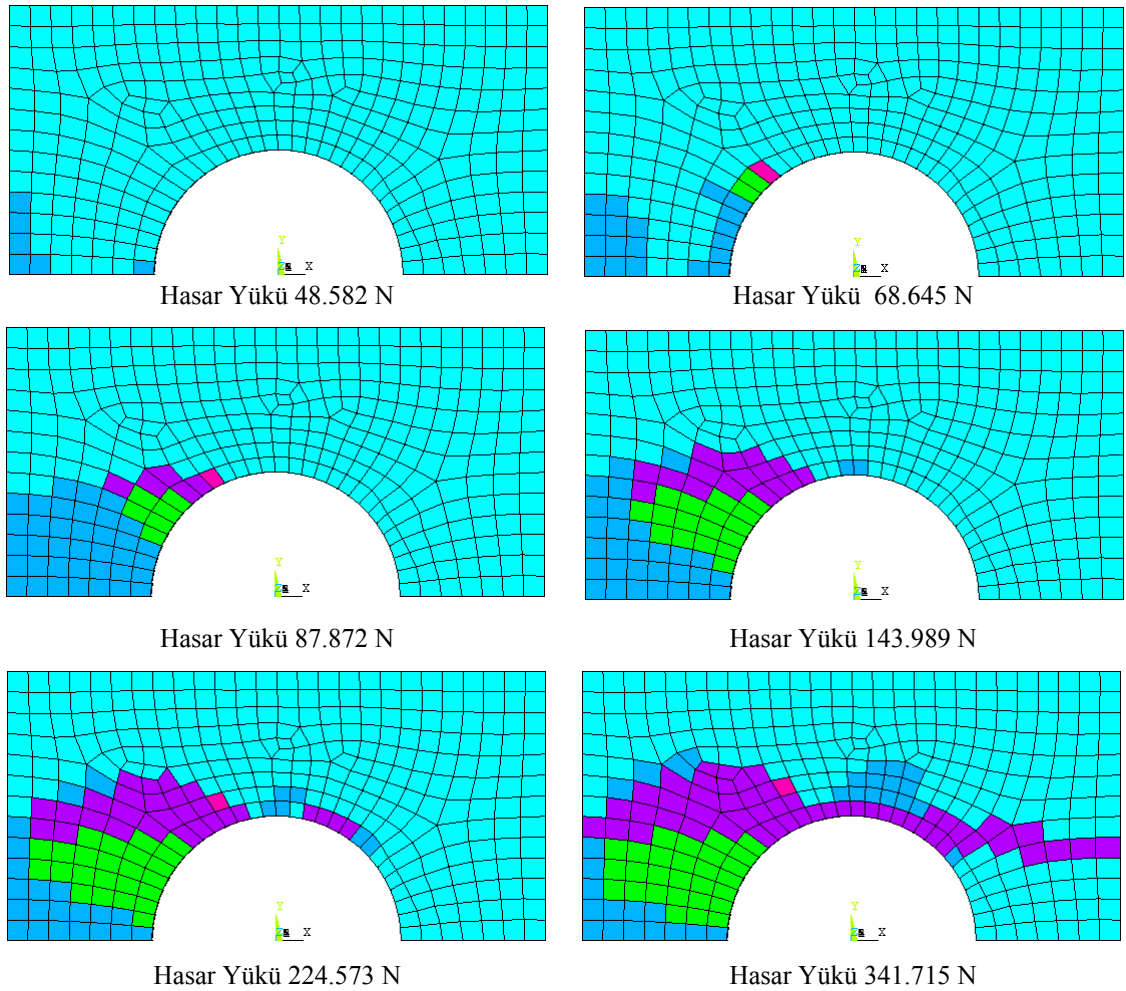
Çalışmada pim çapı $D=5$ mm ve levha kalınlığı $t= 2.8$ olan 12 tabakalı kompozit malzeme kullanılmıştır. Karşılaştırma çalışmasında $E/D=1$ ve $W/D = 2$, $E/D= 2$ ve $W/D = 4$, $E/D = 3$ ve $W/D =4$ olan üç farklı geometrik özellikte levha kullanılarak ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.9’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.9. Sayısal çalışma sonucu Ansys programından elde edilen hasar yükleri ve hasar tiplerinin [13] numaralı referans sonuçları ile karşılaştırılması.

Geometrik Özellik	Deneysel Hasar Yüğü (N), [13]	Sunulan Hasar yükleri (N)	Hasar Tipi ve Yaklaşım oranı	ANSYS
$E/D=1$ $W/D= 2$	1970	1919.88	Yırtılma Hasarı	
			% 2.5	
$E/D=1$ $W/D= 4$	2550	2676.17	Kesme Hasarı	
			% 5	
$E/D=3$ $W/D= 5$	3596	3679.73	Ezilme Hasarı	
			% 2.5	

7.4. Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Başlangıcı ve İlerlemesinin Sayısal Çözümü

İlerlemeli hasar analizi kullanılarak yapılan sayısal modelde hasar başlangıcı ve yayılması Ansys programından her bir yük artışı için elde edilen resim dosyalarından tespit edilmektedir. Şekil 7.1’de gösterilen akış diyagramının işlemesi ile her bir yük değeri için yapılan gerilme ve hasar analizi sonucunda modele ait resim kaydedilmektedir. Kaydedilen bu resimlerden hangi tabakada hasarın başladığı ve son hasar yüklerinin değerleri tespit edilebilmektedir. Deneysel çalışmaya benzer şekilde delik kenarında başlayan hasar ilerleyerek levhanın kenarına ulaşınca kadar devam eder ve levha kenarına ulaşınca program durdurulur. Kompozit levhanın kenarına ulaşan hasarın kırılmaya neden olabilmesi için fiber çekme, fiber basma veya fiber–matriks kayma hasarlarından en az biri olması gerekmektedir [56].



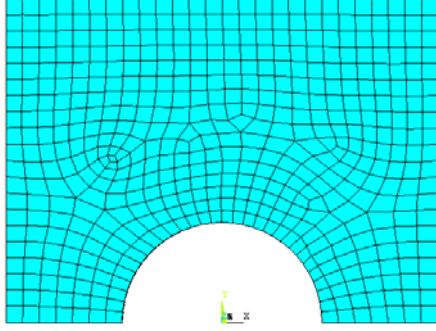
Şekil 7. 22. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=2$ için hasar ilerlemesi.

Şekil 7.22’de $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$, $W/D=2$ geometrik değişiminde hasar ilerlemesi görülmektedir. Dört tabakanın tümü 0° fiber takviye açısına sahip olduğu için sadece bir tabakada hasar ilerlemesi gösterilmiştir. Hasar başlangıcı 48.582 N değerinde matris çekme hasarı şeklinde meydana gelmiştir. Yük değerinin artışına bağlı olarak matris çekme hasarı ilerlemiş ve 68.645 N değerinde fiber – matriks kayma hasarının da delik kenarında başladığı görülmüştür. Levhanın kırılmasına sebep olan fiber – matriks kayma hasar tipi yıkıcı hasar olarak adlandırılabilir. Fiber – matriks kayma hasarının yanı sıra 87.872 N değeri için fiber çekme hasarı görülmektedir. Yükler 224.573 N değerine ulaştığı zaman levha kenarına doğru fiber – matriks kayma ve fiber çekme hasarı görülürken son hasar yükü 341.715 N değeri için fiber çekme hasarının levha kenarına ulaşması sonucu levha daha fazla yükü taşıyamaz ve kırılma gerçekleşir. 341.715 N yük değeri için levhada meydana gelen hasara bakıldığı zaman pim deliğinin hemen üzerinden levha kenarına doğru fiber çekme hasarının yayıldığı görülmektedir. Dört tabakasının da 0° fiber takviye açısına sahip olduğu levha için fiber çekme hasarının kırılmaya neden olması sayısal çalışma sonuçlarının uygunluğunu göstermektedir. Son hasar yükünün fiber çekme hasarı olduğu ve levhada kenarı ile delik kenarını birbirine bağladığı için levha fiber çekme hasarı ile aynı doğrultuda kırılacaktır. Şekil 7.23’de yapılan deneyin sonucunda elde edilen numuneden de görüldüğü gibi pim bağlantılı levhanın kırılması sayısal analiz ile aynı şekilde gerçekleşmiştir.

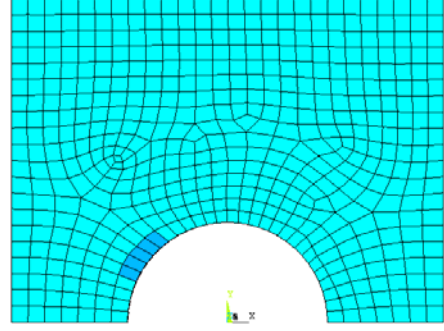


Şekil. 7.23. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=2$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüsü.

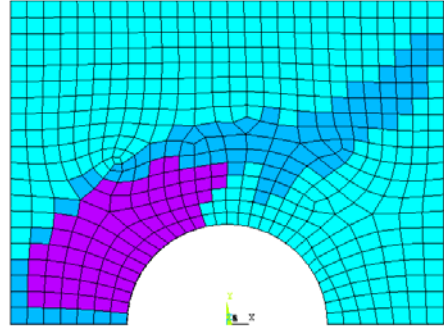
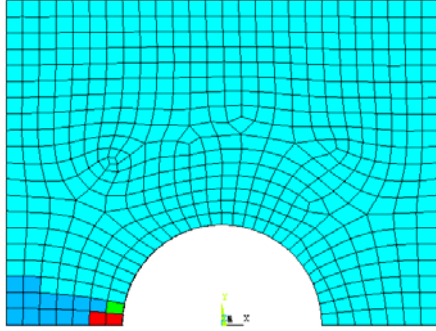
0° Tabakada Hasar İlerlemesi



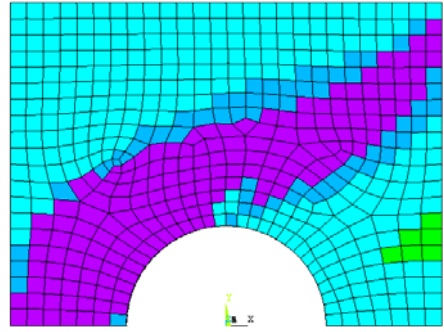
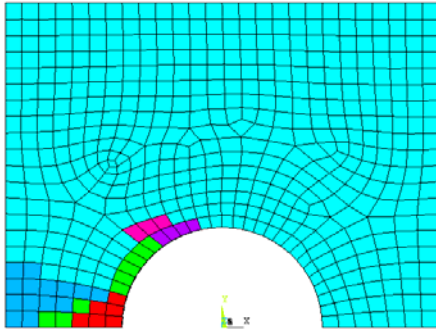
45° Tabakada Hasar İlerlemesi



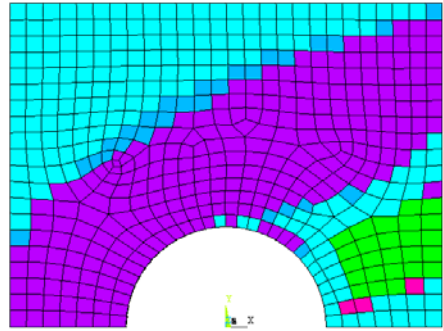
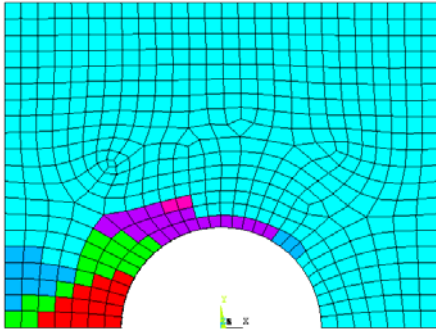
Hasar Yüğü 21.202 N



Hasar Yüğü 128.593 N



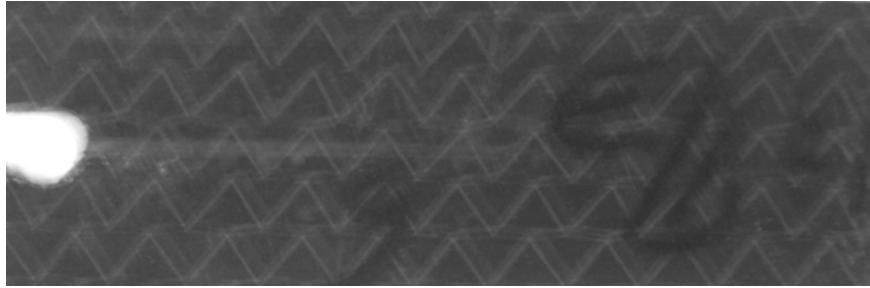
Hasar Yüğü 200.562 N



Hasar Yüğü 390.650 N

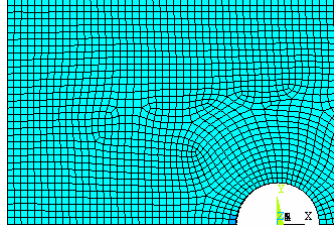
Şekil 7.24. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$, $W/D=3$ için hasar ilerlemesi.

