



**ÇİFT SERİ PİM BAĞLANTILI DOKUMA
KARBON FİBER/EPOKSİ KOMPOZİT
LEVHALARDA HASAR ANALİZİ**

Mak. Müh. Caner DOĞAN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mete Onur KAMAN**

ARALIK 2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN
BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT SERİ PİM BAĞLANTILI DOKUMA KARBON FİBER/EPOKSİ KOMPOZİT
LEVHALARDA HASAR ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Caner DOĞAN
(171120101)

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Programı : Mekanik

Danışman: Doç. Dr. Mete Onur KAMAN

ARALIK-2018

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamda benden yardımlarını esirgemeyen büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle bana destek olan, yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm, bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendirerek araştırmaya yönelten kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mete Onur KAMAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez dönemim boyunca, bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR ve Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ' a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deney aşamasında yardımlarını esirgemeyen Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarının imkânlarından istifade etmemi sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Kadir TURAN' a teşekkürü bir borç bilirim. Ve arkadaşım Mehmet ÇELİKDEMİR'e deney sırasındaki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bütün hayatım boyunca bana maddi ve manevi yönden destek olan sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Caner DOĞAN

ELAZIĞ-2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
FAILURE ANALYSIS OF WOVEN CARBON FIBER/EPOXY COMPOSITE PLATES JOINTED WITH DOUBLE SERIES PINS	V
ABSTRACT.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XI
KISALTMALAR	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER	10
3.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ	10
3.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ	11
3.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DEZAVANTAJLARI	14
3.4. KOMPOZİT MALZEME ÇEŞİTLERİ VE MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ.....	14
3.5. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELER.....	15
3.6. KOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIM ALANLARI	16
3.7. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	18
3.8. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ.....	20
4. KOMPOZİT MALZEMELERDE HASAR ANALİZİ.....	26
4.1. MAKSİMUM ASAL GERİLME TEORİSİ.....	26
4.2. MAKSİMUM ASAL UZAMA TEORİSİ	27
4.3. HASHIN HASAR TEORİSİ	28
4.4. TSAI-WU HASAR TEORİSİ.....	29
4.5. HOFFMAN HASAR TEORİSİ.....	31
4.6. TSAI-HILL HASAR TEORİSİ	32
4.7. PUCK HASAR TEORİSİ.....	33
5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR	38
5.1. PROBLEMİN TANIMLANMASI	38
5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI	41

5.2.1. DELME İŞLEMİNİN YAPILMASI	41
5.3. DENEYLERİN YAPILIŞI	42
5.4. DENEYE AİT GRAFİKSEL SONUÇLAR	44
5.4.1. ÇENTİKSİZ, DAİRESEL DELİKLİ, YARIM DAİRE KENAR ÇENTİK, U KENAR ÇENTİK LEVHALARA AIT DENEY SONUÇLARI VE HASAR TIPLERİ	45
5.4.2. TEK PİM DELİKLİ LEVHALARA AIT DENEYSEL SONUÇLAR	49
5.4.3. ÇİFT PİM DELİKLİ $M/D=1.5, 2, 2.5$ VE $E/D=2$ OLAN LEVHALARA AIT DENEYSEL SONUÇLAR	52
5.4.4. ÇİFT PİM DELİKLİ $M/D=1.5, 2, 2.5$ VE $E/D=4$ OLAN LEVHALARA AIT DENEYSEL SONUÇLAR	55
5.5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRMASI	59
6. SAYISAL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR	60
6.1. PROBLEMİN TANIMI VE MODELİN OLUŞTURULMASI	60
6.2. SINIR ŞARTLARININ GİRİLMESİ	64
6.3. İLERLEMELİ HASAR ANALİZİNİN YAPILMASI	66
6.4. MALZEME İNDİRGEME KURALININ UYGULANMASI	67
6.5. GERİLME ANALİZİNE ELEMAN SAYISININ ETKİSİ	74
6.6. SAYISAL ÇALIŞMAYA AIT GRAFİKSEL SONUÇLAR	78
6.6.1. DAİRESEL DELİKLİ, YARIM DAİRE ÇİFT KENAR ÇENTİK, U KENAR ÇENTİK LEVHALARA AIT SAYISAL SONUÇLAR	78
6.6.2. TEK PİM DELİKLİ LEVHALARA AIT DENEYSEL SONUÇLAR	82
6.6.3. ÇİFT PİM DELİKLİ $M/D=1.5, 2, 2.5$ VE $E/D=2$ OLAN LEVHALARA AIT DENEYSEL SONUÇLAR	86
6.6.4. ÇİFT PİM DELİKLİ $M/D=1.5, 2, 2.5$ VE $E/D=4$ OLAN LEVHALARA AIT DENEYSEL SONUÇLAR	90
6.7. HASARA UĞRAMIŞ NUMUNELERİN DENEYSEL ÇALIŞMALARLA OLAN BENZERLİK ORANI	94
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	97
8. KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ	106

ÖZET

Bu çalışmada, seri pim bağlantılı kompozit levhaların mekanik davranışlarının analizi deneysel ve sayısal olarak yapılmıştır. Tek ve çift seri pim bağlantılarının kullanıldığı çalışmada epoksi reçine matrisli ve örgülü karbon fiberler ile takviye edilmiş tabakalı kompozit levhalar kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmada geometrik parametrelerin (E/D , W/D , M/D) levhanın mekanik davranışına etkisi incelenmiştir. Geometrik parametreler; pim deliği merkezi ile levha kenarı arasındaki uzunluğun (E), pim deliği çapına (D) oranı $E/D= 2,3,4$ ve 5 , iki pim arasındaki uzaklığın (M), pim delik çapına (D) oranı $M/D=1.5,2$ ve 2.5 ve levha genişliği (W) ile pim deliği çapının oranı ise $W/D = 3.33$ şeklinde seçilerek çözüm yapılmıştır. Sayısal çalışma, *Ansys* sonlu elemanlar paket 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* ve *Puck* hasar teorisi, malzeme indirgeme kuralları ile birlikte kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel çalışma sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu ve mekanik davranışların geometrik parametrelere bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tabakalı kompozit, ilerlemeli hasar analizi, sonlu elemanlar yöntemi, seri pim bağlantısı, çekme testi.

ABSTRACT

FAILURE ANALYSIS OF WOVEN CARBON FIBER/EPOXY COMPOSITE PLATES JOINTED WITH DOUBLE SERIES PINS

In this study, serial pin jointed composite plates of mechanical behaviors of analysis is studied as experimentally and numerically. This study which is used single and double pin joint, is used epoxy resin matrix and woven carbon fiber reinforced composite plates is used. In experimental and numerical study, geometric parameters (E/D , W/D , M/D) which are effect of mechanical behavior are analyzed. Geometric parameters with central of pin joint and length of plate edge (E), to pin joint diameter (D) rate $E/D=2,3,4$ and 5, distance between two pins (M), to pin joint diameter rate $M/D=1.5,2$ and 2.5 and width of plate (W) to pin joint diameter rate $W/D :3.33$ are solved by selected. In numerical study, finite element packed program by using progressive failure analysis is analyzed. Numerical results that subprogram and *Ansys* program which are written by using *APDL* codes which studied are obtain. In progressive failure analysis method, *Hashin* and *Puck* failure theory, are used with material degradation rules. Results of numerical and experimental study are compatible it is observed that mechanical behaviors change with joint geometric parameters.