Şekil 7.24’de $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$, $W/D=3$ geometrik değişiminde hasar ilerlemesi görülmektedir. Tabakalar iki farklı açı değerlerine sahip oldukları için her iki tabakada meydana gelen durum burada gösterilmiştir. İlk hasar yükü 45° fiber takviye açısına sahip tabakada 21.202 N değerinde matriks çekme hasarı olarak ortaya çıkmıştır. Yüklerin artarak 128.593 N değerine ulaşması ile 0° fiber takviye açısına sahip tabakada deliğin alt kenarında fiber basma ve fiber – matriks kayma hasarı ve 45° fiber takviye açısına sahip tabakada ise fiber çekme hasarı meydana gelmiştir. Yük değerlerinin 200.562 N olması ile 45° fiber takviye açısına sahip tabakada hasar levha kenarına fiber çekme hasarı şeklinde ulaşırken 0° fiber takviye açısına sahip tabakada fiber çekme, basma ve fiber – matriks kayma hasarlarının olduğu görülmektedir. 0° fiber takviye açısına sahip tabakada 390.650 N değerinde fiber – matriks kayma hasarlarının levha kenarına ulaşması ile kırılma gerçekleşmiştir. 45° fiber takviye açısına sahip tabakanın farklı yük değerlerinde hasar ilerlemesine bakıldığı zaman meydana gelen hasarların 45° bir eğim ile fiber takviye açısına paralel bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Son hasar yükü değeri için 0° fiber takviye açısına sahip tabakada fiber basma hasarlarının delik kenarında yoğunlukla ortaya çıktığı görülmektedir. Pimin levha yüzeyine uyguladığı basınç yükünün bir sonucu olarak ortaya çıkan bu durum Şekil 7.25’de deney sonucu numunenin görüntüsünden daha net bir şekilde görülmektedir. Sayısal çalışma sonucunda levhanın kesme hasarına uğradığı görülmektedir.

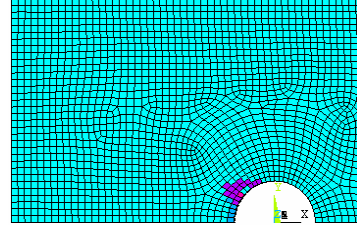


Şekil 7.25. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=3$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüsü.

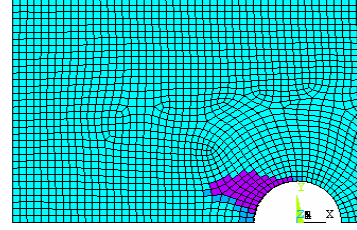
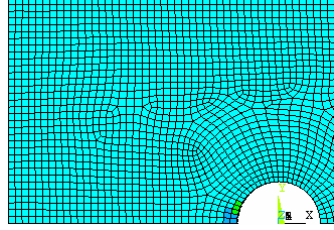
0° Tabakada Hasar İlerlemesi



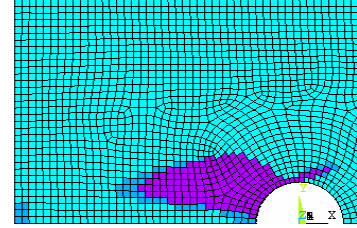
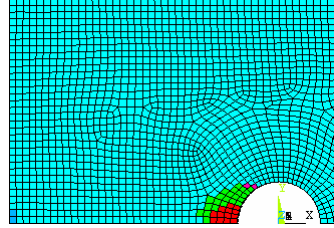
15° Tabakada Hasar İlerlemesi



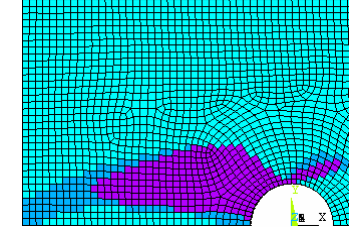
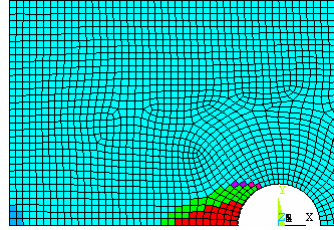
Hasar yükü 92.567 N



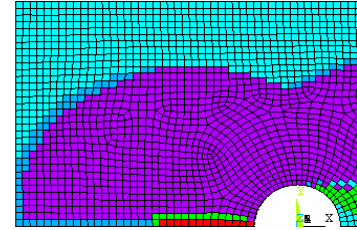
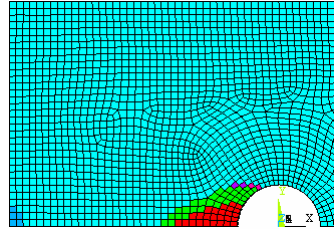
Hasar yükü 144.373 N



Hasar yükü 604.603 N



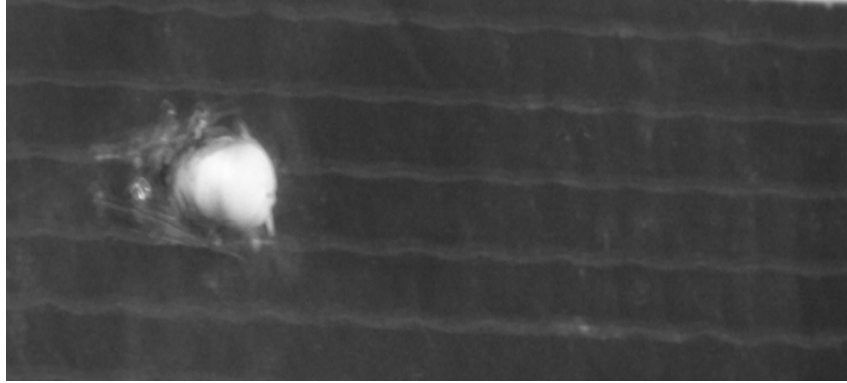
Hasar yükü 1399.527 N



Hasar yükü 1507.487 N

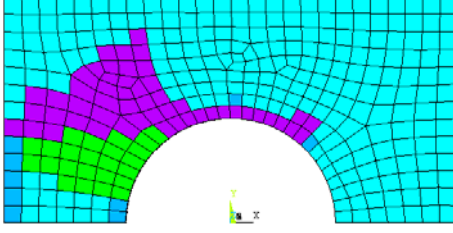
Şekil 7.26. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için $E/D=3$, $W/D=5$ için hasar ilerlemesi.

Şekil 7.26'da $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için $E/D=3$ $W/D=5$ geometrik değişiminde hasar ilerlemesi görülmektedir. 0° fiber takviye açısına sahip tabakada 92.567 N değeri için delik kenarında fiber çekme hasarları ve 45° fiber takviye açısına sahip tabakada ise aynı yük değeri için fiber çekme hasarları ortaya çıkmaktadır. Yük değerinin artarak 144.373 N değeri için hasar ilerlemeye devam eder ve bu yük değerinde 0° fiber takviye açısına sahip tabakada fiber – matriks kayma hasarlarının da ortaya çıktığı görülmektedir. Yük değeri 604.603 N değerine ulaştığında ezilme 0° fiber takviye açısına sahip tabakada fiber basma hasarlarının ortaya çıktığı ve 45° fiber takviye açısına sahip tabakada ise fiber çekme hasarlarının ilerlediği görülmektedir. Yüklerin 1399.527 N ve 1507.487 N değerleri için 0° fiber takviye açısına sahip tabakada fiber basma hasarlarının artık daha fazla artış göstermediği ve neredeyse sabit kaldığı görülürken 45° fiber takviye açısına sahip tabakada ise fiber çekme hasarlarının levha kenarına ulaştığı görülmektedir. Yük değerinin artışına rağmen 0° fiber takviye açısına sahip tabakada fiber basma hasarları haricinde başka herhangi bir hasar olmadığı görülmektedir. Yük değerinin artmasına rağmen başka bir hasar türünün görülmemesi $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhanın ezilme hasarına uğradığını göstermektedir. Bu nedenle ezilme hasarının yayıldığı bölgenin $D/2$ kadar olduğu 1507.487 değerinde analiz durdurularak sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 7.27'de $[0^\circ/15^\circ]_2$ dizilime sahip tabakalı kompozit levhada meydana gelen ezilme hasarı daha net bir şekilde görülmektedir. Sayısal çalışmanın sonucunda $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada $E/D=3$, $W/D=5$ için ezilme hasarının meydana geldiği görülmüştür.

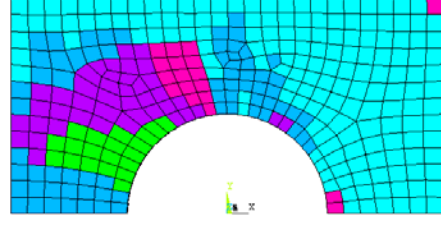


Şekil 7.27. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada $E/D=3$, $W/D=5$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüsü.

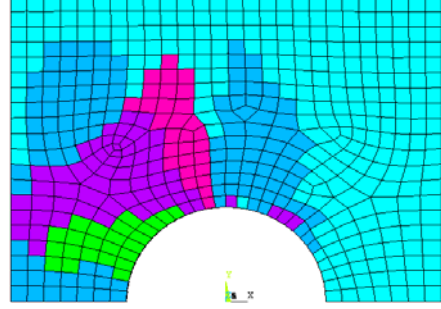
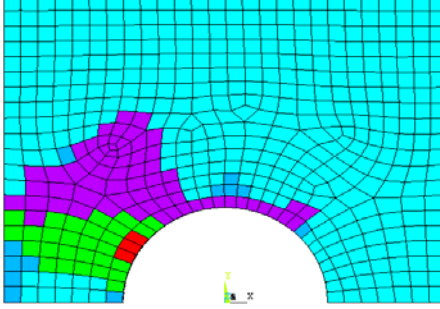
0° Tabakada Hasar İlerlemesi



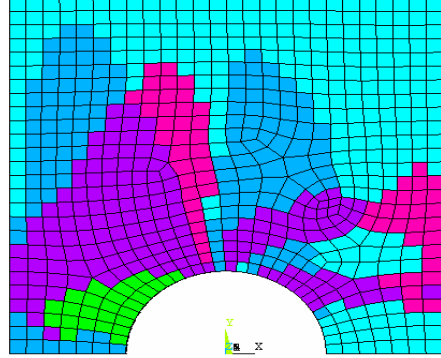
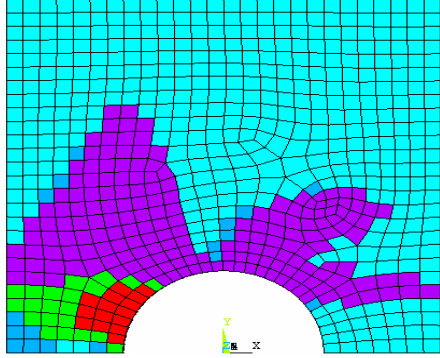
90° Tabakada Hasar İlerlemesi



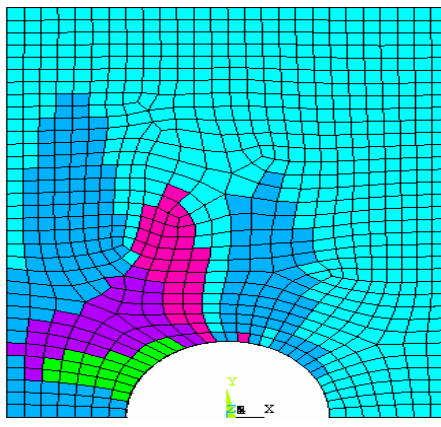
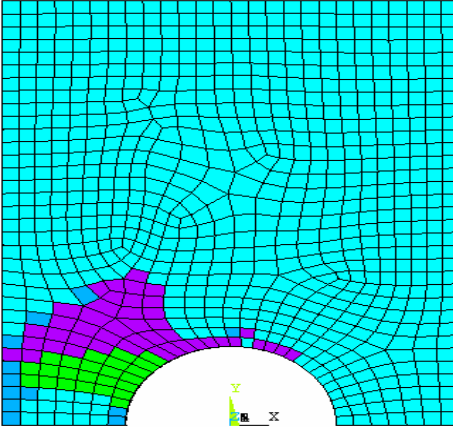
W/D=2 Hasar Yüğü 314.252 N