Keywords: Laminated composite, progressive failure analysis, finite elements method, serial pin connected, tension test

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Kompozit yapı türleri.....	11
Şekil 3.2. Elyaf ve matris malzemelerin gerilme-uzama diyagramı [41]	12
Şekil 3.3. Malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin zamanla değişimi [42]	13
Şekil 3.4. Airbus A 380 yolcu uçağında karbon-epoksi uygulamaları [56].....	16
Şekil 3.5. Karbon-epoksi ile yapılmış bir uydu gövdesi [56]	17
Şekil 3.6. Spor otomobil parçalarının karbon lifinden hazırlanması [55].....	17
Şekil 3.7. Otoklav fırınına konulan uçak parçası [59]	20
Şekil 3.8. Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi [47]	21
Şekil 3.9. Tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı şekilleri [46].	22
Şekil 3.10. Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmesi muhtemel hasar tipleri (a- Yırtılma hasarı, b- Kesme hasarı, c- Ezilme hasarı, d- Yırtılma + Kesme hasarı) [48,49]	24
Şekil 4.1. Üç boyutlu gerilme sistemi.....	27
Şekil 4.2. A, B ve C hasar modlarında ($\sigma_1 = 0$) için (σ_2, τ_{12}) kırılma eğrisi [38, 50].....	36
Şekil 4.3. Mod C kırılma düzlemi üzerinde normal ve kayma gerilmesi durumu [38, 50]	37
Şekil 5.1. Çentiksiz tabakalı kompozit numune.....	38
Şekil 5.2. Dairesel delikli tabakalı kompozit numune	38
Şekil 5.3. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numune.....	39
Şekil 5.4. U kenar çentikli tabakalı kompozit numune	39
Şekil 5.5. Tek pim delikli tabakalı kompozit numune	39
Şekil 5.6. Çift pim delikli tabakalı kompozit numune	39
Şekil 5.7. Pim deliği açma işlemi.....	41
Şekil 5.8. Kompozit malzemenin destek aparatı yardımıyla yüklenmesi	43
Şekil 5.9. Çekme cihazı ve kayıt bilgisayarı.....	43
Şekil 5.10. Bilgisayar ekranından alınan grafik	44
Şekil 5.11. Çentiksiz tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	45
Şekil 5.12. Çentiksiz tabakalı kompozit numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	45
Şekil 5.13. Dairesel delikli tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	46
Şekil 5.14. Ortasında daire deliğe sahip numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	46
Şekil 5.15. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	46
Şekil 5.16. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numunenin deney öncesi, deney	

sonrası ve hasar tipi görünümü	47
Şekil 5.17. U kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği ...	47
Şekil 5.18. U kenar çentikli tabakalı kompozit numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.....	47
Şekil 5.19. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi.....	48
Şekil 5.20. $E/D=2$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	49
Şekil 5.21. $E/D=2$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	49
Şekil 5.22. $E/D=3$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	49
Şekil 5.23. $E/D=3$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	50
Şekil 5.24. $E/D=4$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	50
Şekil 5.25. $E/D=4$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	50
Şekil 5.26. $E/D=5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	51
Şekil 5.27. $E/D=5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	51
Şekil 5.28. Tek pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi.....	51
Şekil 5.29. $E/D=2$, $M/D=1.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	52
Şekil 5.30. $E/D=2$, $M/D=1.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	53
Şekil 5.31. $E/D=2$, $M/D=2$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	53
Şekil 5.32. $E/D=2$, $M/D=2$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	53
Şekil 5.33. $E/D=2$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	54
Şekil 5.34. $E/D=2$, $M/D=2.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	54
Şekil 5.35. Çift pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi ($E/D=2$)	54
Şekil 5.36. $E/D=4$, $M/D=1.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	55

Şekil 5.37. $E/D=4$, $M/D=1.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	56
Şekil 5.38. $E/D=4$, $M/D=2$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	56
Şekil 5.39. $E/D=4$, $M/D=2$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	56
Şekil 5.40. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numune için kuvvet-yer değiştirme grafiği	57
Şekil 5.41. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü	57
Şekil 5.42. Çift pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi ($E/D=4$)	57
Şekil 5.43. Levhaların maksimum hasar yüklerinin genel olarak karşılaştırılması	59
Şekil 6.1. Anahtar noktaların oluşturulması	61
Şekil 6.2. Pim deliğinin oluşturulması.....	61
Şekil 6.3. Pim deliğinin detaylı gösterimi.....	61
Şekil 6.4. <i>Solid186</i> elemanı [51]	62
Şekil 6.5. Kompozit levhaya ait lineer ortotropik malzeme özelliklerinin girilmesi.	62
Şekil 6.6. Sonlu elemanlara bölünmüş katı model.....	63
Şekil 6.7. Pim modellemesi için kullanılan üç metod: (a) Kosinüsoidal yük dağılımı metodu (b) radyal sınır şartı metodu (c) temas elemanları kullanımı metodu [52]	64
Şekil 6.8. Pim temas yüzeyinin seçilmesi	65
Şekil 6.9. Sınır şartlarının oluşturulması.....	66
Şekil 6.10. İlerlemeli hasar analizi için yazılan program döngüsü [57]	70
Şekil 6.11. Reaksiyon kuvvetlerinin farklı uzama aralıkları için yer değişimi ilişkisi.....	74
Şekil 6.12. Reaksiyon kuvvetlerinin delik kenarı boyunca farklı eleman uzunlukları için yer değişimi ilişkisi	75
Şekil 6.13. Delik çevresinde meydana gelen nihai fiber çekme hasarları	75

Şekil 6.14. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği	79
Şekil 6.15. Dairesel delikli tabakalı kompozit numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	80
Şekil 6.16. U kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	81
Şekil 6.17. Levhaların maksimum hasar yüklerinin pim delik yerlerine göre değişimi	81
Şekil 6.19. $E/D=3$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.	83
Şekil 6.20. $E/D=4$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.	84
Şekil 6.21. $E/D=5$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.	85
Şekil 6.22. Tek pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin E/D oran değişimine göre değişimi.....	86
Şekil 6.23. $E/D=2$, $M/D=1.5$ olan çift pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği	86
Şekil 6.24. $E/D=2$, $M/D=2$ olan çift pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	87
Şekil 6.25. $E/D=2$, $M/D=2.5$ olan çift pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği	88
Şekil 6.26. Levhaların maksimum hasar yüklerinin pim deliği konumuna göre değişimi	89
Şekil 6.27. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	91
Şekil 6.28. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	92
Şekil 6.29. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	93
Şekil 6.30. Çift pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin farklı M/D oranlarına göre değişimi ($E/D=4$)	93

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri [41]	13
Tablo 3.2. Matris, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri [41]	15
Tablo 4.1. Kompozit malzeme için fiber özellikleri [54]	35
Tablo 4.2. Puck eğim parametreleri [40]	35
Tablo 5.1. Delikli, deliksiz ve çentikli numunelerine ait geometrik boyutlar	39
Tablo 5.2. Tek ve çift pim delikli numunelerine ait fiziksel özellikler.....	40
Tablo 5.3. Tek ve çift pim delikli numunelere ait gösterimler	40
Tablo 5.4. Çentikli numuneye ait gösterimler	41
Tablo 5.5. Tek ve çift pim delikli numunelere ait boyutlar	41
Tablo 5.6. Tabakalı kompozit malzemeye ait mekanik özellikler	42
Tablo 5.7. Çift pim delikli numunelere ait maksimum hasar yükü değeri ve hasar resimleri	58
Tablo 6.1. <i>Hashin</i> hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler	68
Tablo 6.2. <i>Puck</i> hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler	69
Tablo 6.3. Malzeme mekanik özellikleri için <i>Hashin</i> indirgeme kuralı	71
Tablo 6.4. Hasar tipleri için eleman indirgeme şartları [27]	73
Tablo 6.5. Maksimum reaksiyon kuvvetinin delik çevresi eleman uzunluğu ve uzama adımı ile değişimi.....	77
Tablo 6.6. Sayısal çalışmada kullanılan modellere ait eleman ve düğüm sayısı	78
Tablo 6.7. <i>Puck</i> ve <i>Hashin</i> hasar teorilerine göre elde edilen analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.....	96

SEMBOLLER LİSTESİ

c_1, c_2, c_3, c_4	: İntegral sabitleri
D	: Pim deliği çapı
E	: Pim delik merkezinin levha kenarına olan uzaklığı
E	: Elastisite modülü
E_p	: Levhanın elastisite modülü
G	: Kayma modülü
M	: İki daire merkezi arasındaki uzaklık
W	: Levha genişliği
L	: Levha boyu
Q	: İndirgenmiş katılık matrisi
R	: Yarıçap
S	: Kayma mukavemeti
X_c	: Takviye doğrultusundaki maksimum basma mukavemeti
X_t	: Takviye doğrultusundaki maksimum çekme mukavemeti
Y_c	: Takviyeye dik doğrultuda y eksenindeki maksimum basma mukavemeti
Y_t	: Takviyeye dik doğrultuda y eksenindeki maksimum çekme mukavemeti
Z_c	: Takviyeye dik doğrultuda z eksenindeki maksimum basma mukavemeti
Z_t	: Takviyeye dik doğrultuda z eksenindeki maksimum çekme mukavemeti
z	: Diferansiyel elemanın tarafsız eksene olan uzaklığı
dz	: Tabaka kalınlığı
β	: Eğim
γ_{12}	: 1-2 yönünde birim kayma
γ_{23}	: 2-3 yönünde birim kayma
γ_{31}	: 3-1 yönünde birim kayma
ε_{ij}	: Şekil değiştirme bileşeni
ε_1	: 1 yönünde şekil değiştirme
ε_2	: 2 yönünde şekil değiştirme
ε_3	: 3 yönünde şekil değiştirme