W/D=3 Hasar Yüğü 492.172 N



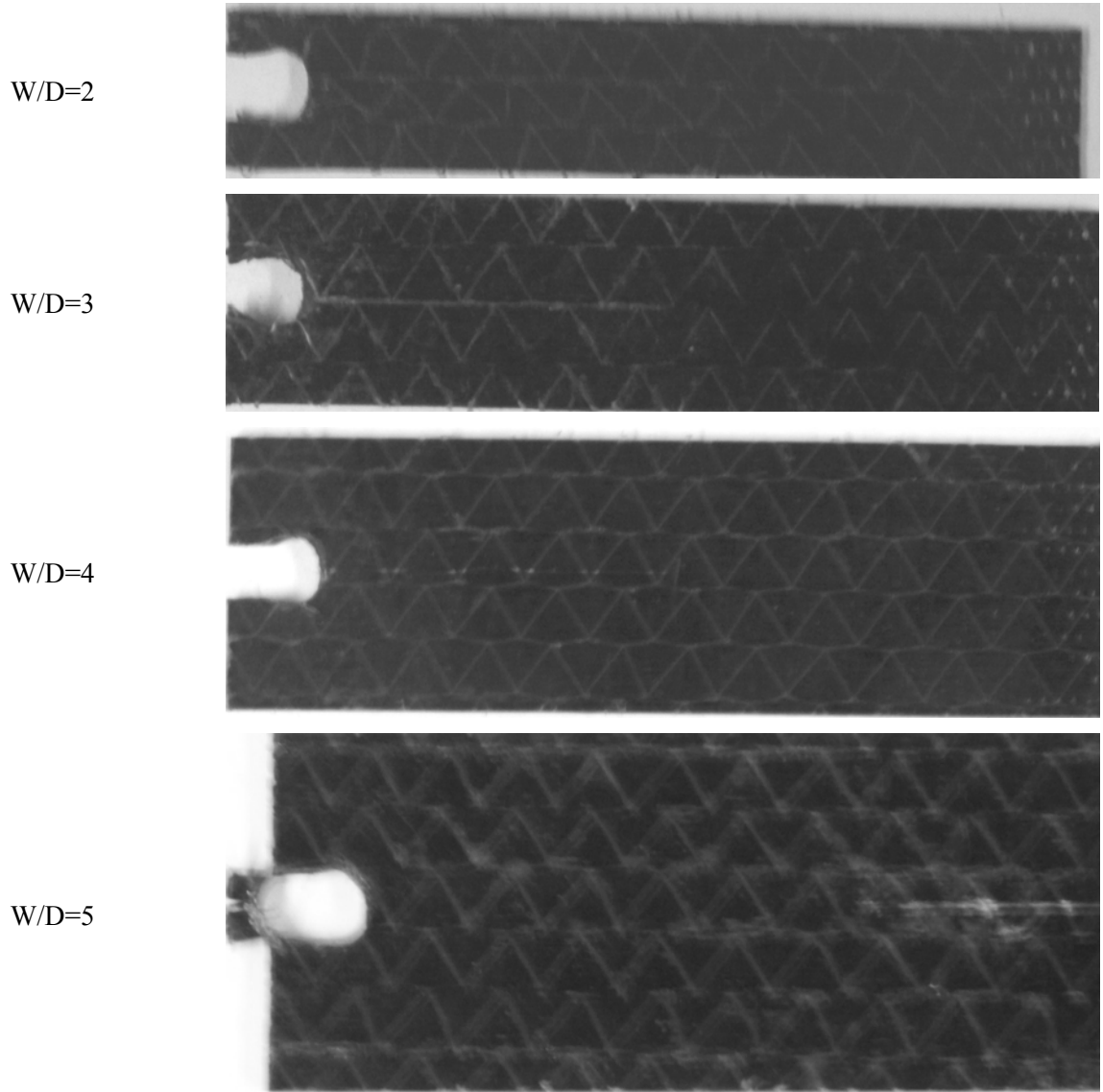
W/D=4 Hasar Yüğü 579.200 N



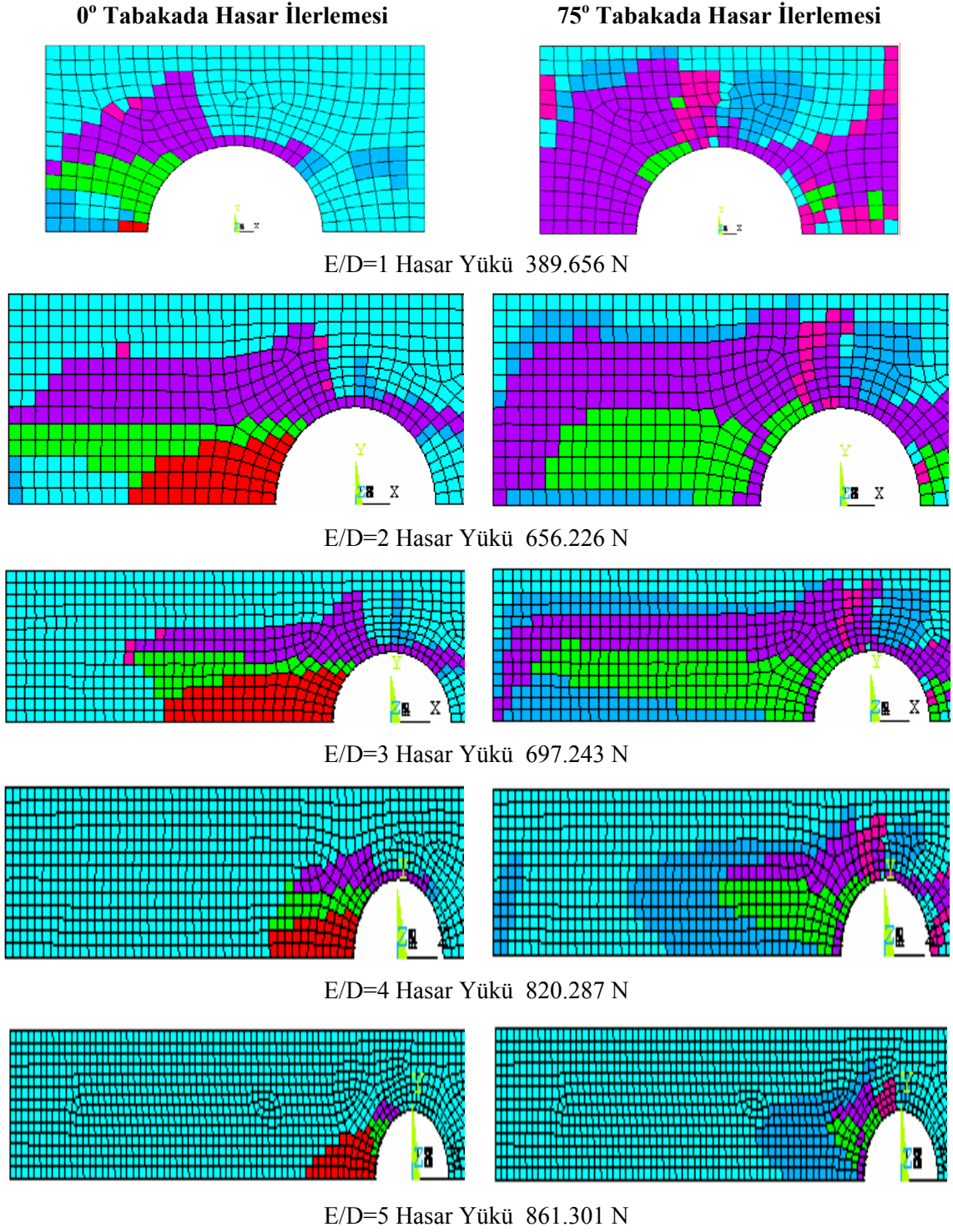
W/D=5 Hasar Yüğü 851.192 N

Şekil 7.28. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$ durumunda son hasar yükleri ve hasar tiplerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ değerleri için sayısal değişimi.

Şekil 7.28’de $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $E/D=1$ durumunda son hasar yükleri ve hasar tiplerinin $W/D = 2, 3, 4, 5$ değerleri için sayısal olarak değişimi görülmektedir. E/D oranını sabit olduğu durum için tüm W/D oranlarında levhada ortaya çıkan hasar tipinin kesme hasarı olduğu görülmektedir. $W/D = 2$ oranında en düşük hasar yükü olarak 314.252 N ve en yüksek hasar yükü değeri $W/D = 5$ oranında 851.192 N değeri elde edilmiştir. W/D oranının artmasına paralel olarak hasar yükleri de artmıştır. Hasar tiplerinin E/D oranının sabit olmasına karşın W/D oranının değişiminden etkilenmediği görülmüştür. Şekil 7.29’da $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhanın deney sonucundaki görüntüleri yer almaktadır.



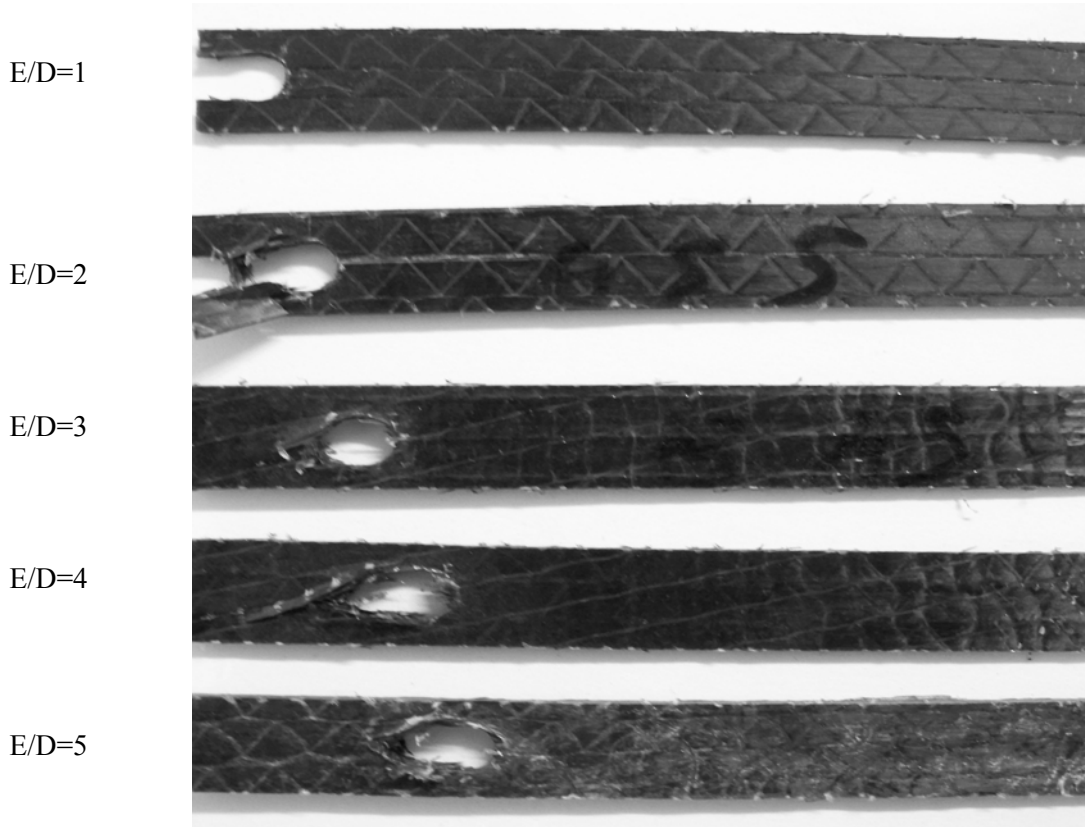
7.29. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $E/D=1$, $W/D=2, 3, 4, 5$ için deney sonucunda meydana gelen hasar görüntüleri.



Şekil 7.30. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $W/D=2$, $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ oranında son hasar yükleri ve hasar tiplerinin sayısal olarak tespiti.

Şekil 7.30'da $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için $W/D=2$ sabit oranı için $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ değişimi durumunda son hasar yükleri ve hasar tiplerinin sayısal olarak değişimi görülmektedir.

En düşük hasar yükü $E/D = 1$ oranı için 389.656 N olarak elde edilirken en yüksek hasar yükü $E/D = 5$ oranı için 861.301 N olarak elde edildiği görülmektedir. Hasar yükleri E/D oranına paralel olarak artmaktadır. $E/D = 1$ ve 2 için hasar tipi olarak kesme hasarı olduğu görülürken $E/D = 3, 4, 5$ için ezilme hasarının olduğu görülmektedir. Hasar tipinin değişiminde E/D oranının etkili olduğu bu sonuçlara dayanarak ifade edilebilir. Şekil 7.31’de $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $W/D=2$, $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ için deney sonucunda meydana gelen hasarın görüntüleri yer almaktadır.

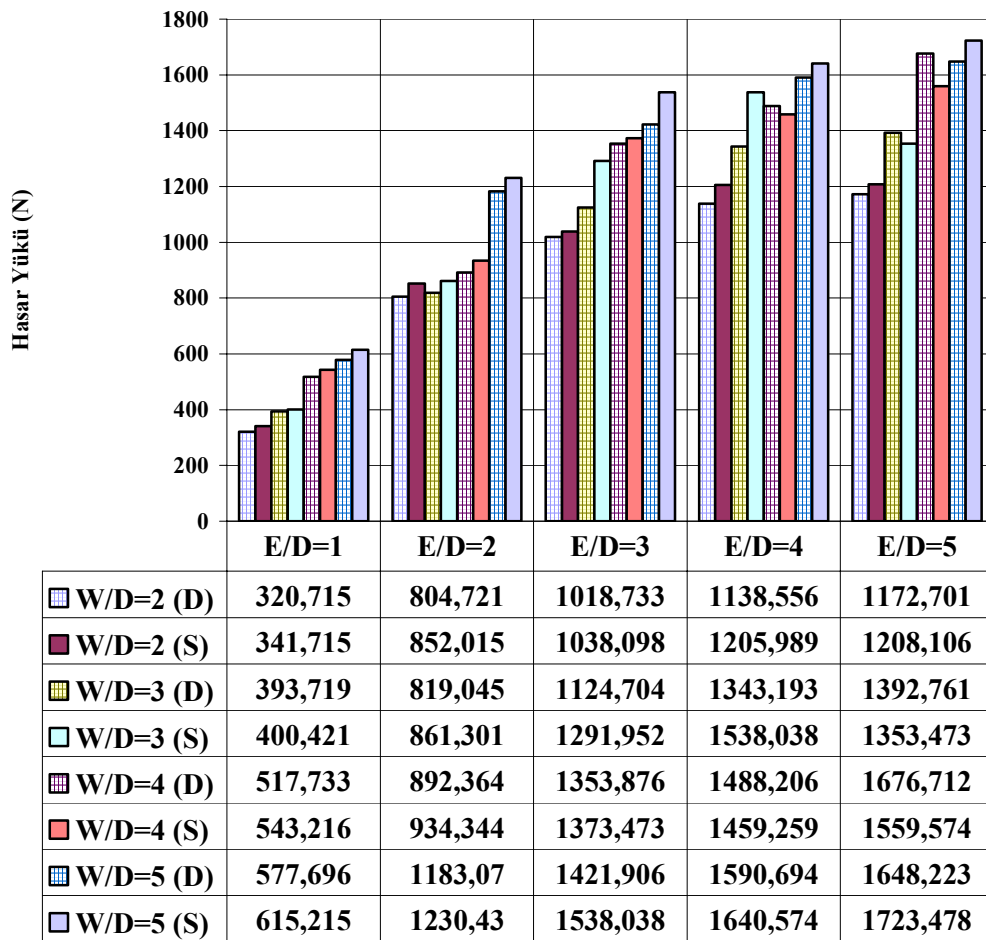


Şekil 7.31. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada $W/D=2$, $E/D = 1, 2, 3, 4, 5$ için deney sonucunda meydana gelen hasar görüntüleri.

7.5. Sayısal Olarak Hesaplanan Hasar Yüklerinin Deneysel Çalışma Sonuçları ile Karşılaştırması

Bu bölümde pim bağlantılı tabakalı kompozit malzemeler için geliştirilmiş olan ilerlemeli hasar analizi programı ile elde edilmiş olan hasar yüklerinin deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş olan hasar yükleri ile karşılaştırmaları her bir tabaka dizilimi için grafikler halinde sunulmuştur.

Şekil 7.32’de $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.

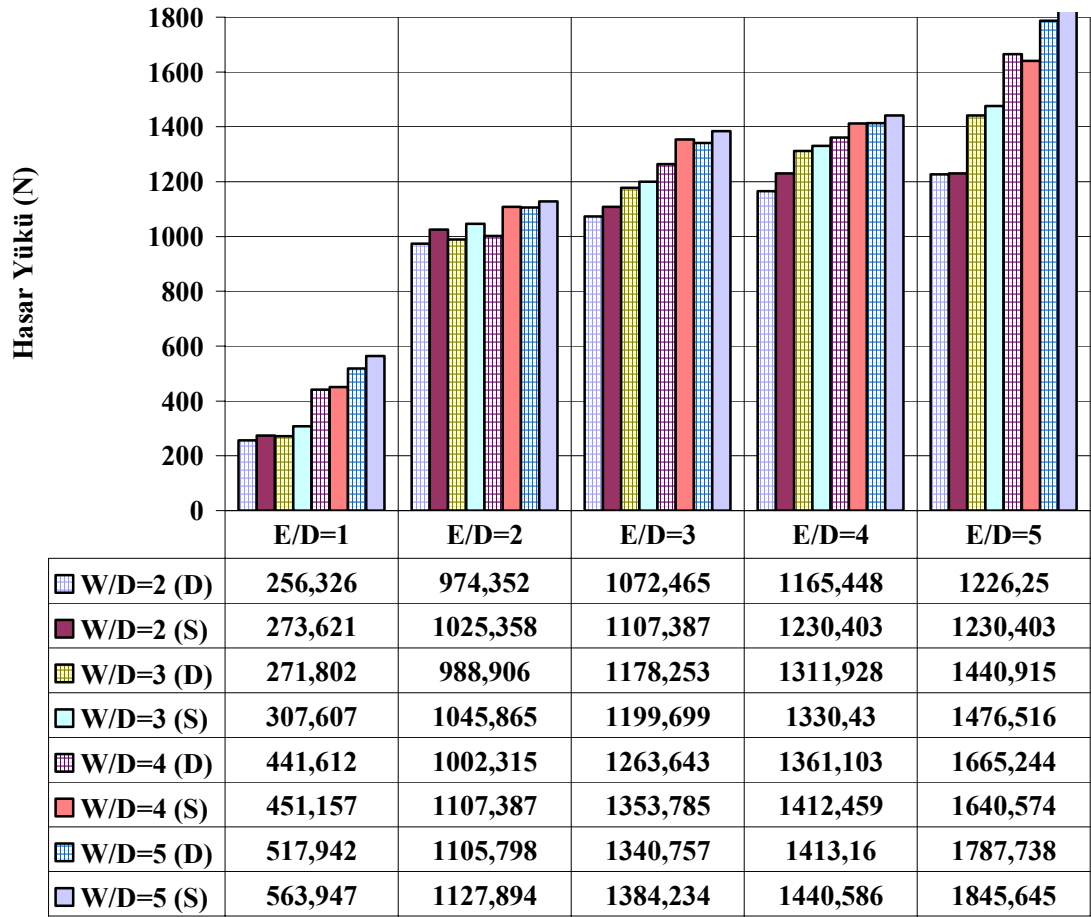


Şekil 7.32. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.32’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 341.715 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1723.478 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında en uzak sonuç E/D=3, W/D=3 için %13 fark ile elde edilirken en

yakın sonuç ise $E/D=4$, $W/D=4$ için % 1.9 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ]_4$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

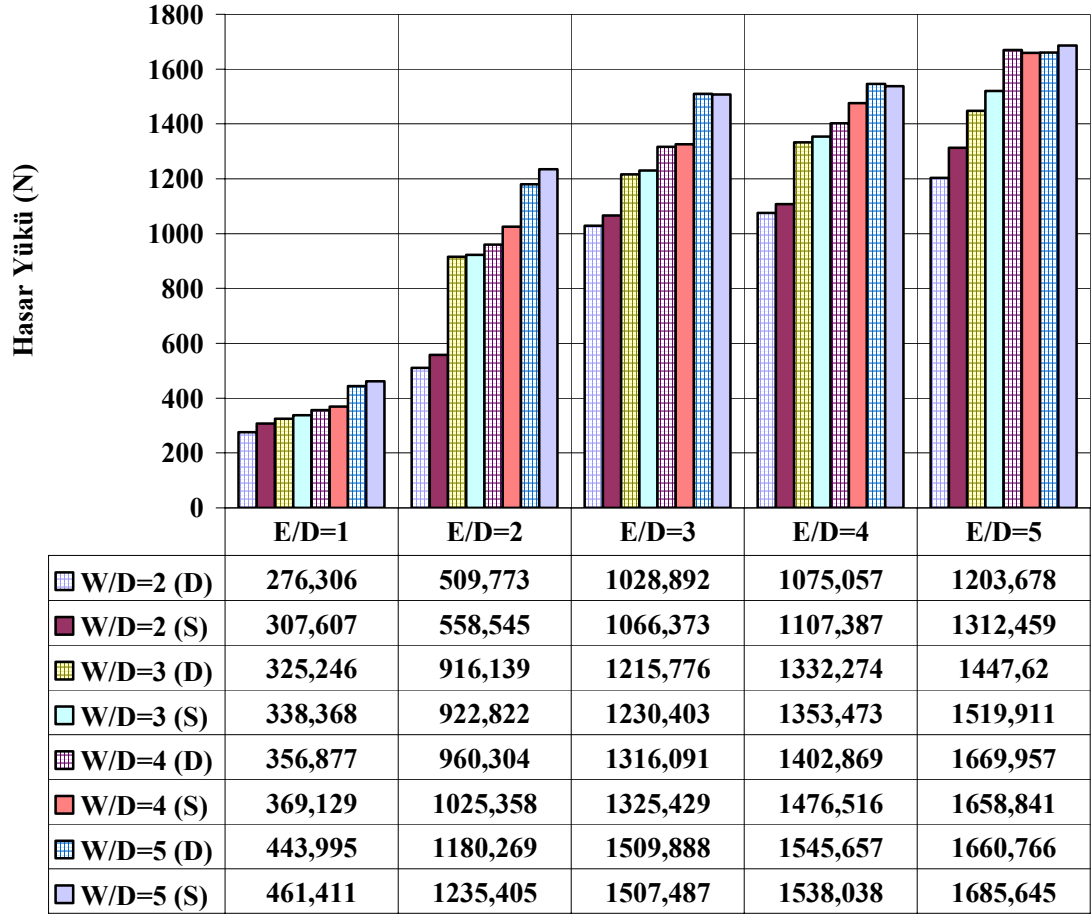
Şekil 7.33’de $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.33. $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.33’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü $E/D=1$, $W/D=2$ olan levha için 273.621 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise $E/D=5$, $W/D=5$ olan levha için 1845.645 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $E/D=1$, $W/D=3$ için %12 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=5$, $W/D=4$ için % 1.5 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/15^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