θ	: Fiber takviye açısı
σ_i	: Gerilme bileşeni
σ_1	: 1 yönündeki gerilme bileşeni
σ_2	: 2 yönündeki gerilme bileşeni
σ_3	: 3 yönündeki gerilme bileşeni
τ_{12}	: 1-2 yönlü kayma gerilmesi
τ_{23}	: 2-3 yönlü kayma gerilmesi
τ_{31}	: 3-1 yönlü kayma gerilmesi
ν	: Poisson oranı

KISALTMALAR

APDL	: Ansys Parametrik Dizayn Dili (Ansys Parametric Design Language)
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer)
CLT	: Klasik Tabak Teorisi (Classical Lamina Theory)
DIC	: Dijital İmaj Korelasyon (Digital Image Corelation)
GA	: Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
MAT	: Malzeme Bilgisi (Material Information)
SHM	: Yapısal Sağlık Gözleme (Structural Health Monitoring)
SR	: Rijitlik Oranı (Stiffness Ratio)
THETA	: Takviye Açısı (Reinforced Angle)
TH	: Kalınlık Değeri (Thickness Value)

1. GİRİŞ

Kimyasal bileşenleri farklı, birbirleri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin, kullanım şartlarına uygun duruma getirilmesi için belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemelere kompozit malzemeler denir.

Havacılık, uzay, savunma, otomotiv, deniz araçları ve birçok mühendislik uygulamalarının yapıldığı çeşitli endüstrilerde hızlı teknolojik gelişim ve artan rekabet nedeniyle, yüksek performansa sahip ürünlerin tasarlanmasında, hafif ve mukavemeti yüksek malzemelere ihtiyaç duyulur. Kompozitler, özgül ağırlıklarının düşük olması, rijitlik, yüksek mekanik özellikler, yüksek kimyasal direnç, korozyona karşı dayanım, ısı, ses ve elektrik izolasyonu gibi özellikleri nedeniyle metal malzemelerin yerine tercih edilmektedir. Özellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılmak üzere, metallerden daha hafif ve daha yüksek mukavemetli olan kompozit malzemeler tasarlanmakta ve üretilmektedir.

Uygulama kolaylığı ve tamir gerektiğinde çözülebilir olması nedeni ile kompozit malzemelerin bir araya getirilmesinde sıklıkla pimli bağlantılar kullanılmaktadır. Gelişmiş özelliklerine rağmen pimli bağlantılar önemli bir dezavantaja sahiptirler. Bağlantının gerçekleştirilebilmesi için kompozit levhaya açılan delikler levha geometrisinde süreksizliklere yol açarak gerilme yığılma noktaları oluşturduğu için kompozit levha mukavemetinde düşüşlere neden olmaktadır. Bu noktada kompozit malzemelerin pim bağlantı davranışlarının incelenmesi büyük önem taşır. Çünkü geleneksel malzemelere göre, kompozit malzemelerin hasar davranışı daha karmaşıktır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin hasar davranışını ayrıntılı olarak belirlemek amacıyla *Hashin* ve *Puck* hasar teorileri kullanılmaktadır. Bu tip hasar teorileri hasarın matris veya fiberde meydana gelip gelmediğini belirler. Ayrıca hasar tipinin basma, çekme veya kayma hasarı olduğuna karar verir.

Yapılan bu çalışmada seri pim bağlantılı kompozitlerin ilerlemeli hasar analizi *Ansys* paket programında hazırlanan bir alt program yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelde levha üzerinden reaksiyon kuvvetleri okunarak, her bir numuneye ait kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri çizilmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Dolayısıyla nihai hasarın oluşup oluşmadığına sayısal yük-yerdeğiştirme grafiğinde yükün ani düşme noktalarına bakılarak karar verilmiştir. Bu amaçla çalışmanın ikinci bölümünde geniş bir literatür araştırması yapılmıştır. Üçüncü bölüm “Kompozit Malzemeler” başlığı altında verilmiştir.

Dördüncü bölümde “Kompozit Malzemelerde Hasar Analizi” anlatılmıştır. Beşinci bölümde yapılan “Deneysel Çalışmalar” açıklanmıştır. Altıncı bölümde ise “ Sayısal Çalışmalar” sonucu elde edilen sonuçlar verilmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemelerde meydana gelen pim hasarları literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Camanho ve Matthews [1], pim bağlantılı levhalar için yaptıkları analizlerde sürtünmenin, pim-delik arasındaki boşluğun ve temas yüzeyinin dikkate alınmasının gerekli olduğunu ayrıca yatak gerilmesinin üç boyutlu analizler ile hesaplanmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Oh vd. [2], tarafından çekme yüklemesi altında cam-epoksi ve karbon-epoksi birleşiminden oluşan hibrid kompozit malzemeler için ideal pim bağlantısı araştırılmıştır. Pim bağlantıları için göz önüne alınan tasarım parametreleri, tabakalandırma açısı, tabaka dizilimi, cam-epoksi, karbon-epoksi oranı, rondelanın dış çapı ve kelepçe basıncı olarak belirtilmiştir. Çalışmada, hibrid kompozit malzemelerin tabakalar arası dizilimini değerlendirmek için, cıvatalı bağlantıların üç boyutlu gerilme analizi, sonlu eleman programı kullanılarak yapılmış ve deneysel elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deliklerin yüklenen dış kenarı üzerinde ve rondela yoluyla zorlanan kenar bölge üzerinde yoğun hasar olduğu tespit edilmiştir.

Camanho ve Matthews [3], tarafından mekanik bağlantılı karbon fiber takviyeli plastiklerin dayanımlarını ve hasar ilerlemelerini belirlemek için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Analizlerde *Hashin*' in üç boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar ilerleme modellemesinde, kompozit malzemenin elastisite ve kayma modülü, kompozit malzemede oluşan hasarın ilerleme durumuna göre sonlu eleman analizlerinde küçültülerek uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli *Abaqus* yazılımı ile oluşturulmuştur.

Dano vd. [4], kompozit levhalardaki mekanik bağlantılı birleştirmelerde hasar ve gerilme analizi yapmışlardır. Çalışmalarında pim bağlantılı kompozit levhaların davranışını tespit etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Model, lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, büyük deformasyon teorisini, ilerleyen hasar ve pim-delik ara yüzeyindeki temas davranışını kapsamaktadır. İlerleyen hasarın tahmini için, analizde *Hashin* ve *Maksimum hasar kriteri* kullanılmıştır. Çalışmalarında hasar kriteri, yük-pim yer değiştirme eğrisi ve dayanım üzerinde, lineer olmayan kayma davranışlarının etkili olduğunu belirlemişlerdir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin lineer olduğu zaman *Hashin* kriterinden ziyade hasar kriteri olarak *Maksimum gerilme kriterinin* kullanımının daha gerçekçi sonuçlar verdiğini, lineer olmadığında ise farklı hasar analizlerindeki sonuçların birbirine yaklaştıkları

belirtilmiştir. Oluşturdukları bu modelin pim bağlantılı tabakalı kompozitlerin hasar gerilmelerinin tespiti için verimli olduğu belirtilmiştir.

McCarthy vd. [5], tarafından cıvata/pim bağlantılı kompozitlerin gerilim ve sertlikleri üzerinde cıvata-delik açıklığının etkileri araştırılmıştır. Konfigrasyon olarak tek cıvata/pim seçilmiş, hasar üzerinde gerilme kriteri ve cıvata-delik açıklık etkileri incelenmiştir.

Whitworth vd. [6], tarafından pim bağlantılı kompozitlerde hasar analizi yapılmıştır. Analiz; delik bağlantısı etrafında gerilme dağılımını değerlendirmek için iki boyutlu sonlu eleman analizi ve *Chang-Scott-Springer* karakteristik eğri modeli kullanımını içermektedir. *Yamada-Sun* hasar kriteri kullanılarak, hasar davranışları değerlendirilmiştir.