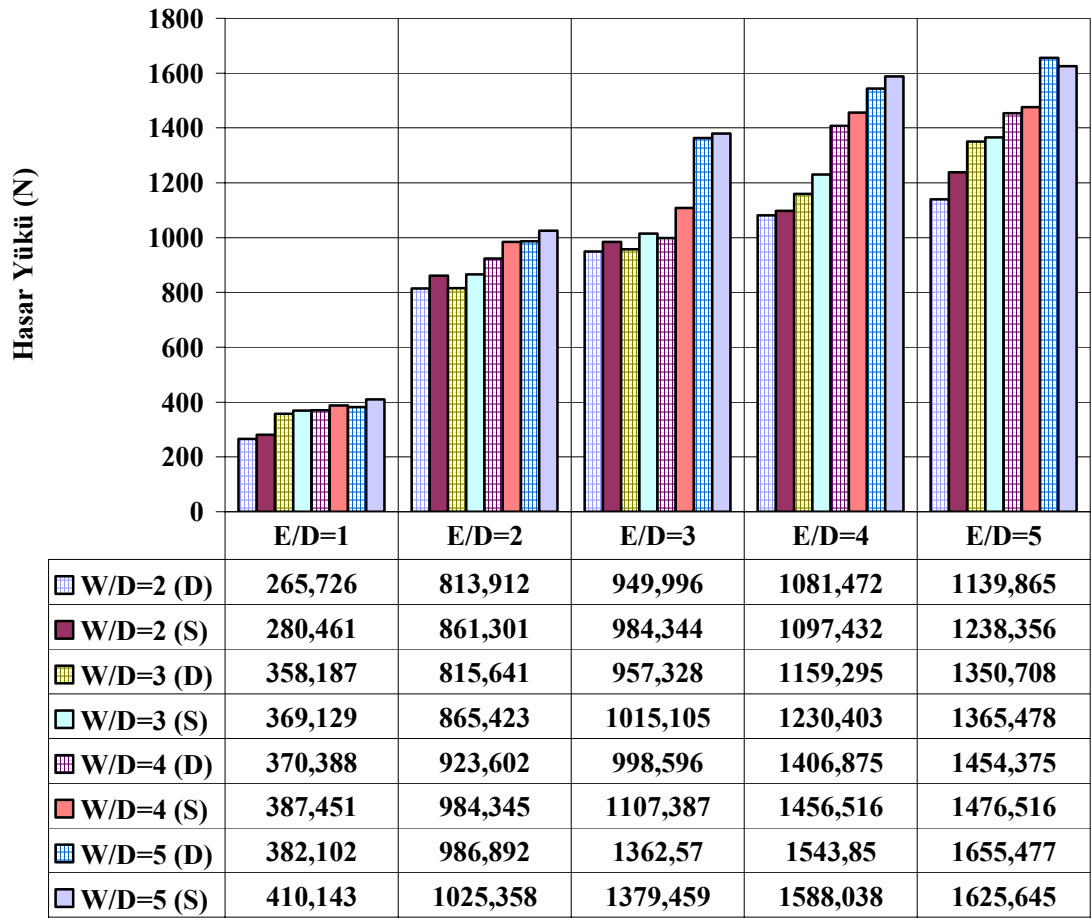
Şekil 7.34'de $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.34. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.34'den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 307.607 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1685.645 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=1, W/D=2 için %10 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3, W/D=4 için % 1.1 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/15^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

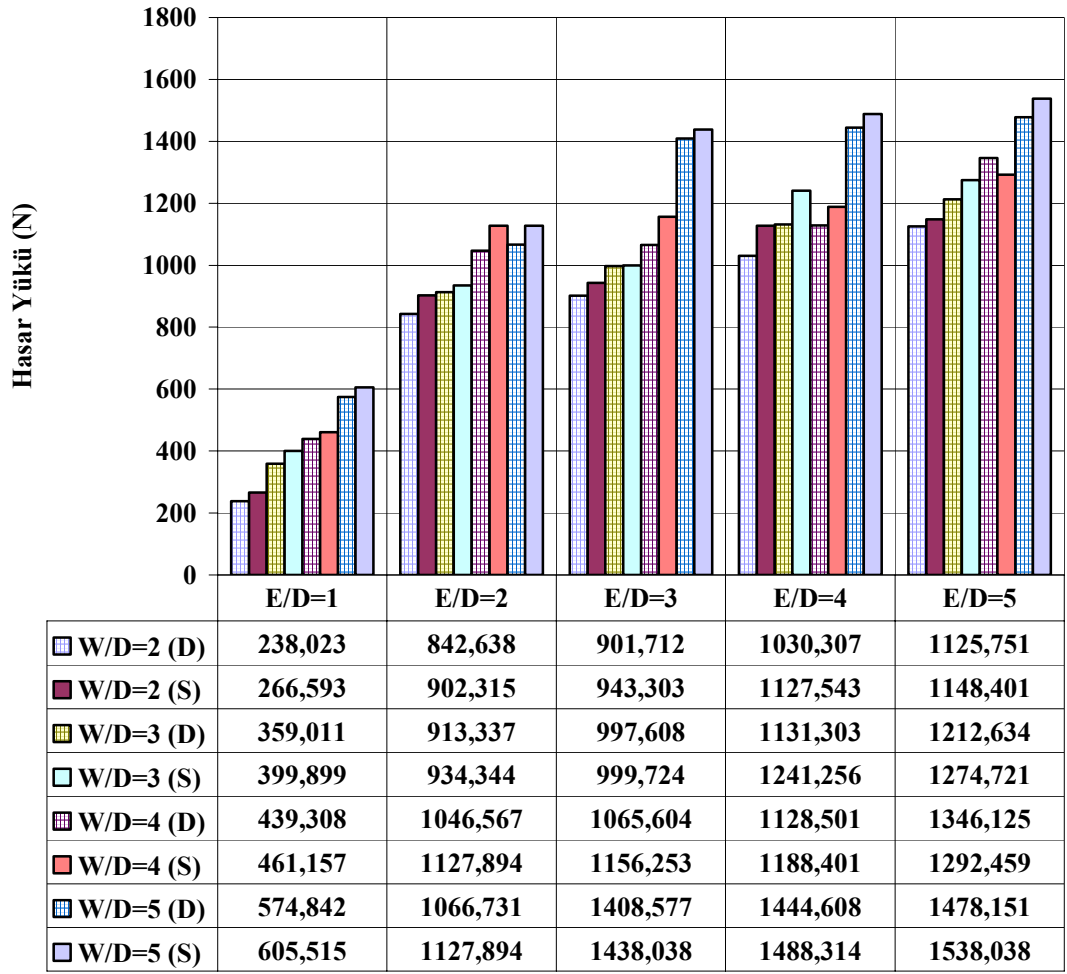
Şekil 7.35'de $[0^\circ/30^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.35. $[0^\circ/30^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.35’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 280.461 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1625.645 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=3, W/D=4 için %10 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5, W/D=5 için % 1.8 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/30^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

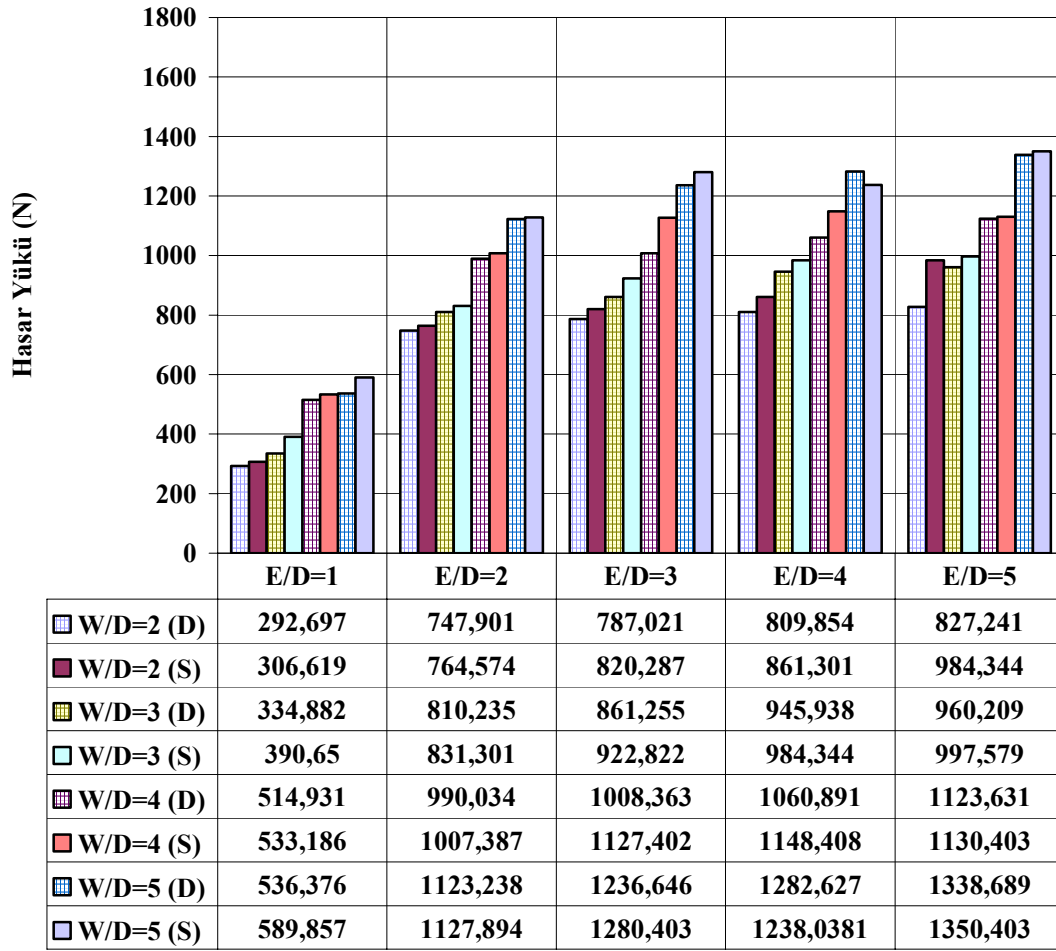
Şekil 7.36’da $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.36. $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.36'dan görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü $E/D=1$, $W/D=2$ olan levha için 280.461 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise $E/D=5$, $W/D=5$ olan levha için 1625.645 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşım oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $E/D=1$, $W/D=2$ için %10 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=3$, $W/D=3$ için % 1.09 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

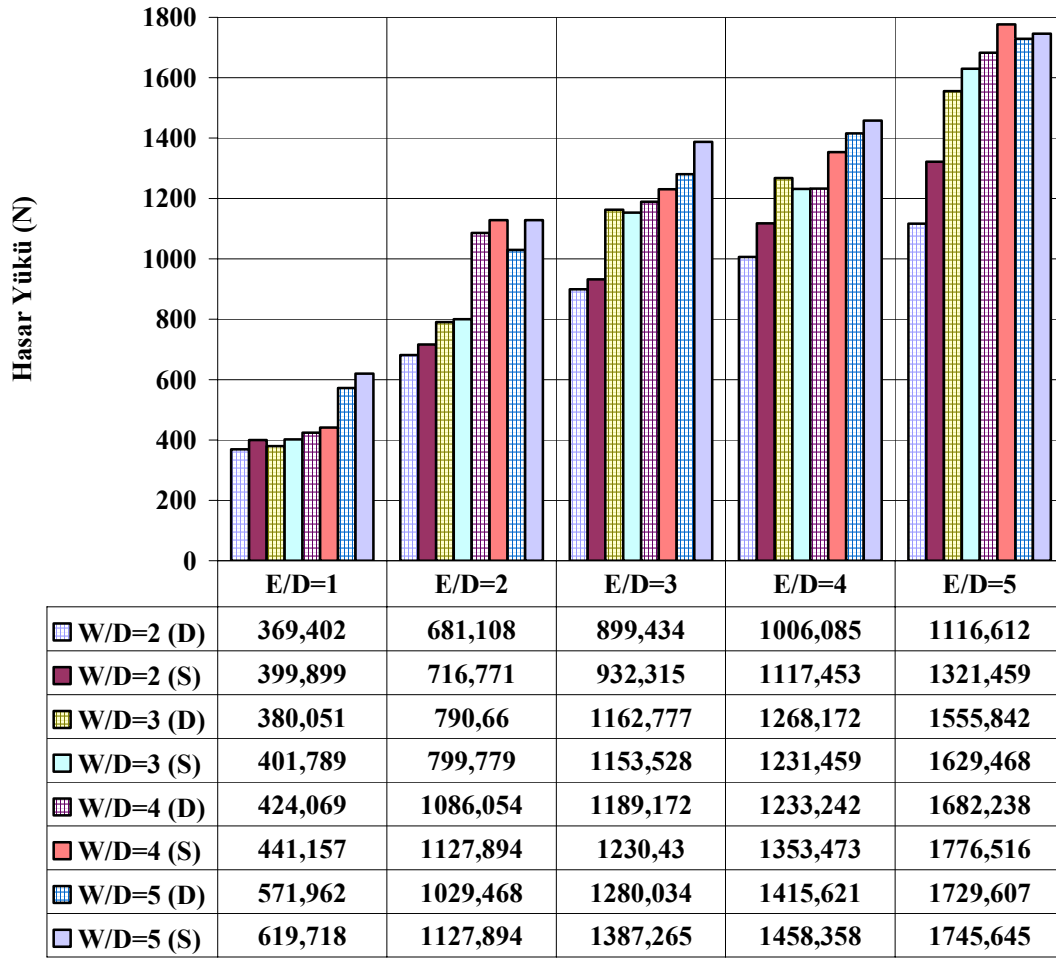
Şekil 7.37'de $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.37. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.37’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 306.619 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1350.43 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=5, W/D=2 için %16 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3, W/D=4 için % 3.6 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/45^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