Kelly ve Hallstrom [7], tarafından mekanik bağlanan bağlantıların yatak gerilmesi üzerinde cıvata-delik açıklığının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, karbon fiber/epoksi tabakaların dayanım gerilmeleri cıvata bağlantıları için incelenmiştir. Üç boyutlu lineer olmayan sonlu eleman modeli, deliğe bitişik tabakalardaki gerilme alanı üzerinde cıvata-delik etkilerini araştırmak için kullanılmıştır.

Xiao ve Ishikawa [8, 9], cıvata/pim bağlantılı kompozitlerin hasar davranışları ve yatak gerilmelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, karbon fiber takviyeli plastik içerikli polimerin iki farklı tipi seçilmiş ve dayanımları üzerinde reçine özelliklerinin etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca cıvata/pim bağlantılı kompozitin hasar davranışı ve yatak gerilmelerini belirlemek için sayısal modelleme yapılmıştır. Cıvata/pim bağlantılı kompozitin karakteristiklerinin cevaplanması ve yatak hasarlarının simülasyonu için bir analitik model geliştirmişlerdir. *Abaqus*, sonlu eleman programı ile modelleme yapılmıştır. Analitik model, liner olmayan malzeme davranışı, deformasyon, ilerleyen hasar ve pim/delik sınırlarında temas koşulları göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Çalışmada, hasar kriteri olarak *Hashin* ve *Yamada-Sun* kriterleri kullanılmıştır.

Camanho ve Lambert [10], çalışmalarında tabakalı kompozitlerde mekanik bağlantıların hasar modu, son hasar, hasar başlangıcını tahmin etmek için bir tasarım metodolojisi sunmuşlardır. Her plakadaki gerilme dağılımı sayısal metot kullanılarak elde edilmiştir. Bağlantıların elastik sınırı, hasar kriterine göre gerilme dağılımları ve tabaka mukavemeti kullanılarak tahmin edilmiştir. Son hasar ve hasar tipi ise ortalama gerilme modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Bu metodun tek eksenli veya çift eksenli yükleme altında pim veya cıvata bağlantılarında uygulanabileceği belirtilmiştir.

Khashaba vd. [11], kompozit yapılarda civatalı bağlantıların performansı üzerinde rondela boyutu ve sıkma torku etkisini araştırmışlardır. Çalışmada cam fiber takviyeli epoksi kompozitler kullanılmıştır. Kompozit tabakalar $[0^0/\pm 45^0/90^0]_s$ dizilimli, sıkma torku 0, 5, 10, 15 Nm, rondela dış çapı 14, 18, 22, 27 mm olarak seçilmiştir. Çalışma hem deneysel hem sayısal olarak yapılmıştır.

Khashaba vd. [12], çentikli ve çentiksiz cam fiber epoksi kompozitlerin eğilme davranışlarını statik ve yorulma yükleri altında deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Delikli kompozit levhalarda delik çaplarının artmasıyla nihai eğilme mukavemetinin düştüğü, çentik çapı düşüşünün yorulma süresini arttırdığı ve daha uzun yorulma ömrünün deliksiz numunelerde olduğu belirtilmiştir.

Bouiadjra vd. [13], çekme gerilmesine maruz kalan kompozit levhaların çentik ve çatlak uç kısımlarında gerilme şiddet faktörü hesabını sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Fiber takviye açısı azaldıkça çatlak ilerlemesine karşı olan direncin azalacağı gözlemlenmiştir. Kompozitler için yapıştırıcı özellikleri seçilirken malzeme, yapıştırıcı ve yüzey hasarları birlikte orantılanarak değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Whitworth vd. [14], pim bağlantılı kompozitlerde hasar gerilmelerini belirlemek için yaptıkları çalışmalarında *AS4/3501-6* grafit/epoksi kompozit tabakalar kullanmışlardır. Delik etrafındaki gerilme dağılımını belirlemek için iki boyutlu gerilme analizinde *Yamada-Sun* hasar kriteri kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu kanıtlanmıştır.

Aluko ve Whitworth [15], tarafından pim bağlantılı kompozitlerde gerilme dağılımlarını değerlendirmek için bir analiz yapılmıştır. Çalışmalarında karbon fiber takviyeli plastik levhaların mekanik özellikleri kullanılmış ve gerilme dağılımlarının analizi için sürtünme katsayısı 0.0, 0.2 ve 0.4 olarak alınmıştır. Yapılan analizde delik etrafındaki gerilme dağılımında, sürtünme katsayı değerlerinin artması ile maksimum gerilmelerin değiştiği ortaya çıkmıştır.

Kishore vd. [16], çoklu pim bağlantılı cam fiber epoksi kompozit tabakaların hasar yükleri ve hasar tiplerini araştırmışlardır. Üç ve dört pim bağlantılı olarak yapılan çalışmada geometrik parametre olarak *E/D* (pimin merkezleri ile levhanın serbest kenarı arasındaki uzaklığın ile delik çapına oranı), *P/D* (pim deliği merkezleri arasındaki mesafenin delik çapına oranı), *S/D* (pim deliği merkezinin yanal kenara olan mesafesinin delik çapına oranı) oranları seçilmiştir. Sayısal çalışmada *Tsai-Wu* hasar Kriteri kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal

sonuçlarda hasar modlarının benzer olduğu, yaklaşım oranlarının %10'dan daha az bir değerle elde edildiği belirtilmiştir. P/D oranı 6' ya eşit veya büyük olduğunda hasar ilerlemesinin olmadığı ancak 6' dan küçük olduğunda hem üç hem de dört delikli pim bağlantısında hasarın yayıldığı tespit edilmiştir. S/D , E/D oranlarının yüksek olması ile hasar tipinin ezilme olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir.

Kannan vd. [17], merkezi delikli karbon kompozit levhaların çekme mukavemetlerini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Bağlantılardan elde edilen gerilme-yoğunluk faktörü, sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Caminero vd. [18], çalışmalarının ilk bölümünde eksenel çekme yükü etkisi altında çentikli numunelerin hasar prosesini değerlendirmişlerdir. İki boyutlu ve üç boyutlu DIC (Digital Image Correlation) tekniğini karbon fiber epoksi $M21/700$ kompozit levhalarda yüzey şekil değiştirme ölçüsü elde etmek için kullanmışlardır. Bu kompozit levhalar farklı tabaka diziliminde seçmişlerdir. Yapıştırma tipi olarak levhanın dış yüzeyinden uygulanan yama bağlantılarını kullanmışlardır.

Turan vd. [19], pim bağlantılı tek yönlü tabakalı karbon epoksi kompozit levhaların hasar modları ve hasar yüklerini belirlemek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bağlantı geometrisinin ve fiber oryantasyon açısının hasar yükleri ve hasar modları üzerindeki etkisini hesaplamak için deneysel ve sayısal olarak parametrik çalışmalar yapmışlardır. 3D APDL (Ansys Parametric Design Language) kodları kullanılarak *Ansys*' te sonlu elemanlar metodu ile sayısal çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Hasar yüklerini ve hasar tiplerini tahmin etmek için *Hashin* hasar teorisini kullanmışlardır.

Li [20], maksimum dağılım metodunu kullanarak kompozit levhadaki pim deliklerinin hasar tahmini için genel bir hesaplama yöntemi öne sürmüş ve geliştirmiştir. Bunun için *Abaqus* analiz programını kullanmıştır. Önerilen hesaplama yöntemini doğrulamak için $T300 / QY8911$ kompozit plaka kullanmıştır. Sonuçlar *Edgeworth* hesaplama temelli yöntemle karşılaştırılmıştır.

Hoang vd. [21], cıvatayla birbirine bağlanan levhaların genel davranışını incelemek için üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Bağlantının genel mekanik davranışının analizi için sıkma torku ve boşluğu dikkate alınmıştır. Hesaplamalar hem elasto-plastisite hem de *Latham* ve *Crocockft*'un enerji hasar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Vaibhav [22], tabakalı kompozitlerin matkap ile delinmesini sayısal modellemiştir.

Çözümde tabakalı kompozitteki fiber hasarını *Hashin* kriteri ile matris hasarını ise *Puck* kriteri ile incelemiştir.

Ahmad vd. [23], çift katlı cıvatalı dokuma kumaş kompozit malzemelerin hasar ve kırılmaları ile ilgili çalışmışlardır. Deneysel olarak test edilen bir dizi CFRP (Carbon Fiber Reinforced Composites) cıvatalı bağlantıyı modellemek için üç boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Levha üretim yöntemi, bağlantı geometrisi, delik boyutu ve cıvata sıkıştırma momentinin etkileri araştırılmıştır. İncelenen dokuma kumaş malzemelerin mukavemeti ve tokluğu için önceden belirlenmiş, deneysel ölçümlere dayanan parametrelerin belirlenmesi ve hasar büyümesini belirlemek için genişletilmiş sonlu elemanlar (XFEM) metodu kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda öngörülen ve ölçülen dayanma gerilmeleri arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

Zhang vd. [24] bileşik çoklu cıvata bağlantılı malzemelerin hasarını tespit etmek için tek yönlü tabaka özelliklerine ihtiyaç duyan hasar analizi tabanlı karakteristik uzama yöntemlerini (CLM) önermişlerdir. Sayısal karakteristik uzamalarının yol açtığı hatalar %4 dolaylarındadır. Böylece zaman alıcı ve pahalı karakteristik uzama testlerine gerek kalmamıştır. Önerilen yöntemin mühendislik alanında kullanımının uygun olduğu gösterilmiştir.

Egan vd. [25], cıvata hasarını doğru bir şekilde analiz etmek için, *Abaqus/Explicit* programı ve *Puck* hasar kriterinden yararlanmışlardır. Doğrusal olmayan örgü hassasiyetini azaltmak ve çatlak modeli oluşturmak için 3D kompozit hasar modeli kullanmışlardır. Sonuç olarak çalışmada hasar kriterleri vurgulanmış ve oluşturulan yeni modelin verimli olduğu gösterilmiştir.

Turan vd. [26], çift sıralı pim bağlantılı tek yönlü karbon epoksi kompozit levhalarda deneysel ve sayısal hasar analizi yapmışlardır. Kompozit levhaların hasar yükleri ve hasar modları farklı geometrik parametreler ve farklı tabaka dizilimleri için belirlenmiştir. *Ansys*' de sonlu elemanlar yöntemiyle 3D APDL kodları geliştirilmiştir. Sayısal analizde, hasar yükleri ve hasar modlarının belirlenmesi için *Hashin* hasar teorisi ve malzeme indirgeme kuralları kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar; hasar yükleri ve hasar modlarının geometrik parametrelerden etkilendiğini göstermiştir.

Lee vd. [27] tabakalı kompozitlerin hasar başlangıcı ve ilerlemesi için *Puck* kriteri ve hasar mekaniğine dayanan bir metot sunmuşlardır. Çalışmada *Abaqus* sonlu eleman paket programında *UMAT* alt programlarını kullanarak, hasar başlangıcı ve ilerlemesini

gerçekleştirmişlerdir. Cam fiber takviyeli kompozitler için yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar literatürde bulunan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Zhou vd. [28] tarafından tek bindirmeli, çoklu pim bağlantılı tabakalı kompozitlerin üç boyutlu yükleme altında sonlu eleman hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Matrisin hasarsız bölgeleri için ayrıca plastik davranış ta çözüme eklenmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumu incelenmiştir.

Gadade vd. [29] hidro-termo-mekanik yükleme altında; sıcaklık farkı, fiber hacim oranı, levha kalınlığı gibi çeşitli parametrelere göre tabakalı kompozitlerin ilk ve son tabaka hasarı davranışı incelenmiştir. Çalışmada ikinci mertebeden pertürbasyon tekniği (SOPT) yoluyla doğrusal olmayan malzeme davranışı ile yüksek mertebe kayma deformasyon teorisine (HSDT) dayalı stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM), *Puck* hasar kriteri kullanılarak formüle edilmiştir. Mikromekanik tabanlı modelleme yaklaşımı kullanılarak her tabakanın ve karşılık gelen hasar tipinin hasar dayanımı tahmin edilmiştir.

Egan vd. [30] üç boyutlu sonlu eleman modellemesini pim bağlantılı kompozit levhaların yarı statik ezilme tepkisini öngörmek için kullanmışlardır. Pim ezilme hasarını doğru bir şekilde modellemek için, kullanıcı tanımlı bir üç boyutlu kompozit hasar modeli formüle edilmiştir. *Puck* hasar kriterine doğrusal olmayan bir kayma yasası ve sonlu eleman ağı hassasiyetini azaltmak için bir çatlak bandı modeli dâhil edilmiştir. *Abaqus/ Explicit* çözücüsündeki karakteristik eleman uzunluklarını kullanmak için kompozit tabaka çatlaklarının yönlenmesini açıklayan yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Chowdhury vd. [31], ince kompozit levhaların birbirine cıvatayla bağlanması durumunda statik ve yorulma direncini incelemişlerdir. Cıvata dizilimi değişiklikleri ve kompozit bağ çizgisi farklılıkları da dâhil olmak üzere bir kaç farklı model üzerinde çalışmışlardır. Bağlantı elemanları çatlakta ilerlerken gerinim enerjisi seviyesinde (*SERR*) önemli bir düşüş gözlemlenmiş olup daha yavaş bir çatlak büyüme oranı meydana gelmiştir.

Chowdhury vd. [32], ince kompozit levhaların birbirine cıvatayla bağlanması yönteminin bir sonraki aşaması olan kalın merdiven şeklindeki levhaların davranışını analiz etmişlerdir. Sonuç olarak çatlak başlangıcını ertelemek için bağlantı elemanlarının örtüşme uçlarının birbirlerine daha yakın yerlere konumlandırılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Warren vd. [33], tek cıvatalı çift kesimli dokuma kompozit içindeki hasarın başlangıcını ve ilk yayılımını tespit etmek için üç boyutlu hasar analiz modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada sertleştirilmiş epoksi ile elde edilen kalıplama işlemi kullanılarak

dokuma yöntemiyle takviye edilmiş *IM7* karbon elyaf kompozit malzeme kullanılmıştır. Modelde görülen hasarın başlangıcı ve sonrasındaki sonuçların daha önce yapılan deneysel bulgularla uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Zhang vd. [34], kompozit plakalar için cıvatalı bir birleştirme yöntemi önermişlerdir. Numunelerin performansını analiz etmek için sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Uygun tasarım parametreleri elde edilmiş ve önerilerde bulunmuşlardır. Sonuç olarak cıvatalı birleştirme yönteminin yararlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Sola vd. [35], tek yatak yüküne maruz kalmış yarı izotropik kompozitlerin burkulma oluşumundaki hasarını incelemişlerdir. Yatak hasarlarında doğru modellemenin burkulma üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir.

Nerilli vd. [36], fiber takviyeli kompozit plakalarda cıvatalı bağlantılar kullanılarak cıvata kaynaklı hasara değinmişlerdir. Cıvata ve levha arasında oluşan hasarın cıvata merkezli yük aktarım mekanizmalarını tanımlayarak, doğrusal olmayan bir sonlu eleman analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar birbirleriyle karşılaştırılarak sonuçlar mukayese edilmiştir.

Ahn ve Yu [37], sürekli ortamlar mekaniği çerçevesinde 3D örgü kompozitlerin mekanik davranışını ve mikro yapılarındaki değişimleri göstermek için bir sayısal model geliştirmişlerdir. Yeni yöntemin ilk adımı, 3D tekstil kompozitlerin her noktasında fiber oryantasyonunu tanımlamak ve deformasyon gradyanını kullanarak fiber oryantasyonunu güncellemektir. Çalışmada hasar başlangıcı için *Puck* hasar kriteri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, seri pim bağlantılı dokuma karbon fiber epoksi kompozit levhaların hasar davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Farklı geometrik parametreler için pim bağlantılı kompozitlerin çekme testi gerçekleştirilmiştir ve yük-yerdeğiştirme grafikleri elde edilerek hasar yükleri tespit edilmiştir. Sayısal çalışmada *Puck* hasar kriterini kullanan APDL kodları yazılmıştır. Oluşturulan alt program *Ansys* paket programında çalıştırılarak ilerlemeli hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda herbir numuneye ait yük-yerdeğiştirme grafiği sayısal olarak elde edilerek, sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca pim deliği etrafında hasar davranışı, *Hashin* hasar kriteri sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısal Özellikleri

Kompoziti oluşturan malzemelerin bulunması geçmiş yıllara dayanmaktadır. Kerpiç malzemeler buna örnek olarak verilebilir. Kerpiç üretiminde ilk önce killi çamur malzeme hazırlanır daha sonra hazırlanan killi çamur içerisine doğal bitkisel saplar ve lifler katılarak malzemenin dayanımı ve ömrü artırılır. Kompozit malzemelerin bilimsel ve mühendislik yaklaşımlarla geliştirilmesi, sentetik reçinelerin kullanıma başlanmasıyla birlikte 1940' lı yıllarda olmuştur. Cam lifi takviyeli plastik malzemeler, mukavemetli olmasının yanında hafiflik, elektromanyetik geçirgenlik ve atmosfer koşullarına dayanıklılığından dolayı kullanılabilecek uygun bir malzemedir. İlk elyaf sarma metodu 1946 yılında ABD' de kullanılmıştır. 1950'li yıllarda uçak pervanesinde kompozit uygulamasının kullanımına başlanmıştır. Bugün ise uçak endüstrisinin en popüler malzemeleri arasında yerini almıştır.