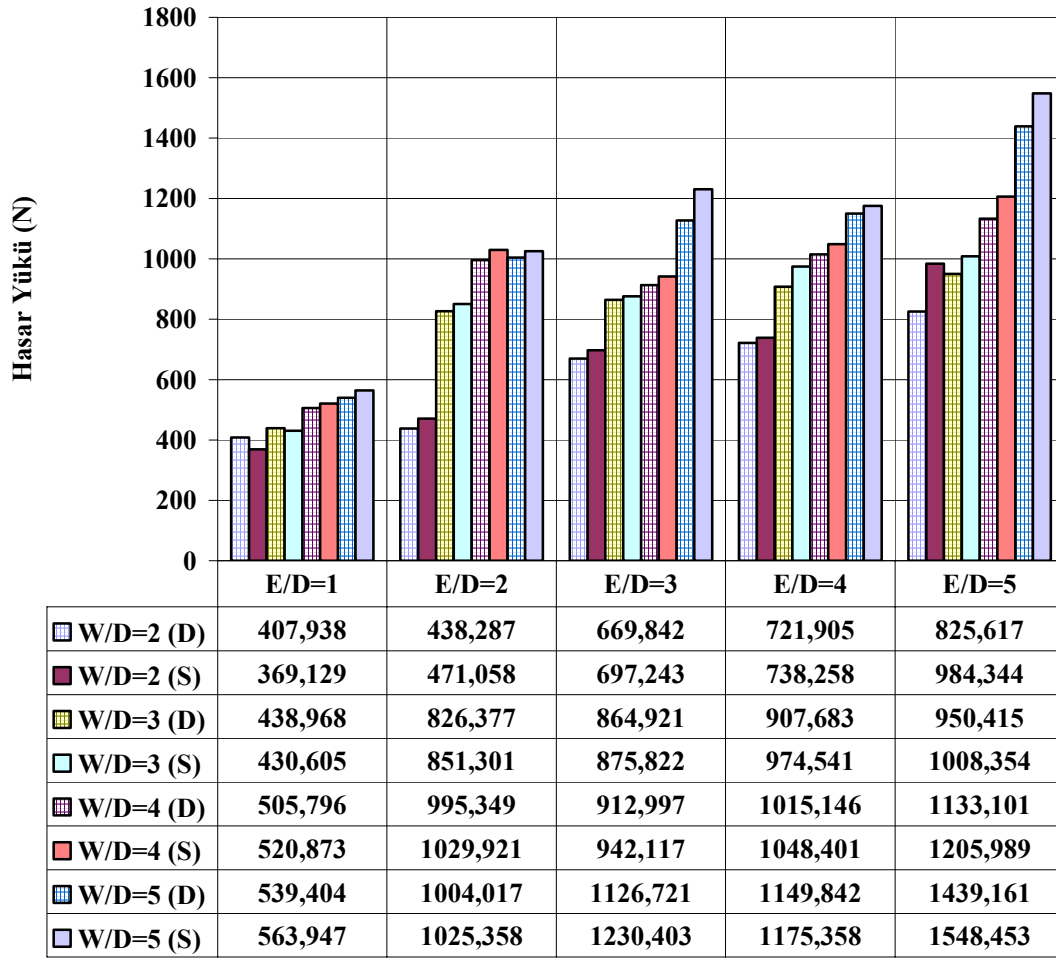
Şekil 7.38’de $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.38. $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.38'den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü $E/D=1$, $W/D=2$ olan levha için 399.899 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise $E/D=5$, $W/D=5$ olan levha için 1745.645 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç $E/D=5$, $W/D=2$ için %16 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise $E/D=3$, $W/D=3$ için % 1 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/45^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

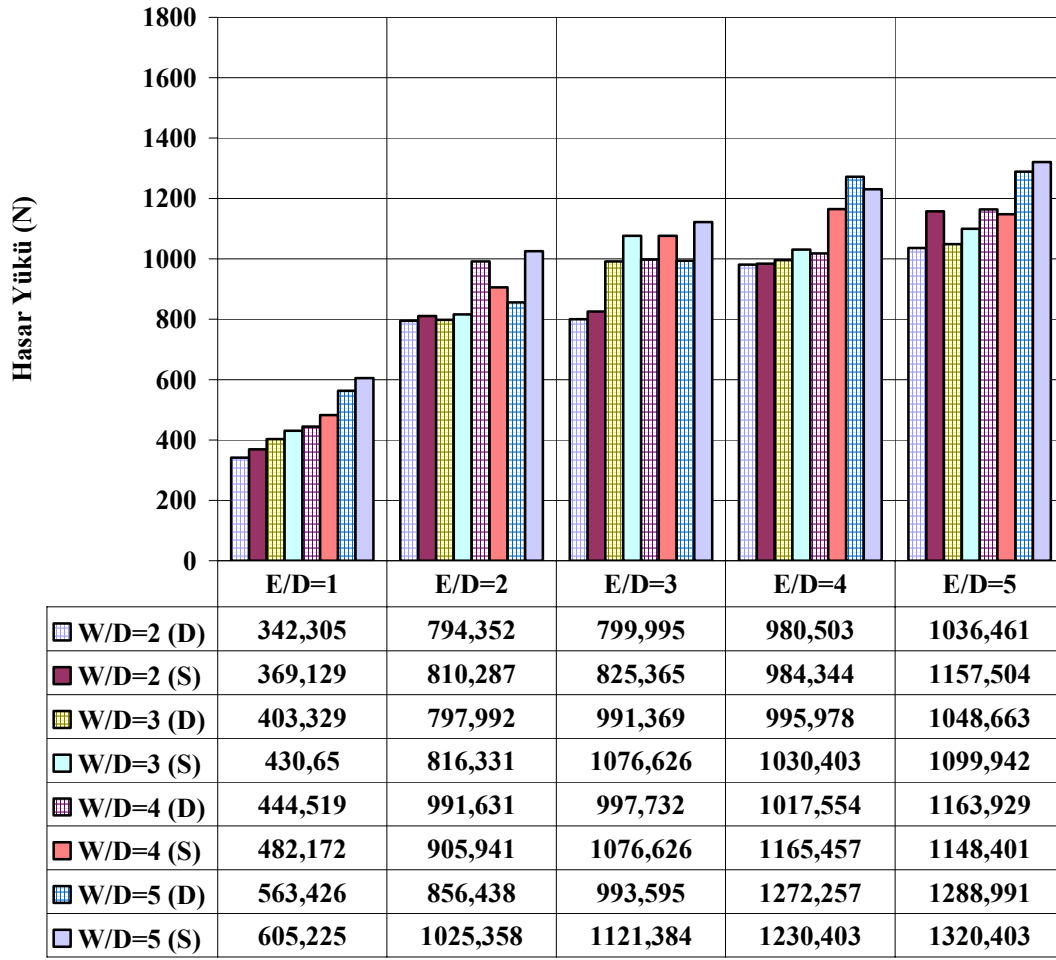
Şekil 7.39'da $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.39. $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.39'dan görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 369.129 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1548.453 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlar oranlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=5, W/D=2 için %17 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=1, W/D=3 için % 2 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/60^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

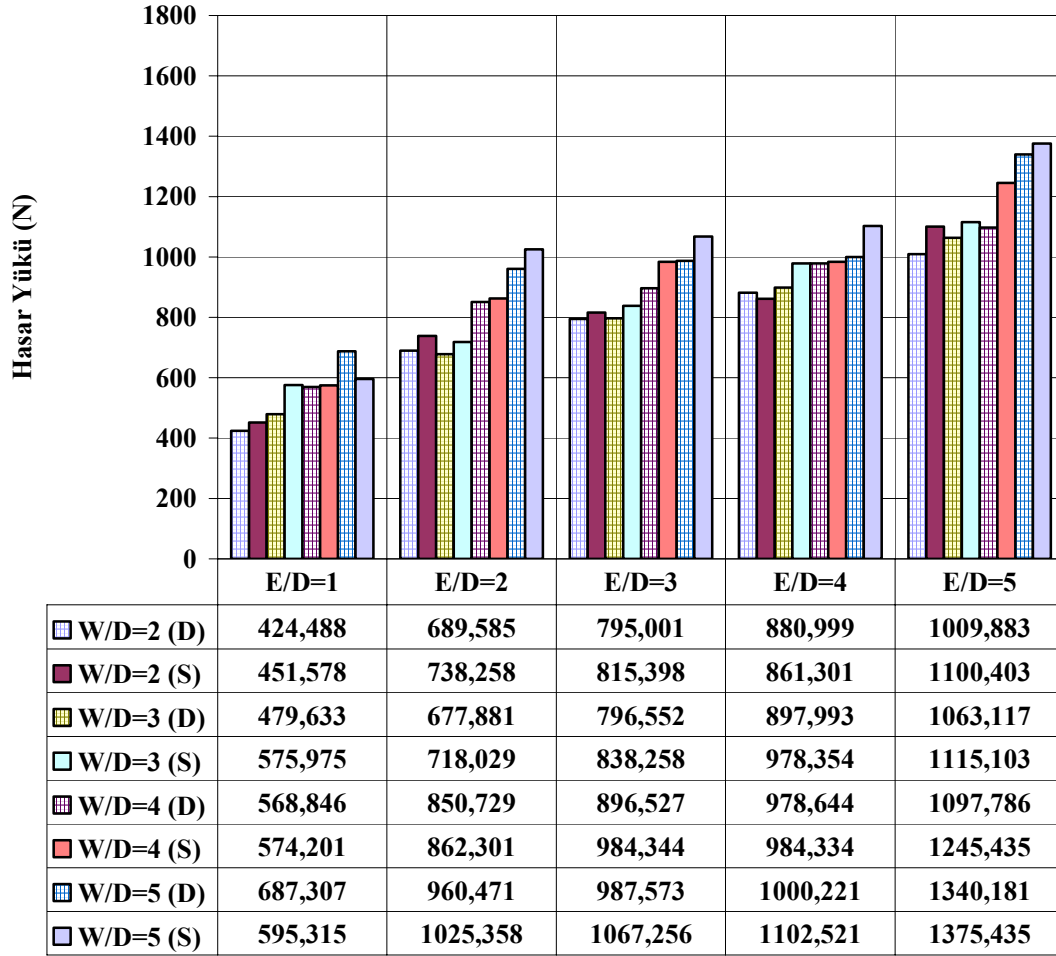
Şekil 7.40'da $[0^\circ/60^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.40. $[0^\circ/60^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.40'dan görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 369.129 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1320.430 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=5, W/D=2 için %11 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5, W/D=4 için % 1.3 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/60^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