Kompozit malzemelere çok fazlı malzeme de denilmektedir. Yapılarında sürekli bir ana faz ve onun içerisinde dağılmış pekiştirici bir faz bulunur. Bu malzemeler iki farklı birleşme türü ile oluşabilir. Bunlar;

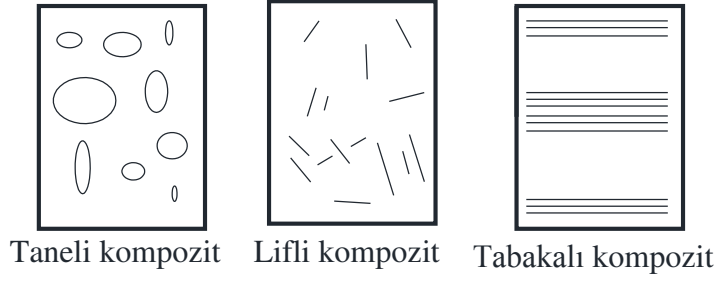
- Mikroskobik
- Makroskobik

birleşmelerdir.

Mikroskobik bileşime örnek vermek gerekirse perlit çeliği düşünebilir. Bu çelik türü ferrit ve sementitin mikroskobik düzeyde homojen olarak karışımından meydana gelir. Tek başına ferrit yumuşak ve düşük mukavemetli olup sert ve gevrek sementit ile birlikte yan yana ince tabakalar halinde dizilmek suretiyle yüksek mukavemetli ve tokluğa sahip perlit çeliğini oluştururlar.

Makroskobik bileşimlerde ise boyutlar gözle görülebilir durumdadır. Sonradan bir araya getirilerek üstün özelliklerdeki kütleleri oluştururlar. Bu birleşime verilebilecek en iyi örnek karbon lifi ve epoksi reçine birleşimidir.

Kompozit malzemeler, iç yapılarına göre üç gruba ayrılabilir. Bu türler; taneli, lifli ve tabakalı kompozitler olarak adlandırılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kompozit yapı türleri.

Lifli ve tabakalı kompozitlerin sağladığı özellikler, taneli kompozitlere göre daha yüksektir. Taneli kompozitler için en iyi örnek olarak beton verilebilir.

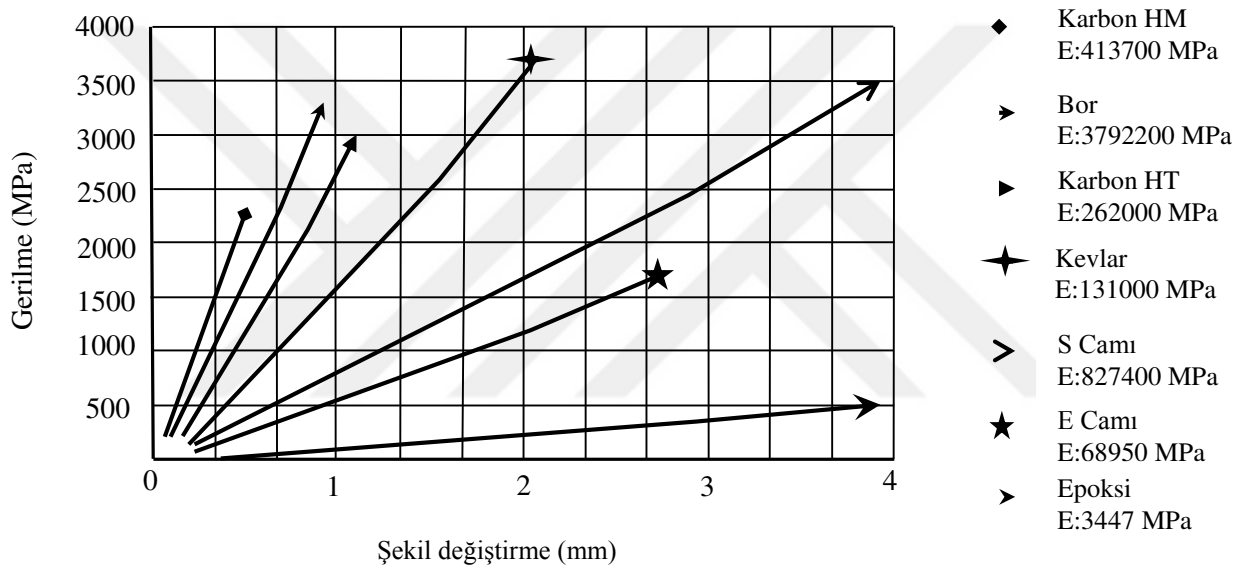
Uygulamada en önemli kompozitler lifli olanlardır. Liflerin çapları yaklaşık 0.05 mm civarında olup tek başlarına kullanılmazlar. Bu lifler uygun bir malzemeye istenen boyutta taşıyıcı maddelere dönüştürülürler. Bu bağlayıcı malzemelere polyester ve epoksi örnek verilebilir. Aynı amaçla kullanılan metal yapıllı liflerin mukavemeti de soğuk çekme ile artırılmaktadır. Lifler yönlenmiş veya rastgele dağılmış olabilir. Yönlenmiş lifler doğrultusunda mukavemet doğal olarak eksenel yönden çok daha büyük olur. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti de artar.

3.2. Kompozit Malzemelerin Karakteristik Özellikleri

- **Hafiflik:** Polimer matrisli kompozitler genelde $1.4-2.5 \text{ gr/cm}^3$, metal matrisli kompozitler $2.4-5 \text{ gr/cm}^3$, seramik kompozitler ise $1.4-5 \text{ gr/cm}^3$ arasında bir yoğunluktadır.
- **Yüksek mekanik özellikler:** Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları çok yüksektir.
- **Rijitlik ve boyut kararsızlığı:** Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir.
- **Yüksek kimyasal direnç:** Asitler, alkaliler, çözücüler ve açık hava şartlarına karşı son derece direnç gösterirler. Kimya tesisleri için çok kullanılan malzemelerdir.
- **Yüksek ısı dayanımı:** Kompozitlerin ısı dayanımı sıradan plastiklere göre yüksektir. Birkaç malzemenin birlikte kullanılması performans ihtiyacını karşılayabilir. Örneğin, bir uyduyu oluşturan bileşenlerin uzayda -150 C° ile $+90 \text{ C}^\circ$ sıcaklık aralığında

- **Elektriksel özellikler:** Elektriksel özellikler kompozitlerde isteğe göre ayarlanabilir. Metal matrisli kompozit (MMC) malzemeler iletkenidir.

Kompozit malzemelerde kullanılan matris ve yükü taşıyan bileşenlerin tek başlarına kullanımlarının bir anlam ifade etmemesi ancak beraber uygulandığı takdirde ne kadar mukavemetli olduğu Şekil 3.2’ de görülebilir.



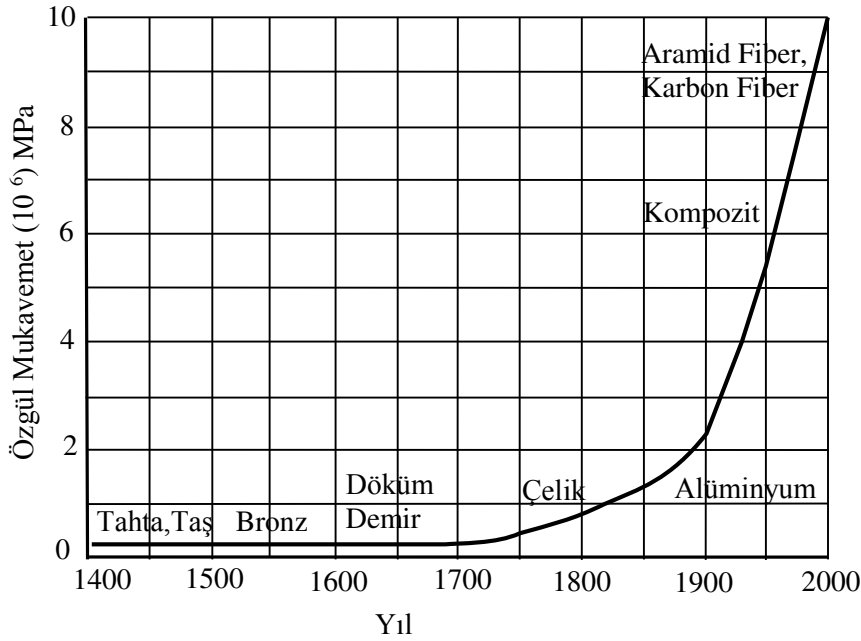
Tablo 3.1’ de geleneksel malzemeler ile kompozit malzemeler mekanik özellikler açısından karşılaştırılmıştır.

12

Tablo 3.1. Kompozit ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri [41].

Malzeme	Yoğunluk, ρ (gr/cm^3)	Çekme Dayanımı, D (MPa)	Elastisite Modülü, E (GPa)	Özgül Çekme Dayanımı, D/ ρ	Özgül Elastisite Modülü (E/ ρ)
Alaşımsız Çelik	7.9	459	203	58	26
Alüminyum	2.8	84	71	30	25
Al Alaşımı 2024	2.9	247	69	88	25
Pirinç	8.5	320	97	38	11
Ahşap (Kayın)	0.7	110	13	157	19
Kemik	1.8	138	26	75	14
Bor Epoksi KM	1.8	1600	224	889	124
KarbonEpoksi	1.6	1260	218	788	136
Kevlar Epoksi	1.4	1400	77	1000	55
Cam Epoksi	1.8	1400	56	824	33

Şekil 3.3' te malzemelerin özgül mukavemetlerindeki değişim; zamanın bir fonksiyonu olarak verilmiştir.



Şekil 3.3. Malzemelerin özgül mukavemet değerlerinin zamanla değişimi [42].

3.3. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Kompozitlerin yüksek üretim maliyetleri önemli bir etkidir. Karbon epoksi yapıdaki bir malzemenin üretim maliyeti normal bir malzemenin maliyetinin 10-15 katını bulabilir. Bir metal malzemeye göre kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu daha karmaşıktır. Metallerden farklı olarak kompozit malzemeler izotropik değildir. Yani kompozit malzemelerin özellikleri tüm doğrultularda aynı değildir. Kompozit malzemelerin deneysel analizleri daha karmaşıktır. Analiz sayısını arttırmak doğru sonuca yaklaştırır.

Kompozit malzemelerin tamiri metallerle kıyaslandığında daha zordur. Bazen kompozit yapıda delaminasyon gibi tespit edilemeyen hasarlar oluşabilir.

Kompozit malzemelerin büyük bir çoğunluğunun geri dönüşümü mümkün değildir. Bu nedenle bu tip malzemeler doğa dostu değildir.

3.4. Kompozit Malzeme Çeşitleri ve Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemeler; polimer bazlı, metal ve seramik matriksli kompozitler olarak üç gruba ayrılabilir. Tablo 3.2' de üç farklı malzeme türünde kullanılan matris ve takviye elemanları gösterilmiştir.

- **Polimer bazlı kompozitler:** Liflerle pekiştirilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanım alanına sahiptir. Pekiştirici olarak cam, karbon, aramid ve bor lifleri kullanılır. Polimer bazlı kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Malzeme matrisi içindeki liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti artar. Polimer bazlı kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet ve özgül elastisite modülüdür. Bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere göre üstün durumundadırlar. Karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinden beş kat kadar daha fazladır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisindeki çoğu yapıda tercih edilir.
- **Metal (MMC) kompozitler:** Bir metalik faza bazı takviye malzemelerle eritme, vakum emdirme, sıcak presleme ve difüzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanmasıyla elde edilen malzemelerdir. Bu malzemeler daha çok uzay ve havacılık alanlarındaki uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının

reflektör ve destek parçalarında kullanılır.

- **Seramik (CMC) kompozitler:** Yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramik kompozitlerdir. Başlıcaları Al_2O_3 , SiC, CbN, TiC, TiB, TiN, AlN' dir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir ya da bir kaç beraber kullanılarak elde edilirler. Zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçaların imalı ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir.

Bu üç ana matris malzemenin kullanımı yaygındır. Takviye elemanları ve kompozit yapıyı oluşturan matris malzemeleri Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2. Matris, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri [41].

Matris Malzemesi	Takviye Elemanı	Kompozit Yapı
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers	Film-Folya

3.5. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Temel malzeme eksenleri doğrultusunda değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak birleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzemedirler. Tabakalar, matris içerisinde tek yönlü lif malzemeler olabileceği gibi değişik açılarda veya farklı elyaf takviyeli tabakalardan oluşabilir.

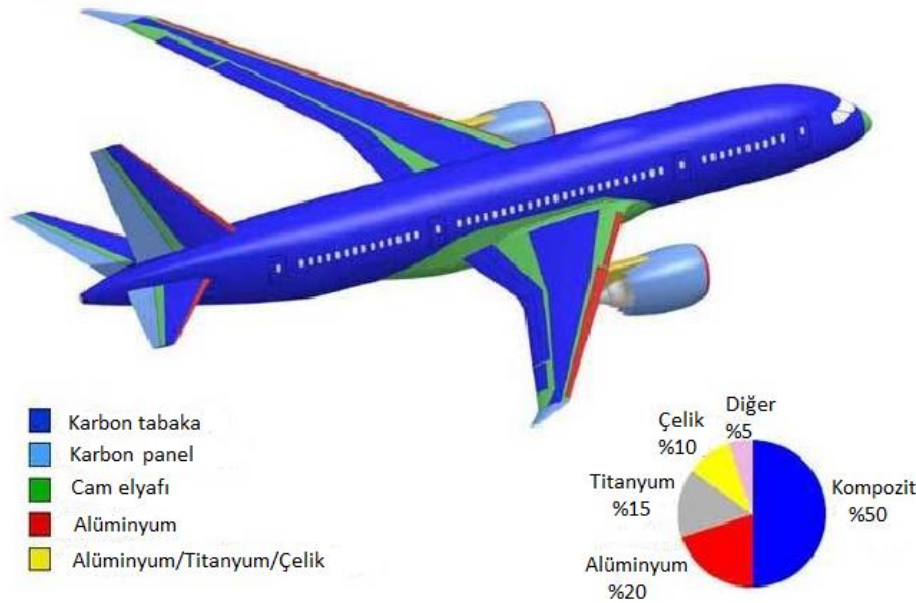
Tabakalı kompozitler için temel esas, yapının maruz kalacağı yüklere uyum sağlaması için malzemenin dayanım ve rijitlik avantajını elde edebilmektir. Tabakaların olması bu amaca hizmet eder, çünkü her tabakanın lif yönleri istenilen doğrultuda yapılabilir. Sekiz tabakalı bir plaka ele alınırsa, altı tanesi bir yönde diğer iki tanesi buna dik olacak doğrultuda yönlendirilebilir. Bu plakaların rijitliği ve dayanımı, tek tip oryantasyona sahip tabakalı plakalara göre, her iki yönden gelecek kuvvetleri daha fazla taşıyabileceğinden yüksek olacaktır.

Tabakalı kompozit malzemelerde kullanılan dokumalardaki ipliklerin mekanik olarak birbirlerine kenetlenmeleri ile kumaş dokunun bütünlüğü korunmuş olur. Katların sayısı, eksen açısı, ağırlığı ve kullanılan elyaf tipine göre tabakalı kompozitler tasarlanabilmektedirler.