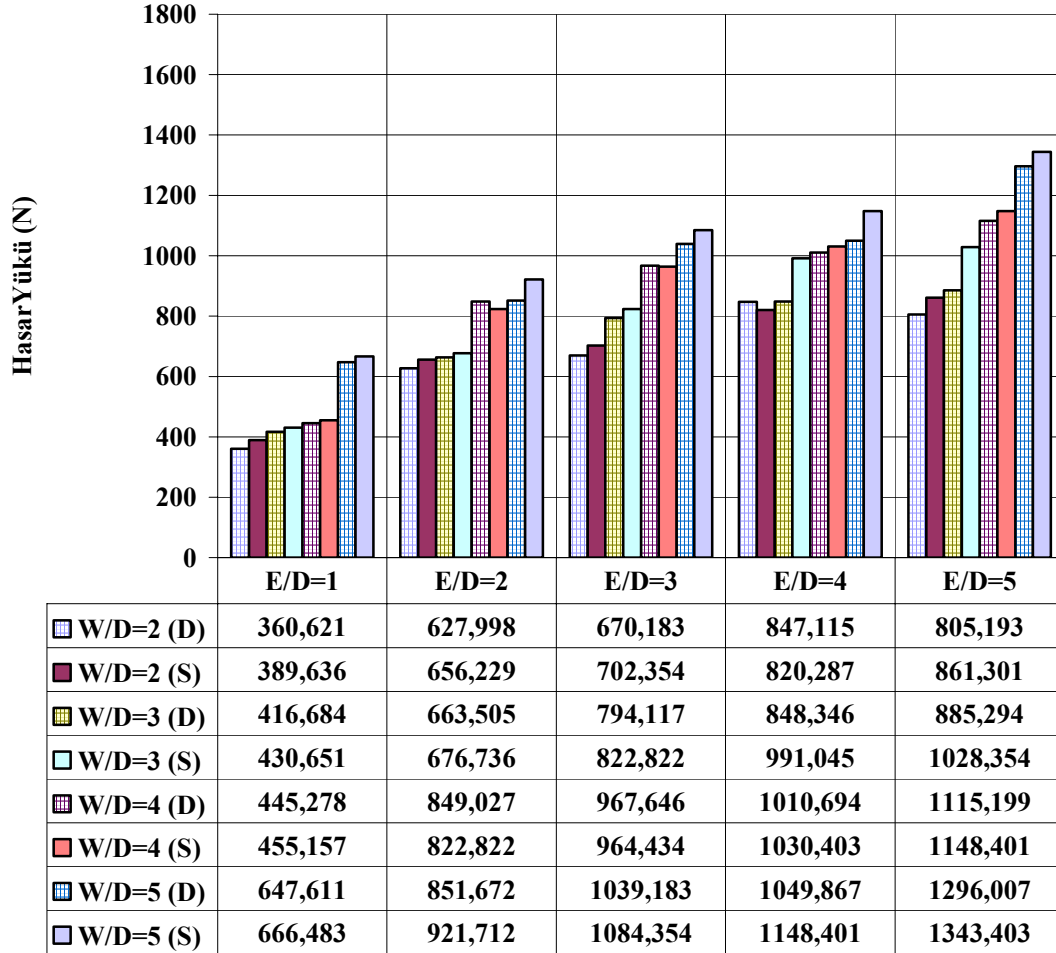
Şekil 7.41’de $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.41. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.41’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 451.578 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1375.435 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=5, W/D=2 için %12 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=5, W/D=4 için % 1.3 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/75^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

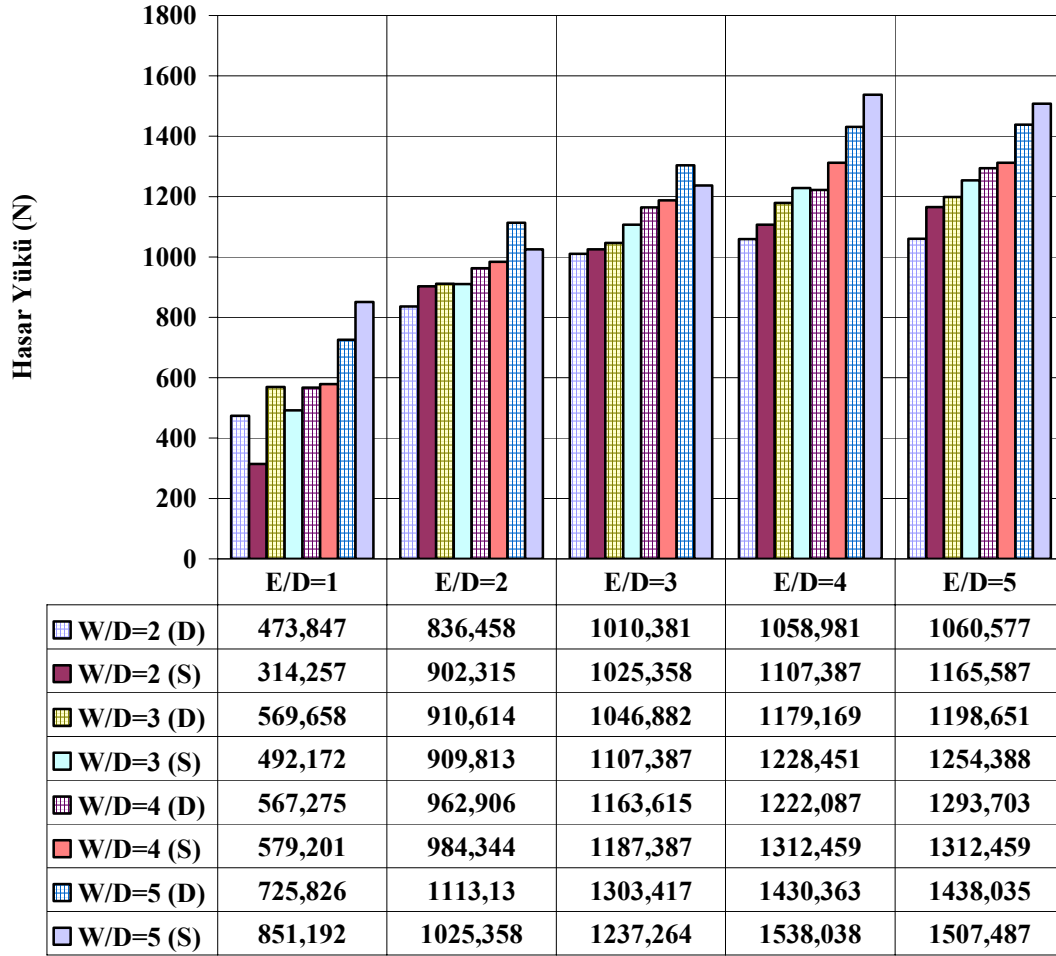
Şekil 7.42’de $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.42. $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.42’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 389.636 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1343.403 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=5, W/D=3 için %14 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=3, W/D=4 için % 1 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/75^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

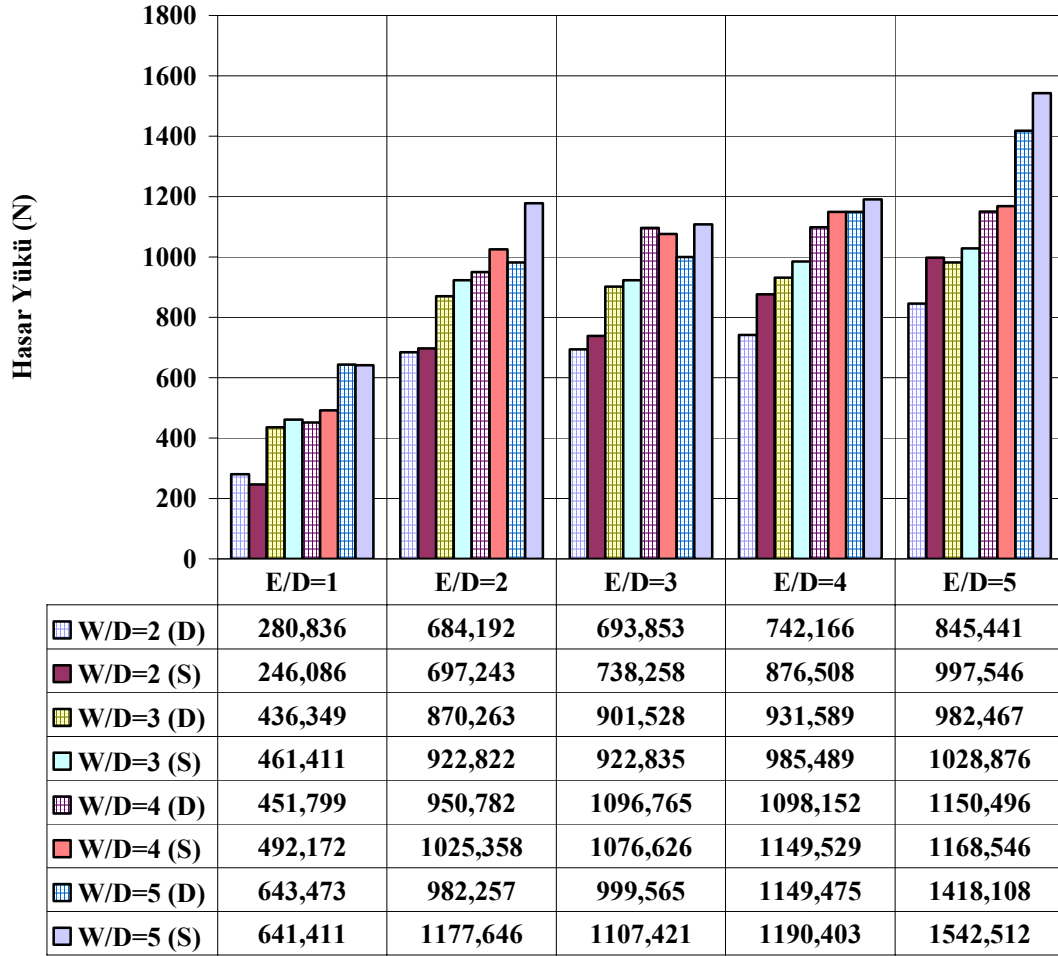
Şekil 7.43’de $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.43. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.43’den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 314.257 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1507.487 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=1, W/D=5 için %15 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=1, W/D=3 için % 1.3 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/90^\circ]_s$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

Şekil 7.44'de $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada sayısal olarak elde edilmiş hasar yüklerinin deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 7.44. $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabakalı kompozit levhada deneysel ve sayısal olarak elde edilen hasar yüklerinin değişimi.

Şekil 7.44'den görüldüğü gibi en düşük sayısal hasar yükü E/D=1, W/D=2 olan levha için 246.086 N olarak elde edilmiştir. En büyük hasar yükü ise E/D=5, W/D=5 olan levha için 1542.512 N olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların bir birlerine yaklaşımlarına bakıldığında zaman en uzak sonuç E/D=1, W/D=2 için %14 fark ile elde edilirken en yakın sonuç ise E/D=1, W/D=5 için % 1 olarak elde edilmiştir. $[0^\circ/90^\circ]_2$ tabakalı kompozit levha için yapılan sayısal ve deneysel analiz sonuçlarının her ikisi de E/D ve W/D oranının artışına paralel olarak artış göstermektedir.

8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Çözülebilir bağlantılı tabakalı kompozit plakaların mekanik davranışlarının analizi için yapılmış olan deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Deneysel çalışma sonucunda deney numunelerinde hasar tipi olarak kesme ve ezilme hasarları gözlemlenmiştir. Yırtılma hasarına rastlanmamıştır. Bu durumun nedeni fiberlerin tek yönde takviye edilmiş olması ve tüm kompozit levhalarda iki tabakada 0° fiber takviye açısına sahip olmasından dolayıdır.
- Kesme ve yırtılma hasarlarında hasarın levha kenarındaki elemanlara ulaşması durumdaki yük son hasar yükü olarak, ezilme hasarında ise pim deliği kenarındaki elemanlarda meydana gelen hasarlı bölgenin uzunluğunun pim deliği yarı çapını aşması halindeki ilk yük değeri esas alınarak program sonlandırılmıştır.
- Geometrik parametrelerin (E/D ve W/D) değişimi hasar yüklerinin üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Deneysel ve sayısal çalışmalarda E/D ve W/D oranlarının artmasına bağlı olarak aynı fiber takviye açısı ve tabaka dizilimi için hasar yüklerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- E/D oranının en düşük değeri ($=1$) ve W/D oranının en düşük değeri ($=2$) için en düşük hasar yükü $[0^\circ/30^\circ]_2$ tabaka dizilimine sahip levhada deneysel hasar yükü 238.023 N ve sayısal hasar yükü ise 266.509 N olarak elde edilirken aynı tabaka dizilimine sahip levhadan E/D oranının en büyük değeri (E/D=5 ve W/D= 2 olmak üzere) deneysel hasar yükü 1125.751 N ve sayısal hasar yükü ise 1148.401 N olarak gerçekleşmiştir. Aynı fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip kompozit levhalar için E/D oranının artmasına bağlı olarak hasar yüklerinin de doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. W/D oranının en büyük değeri (W/D= 5 ve E/D= 1 olmak üzere) deneysel hasar yükü 574.842 N ve sayısal hasar yükü ise 605.515 N olarak gerçekleşmiştir. Aynı fiber takviye açısı ve tabaka dizilimine sahip kompozit levhalar için W/D oranının artmasına bağlı olarak hasar yüklerinin de doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür.
- Deneysel ve sayısal çalışmalarda geometrik parametrelerden E/D oranının hasar tipi üzerinde belirleyici etkisi olduğu görülmektedir. Çalışmaların sonucunda ortaya çıkan hasar tipleri incelendiği zaman E/D oranının 1 ve 2 değerleri için levhalarda kesme hasarı ve 3, 4 ve 5 değerleri içinse ezilme hasarı meydana gelmiştir. E/D oranının sabit tutularak W/D oranının arttırılması durumunda ise hasar tipinin aynı kaldığı gözlemlenmiştir.

- Simetrik ve anti-simetrik tabaka diziliminin hasar yükleri üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. En büyük hasar yükünün $[0^\circ/15^\circ]$ simetrik tabaka dizilimine sahip plakada deneysel 1729.607 N olarak, sayısal çözümde ise 1745.645 N olarak elde edilmiştir. Aynı tabaka dizilimine sahip anti-simetrik levhada ise deneysel 1660.766 N ve sayısal hasar yükü ise 1685.645 N olarak elde edilmiştir. Aynı fiber takviye açısına sahip olmasına karşı simetrik tabaka dizilimindeki yük değeri yaklaşık %4 daha büyük olarak elde edilmiştir.
- Tabaka dizilimin hasar tipi üzerinde etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Aynı fiber takviye açısına sahip numunelerde farklı tabaka dizilimlerinde hasar yüklerinin değişmesine rağmen hasar tipi değişmemektedir.
- Fiber takviye açısının geometrik parametrelerin değişimine bağlı olarak hasar yükü üzerinde değişik etkileri olduğu çalışmada ilgili bölümde verilmiştir.
- Sayısal çalışmada en düşük yakınsama oranı % 1 olarak gerçekleşirken en büyük yakınsama oranı ise %17 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu oranların literatürde yer alan değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür [4]. Yakınsama oranları arasındaki farklılıkların deney numunelerindeki üretim kusurlarından, deney hatalarından vb. kaynaklandığı kabul edilebilir.
- Sayısal analizde APDL kodları kullanılarak hazırlanmış olan program iki bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde katı model özellikleri, sonlu elemanlara bölme ve sınır şartları girilmiş ve ikinci bölümde ise ilerlemeli hasar analizi yapılmıştır. İlerlemeli hasar analizi geometrik parametrelere ve sınır şartlarına bağlı olmadığından farklı problemlerin çözümünde kullanılması mümkün olmaktadır.
- Yapılan çalışma mekanik özellikleri farklı kompozit malzemeler, farklı çözülebilir bağlantı türleri, çoklu bağlantılar ve tek tesirli bağlantılar için uygulanabilecek ve ileride yapılan bu tür çalışmalara örnek olacaktır.

9. KAYNAKLAR

1. Dano, M.L., Gendron, G., Picard, A., 2000, Stres and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates, *Composite structures*, 50, 287-296.
2. Camanho P.P., Matthews, F.L., 1997, Stres analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP : a rewiev , *Composites*, 1997, 28.2A, 529- 547.
3. Tserpes, K.I., Papanikos, P., Kermanidis, T.H., 2001, A three dimensional prograssive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading, *Fatigue Fracture Engineerings Materials Structure*, 24, 663 – 675.
4. İçten B.M., Karakuzu, R., 2002, Prograssive failure analysis of pin loaded carbon-epoxy woven composite plates, *Composites Science and Technology*, 62, 1259-1271.
5. Whitvorth , H.A., Othieno, M., Barton, O., 2003, Failure analysis of composite pin loaded joints, *Composite Structures*, 59, 261- 266.
6. McCarthy, M.A., McCarthy, C.T., Lawlor, V.P., Stanley, W.F., 2005, Three dimensional finite element analysis of single bolted joints: part I- model development and validation, *Composite Structures*, 71, 140-158.
7. İçten B.M., Sayman O., 2003, Failure analysis of pin – loaded aliminum glass epoxy sandwich composite plates, *Composite Science and Technology*, 63, 727-737.
8. Echavarria, C., Haller, P., 2007, Slaenikowich, A., Analytical Study of a pin loaded hole in elastic orthotropic plates, *Composite Structures*, 79, 107 – 112.
9. Aktaş, A, 2005, Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading, *Composite Structures*, 67, ,485-489, vol 67.
10. Okutan, B., 2001, Stres and failure analysis of laminated composite pinned joints, *Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 174 s.

11. Camanho P.P., Lambert, M., 2006, A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials, *Composite Science and Technology*, 66, 3004-3020.
12. Aktaş, A., Dirikolu, H., 2004, An experimental and numerical investigation of strength characteristics of carbon epoxy pinned joints plates, *Composites Science and Technology*, 64, 1605-1611.
13. Karakuzu, R., Gülem, T., İçten B.M., 2006, Failure analysis of woven laminated glass-vinylester composites with pin loaded hole, *Composite Structures*, 72, 27-32.
14. Okutan B., Karakuzu, R., 2003, The strength of pinned joints in laminated composites, *Composite Science and Technology*, 63, 893-905.
15. Yılmaz, T., Sınmazçelik T., 2007, Investigation of load bearing performances of pin connected carbon/polyphenylene sulphide composites under static and dynamic loading conditions, *Materials & Design*, 28, 520-527.
16. Karakuzu, R., Çalışkan C.R., Aktaş, M., İçten, B.M., 2008, Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin loaded holes, *Composite Structures*, 82, 225-234.
17. Pekbey, Y., 2007, Pim bağlantılı Tabakalı kompozit plakada ön gerilme momenti ile geometrik parametre değişiminin hasar analizine etkisi, 8. Uluslar arası kırılma konferansı, İstanbul, 554-562.
18. Whitworth, H.A., Aluko, O., Tomlinson N.A., 2008, Application of the point stress criterion to the failure of composite pinned joints, 75, 1829-1839.
19. Dursun, T., 2006, Cıvata Bağlantılı Tabakalı kompozit levhalarda Hasar Analizi, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 174 s.
20. Chang, K.Y., Liu, S., Chang, F.K., 1991, Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings, *Journal of Composite Materials*, 25, 274-301.

21. Tan, S.C., 1991, A Progressive Failure Model for Composite Laminates Containing Openings, *Journal of Composite Materials*, 25, 556-577.
22. Chang, F.K., Scott, R.A., Springer, G.S., 1984, Failure of composite laminates containing pin loaded holes-method of solution, *Journal of Composite Materials*, 18, 255-278.
23. Chang, F.K., Scott, R.A., Springer, G.S., 1984, Design of composite laminates containing pin loaded holes, *Journal of Composite Materials*, 18, 279-289.
24. Chang, F.K. and Chang, K.Y., 1987, A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations, *Journal of Composite Materials*, 21, 834-855.
25. Hyer, M.W., Klang E.C. and Cooper D.E., 1987, The Effects of Pin Elasticity, Clearance and Friction on the Stresses in a Pin-Loaded Orthotropic Plate, *Journal of Composite Materials*, 21, 190-206.
26. Yogeswaren, E.K., Reddy, J.N., 1988, A Study of Contact Stresses in pin-loaded orthotropic plates", *Computers & Structures*, 30, 1067-1077.
27. Jurf, R.A. and Vinson, J.R., 1990, Failure analysis of bolted joints in composite laminates, *Composite Materials: Testing and Design*, 9, 165-190.
28. Eriksson, I. 1990, On the bearing strength of bolted graphite/epoxy laminates, *Journal of Composite Materials*, 24, 1246-1269.
29. Lessard, L.B., Shokrieh, M.M., 1995, Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure, *Journal of Composite Materials*, 29, 671-697.
30. Chen W-H, Lee S-S, Yeh J-T., 1995, Three dimensional contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint, *Composite Structures*, 30, 287-97.

31. Wang, H.S., Hung, C.L., Chang, F.K., 1996, Bearing failure of bolted composite joints part I: experimental characterization, *Journal of Composite Materials*, 30, 1284-1313.
32. Hung, C.L. and Chang, F.K., 1996, Strength envelope of bolted composite joints under bypass loads, *Journal of Composite Materials*, 30, 1402-1435.
33. Kim, S.J., Hwang, J.S., 1998, Progressive failure analysis of pin-loaded laminated composites using penalty finite element method, *AIAA Journal*, 36, 75-80.
34. Ireman, T., 1998, Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints", *Composite Structures*, 43, 195-216.
35. Camanho PP, Matthews, F.L., 1999, A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates", *Journal of Composite Materials*, 33, 2248-2280.
36. Zhang, C., Ganesan, R. and Suong V.H., 2000, Effects of friction on three- dimensional contact stresses in pin-loaded laminated composites, *Journal of Composite Materials*, 34, 1382-1415.
37. Perugini, P., Riccio, A., Scaramuzzino, F., 2001, Three-dimensional progressive damage analysis of composite joints, *Proceedings of the Eighth Int. Conf. On Civil and Structural Eng. Computing*, 62, 20-30.
38. Sun, H.T., Chang, F.K., Qing, X., 2002, The response of composite joints with boltclamping loads, part I: model development", *Journal of Composite Materials*, 36, 47-67.
39. Sun, H.T., Chang, F.K., Qing, X. 2002, The response of composite joints with boltclamping loads, part II: model verification, *Journal of Composite Materials*, 36, 69-92.
40. Lawlor, V.P., McCarthy, M.A., Stanley, W.F., 2002, Experimental study on the effects of clearance on single-bolt, single-shear, composite bolted joints, *Journal of plastics, Rubber and Composites*, 31, 405-411.

41. McCarthy, M.A. and McCarthy, C.T., 2002, Finite element analysis of the effects of clearance on single-shear, composite bolted joints, *Journal of Plastics, Rubber and Composites*, 32, 65-70.
42. Padhi, G.S., McCarthy, M.A., McCarthy, C.T., 2003, BOLJAT - a tool for designing composite bolted joints using three-dimensional finite element analysis, *Composites*, 33, 1573-1584.
43. Kelly, G. and Stefan Hallström, 2004, Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance, *Composites*, 35, 331-343.
44. Riccio, A. and Scaramuzzino, F., 2002, Influence of damage onset and propagation on the tensile structural behaviour of protruding composite joints, 4th GRACM congress on Computational Mechanics, 10, 50-64.
45. Xiao, Y., Ishikawa, T., 2005, Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints, *Composite Science and Technology*, 65, 1032 – 1043.
46. Liu, D., Hou, L., 2003, Three dimensional size effects in composite pin joints, *Experimental Mechanics*, 43, 115-123.
47. Karakuzu R., Çalışkan, C., Aktaş, M., İçten, B., 2008, Failure behavior of laminated composite plates with two serial pin – loaded holes, *Composite Structures*, 82, 225-234.
48. Caprino, G., Giorleo, G., Nele, L., Squillace, A., 2002, Pin bearing strength of glass mat reinforced plastics, *Composites*, 33, 779-785.
49. Tercan M., Asi, O., Aktaş, A., 2007, An experimental investigation of the bearing strength of weft-knitted 1x1 rib glass fiber composites, *Composite Structures*, 78, 392-396.

50. Okutan, B., Aslan. Z., Karakuzu R., 2001, A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-fiber reinforced epoxy laminate, Composite Structures, 61, 1491-1497.
51. Dano, M.L., Kamal, E., Gendron, G., 2007, Analysis of bolted joints in composite laminates: Strains and Bearing stiffness predictions, 79, 562-570.
52. Gür, M. ve Turgut, A., 1991, Farklı iki malzemeden meydana gelen ve sıcaklık etkisine maruz düzlem levhalarda ısı gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi, 5. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu.
53. A., TURGUT ve M., GÜR, 1994, Statik Sürtünmeli Temas Problemlerinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümü, Tr. Journal of Engineering and Environmental Sciences, 18, 119-125.
54. Aydın TURGUT, Nuray ARSLAN, Mete Onur KAMAN, Nurettin ARSLAN , 2000, Düzlem Kafes Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi , Fırat Üniv. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi , 12, 209-217.
55. Gür, M., Turgut, A., ve Sancaktar, E., 1995, The effect of fiber type on the level of stress concentration created in filleted composite rectangular bars in bending, International mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME, 49-55.
56. Hoa, S., V., 1975, Computer aided design of polymer matrix composite structures, CRC Pres Inc., 371 s.
57. Hoa, S., V., 2003, Composite materials design and applications, 2003, CRC Pres, 233 s.
58. Vinson, J., R., Chou, TsuWei, 1975, Composite materials and their use in structures, Applied Science Publishers Ltd., 438 s.
59. Hull ,D, 1981, An introduction of composite materials, Applied science publishers Introduction of Composite Materials, Cambridge Univ. Pres Inc., 246 s.
60. Reddy, J., N., 1993, An introduction to the finite element method, Mc Graw Hill Book Comp., 684 s.
61. Ansys 11. (Academic Teaching Introductory) command References and gui.