3.6. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

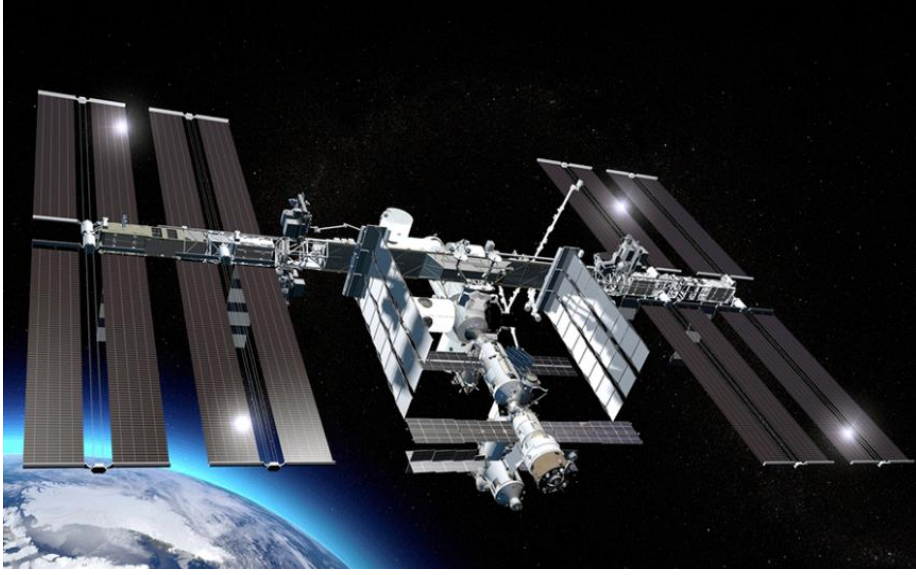
Uzay ve uçak sanayi: Havacılıktaki temel atılımlardan biri, metal malzeme yerine kompozit malzeme kullanımı konusudur. Uzay çağı malzemesi olarak ta tabir edilen ileri kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlerdir. Genellikle epoksi matris içinde sürekli elyaflar kullanılır. Kompozit yapıların uçak tasarımındaki yaygın kullanımı 1960’larda başlamıştır. ABD’ de bor elyafların, İngiltere’de ise karbon elyafların kullanımı yaygınlaşmıştır.

Karbon epoksi kompozitlerin sivil yolcu uçaklarındaki ilk uygulamaları Boeing 727’lerin gövde kaplamasında gerçekleştirilmiş ve %15 civarlarında ağırlık kazancı sağlanmıştır. Daha sonraki yıllarda Boeing 737’lerin aerodinamik frenleri karbon epoksi kompozitten üretilmiştir. Yıllar ilerledikçe kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre üstünlüklerinden dolayı popüler bir malzeme haline gelmiştir. Günümüz modern uçaklarında kullanım alanları çok yaygınlaşmıştır. Şekil 3.4’ te ileri kompozit parçaların modern bir uçakta ne kadar yaygın kullanıldığı gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Airbus A 380 yolcu uçağında karbon-epoksi uygulamaları [53].

Uzay ve havacılık sektöründe fiber takviyeli kompozitler düşük ağırlık ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için başvuru bir malzeme türüdür. Şekil 3.5’ te bir uydu gövdesinde karbon epoksi kompozit uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Karbon fiber malzemeye yapılmış bir uydu [56].

- **Otomotiv sanayi:** Kompozit malzemeler otomotiv sanayisinin de uygulama alanlarına girmiştir. Otomobilin ağırlığını azaltmak; hem hızlanma performansı için hem de yakıt tüketiminde hatırı sayılır tasarruflara yol açar. Kompozitler, özellikle spor araba üreticileri ve motor sporları için vazgeçilmez bir malzeme türüdür. Günümüzde lüks spor arabalarının şasesi karbon fiber kompozitten üretilmektedir. Şekil 3.6’ da otomobilde kullanılan kompozit parçaların imalatında kullanılan üç boyutlu lifsarma-dokuma makinası gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Spor otomobil parçalarının karbon lifinden hazırlanması [55].

- **Elektrik ve elektronik sanayi:** Kompozit malzemeler yüksek elektrik izolasyonu ve mekanik dayanım gibi üstün nitelikleri nedeniyle her türlü elektrik ve elektronik malzemede üretim malzemesi olarak tercih edilmektedir. Bunlara örnek olarak ark söndürme ünitesi orta gerilim izolatörleri örnek verilebilir.
- **Spor sektörü:** Spor ve eğlence ekipmanları kompozitlerin yoğun olarak kullanıldığı başlıca alanlardan biridir. Kompozitlerin kullanıldığı başlıca spor ürünleri; golf sopaları, tenis racketleri, balıkçılık ekipmanları ve karbon fiber kompozitten üretilmiş bisikletler örnek olarak verilebilir.
- **Diğer sektörler:** Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımının arttığı diğer sektörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:
 - Talaşlı imalat sektörü.
 - Rüzgar türbin enerji sektörü.
 - Basınçlı kaplar endüstrisi.
 - Tarım sektörü.
 - Denizcilik sanayi.
 - Sağlık sektörü.
 - Müzik sektörü vs.

Ayrıca son yıllarda endüstriyel tasarımcılar da estetik açıdan ilgi çekici durdukları için kompozit malzemeleri tasarımlarında kullanmaktadırlar.

3.7. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin performansları iyi olmasına karşın normal yapı malzemelerine göre üretimleri zor ve risklidir. Bu sebeple üretim maliyetleri hayli fazladır. İmalat tekniklerinden bazıları aşağıda açıklanmıştır.

- **Elle yatırma yöntemi:** Bu yöntem eski ve en basit yöntemlerden biridir. Uygulama yapmak istenilen şeklin kalıbının üzerine takviye malzemesi konulur ve daha sonra bir fırça veya döner rulo ile reçine tatbik edilerek üretim gerçekleştirilir. Genellikle keçe ve dokuma parçaları şeklindeki lifler takviye malzemesi olarak kullanılır. Reçine donduğundan kalıptan ayrılması için uygulamadan önce kalıba, alkol, silikon vb. ayırıcı madde sürülür. Bu yöntem elyaf dağılımı düzensiz olduğundan ve tabakalar arası birleşme çok sağlıklı olmadığından dolayı düşük kalitede parçalar için tercih

edilir.

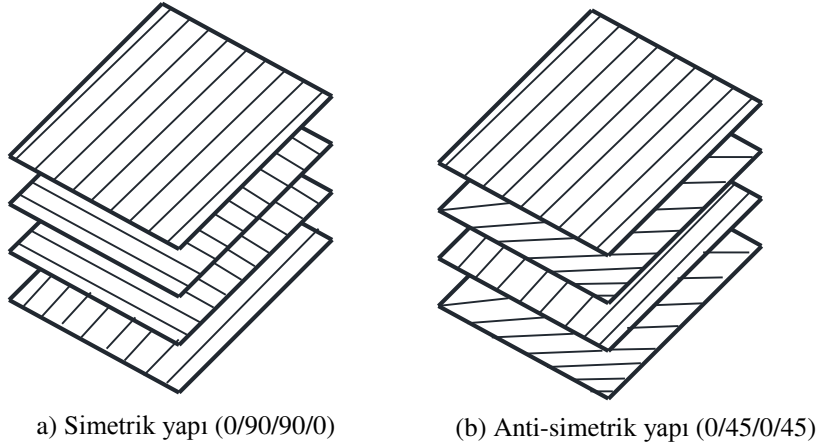
- **Püskürtme yöntemi:** Bu metot elle yatırma tekniğinin bir benzeri olup tatbiki daha kolaydır. Bir depodan emilen reçine ve takviye elemanı lifleri püskürtme tabancası vasıtasıyla parçanın kalıbına saatte 500 kg reçine lif karışımı püskürtülerek üretim gerçekleştirilir.
- **Torba kalıplama metod:** Kompozit tabakalar önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak konulur. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygular. Sonraki aşamada ise tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır.
- **Reçine transfer yöntemi:** Öncelikle takviye malzemesi kuru olarak kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 C°'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılır. Bir çok uçak ve otomobil parçası bu yöntemle üretilir.
- **Filament Sarma Yöntemi:** Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır.
- **Otoklavlama Yöntemi:** Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf / reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek için malzemeyi yüksek ısı ve basınca maruz bırakarak sağlanıldığı yöntemdir. Kompozit malzemelerin tabakalar arası birleşme ve kalitesini arttırmak için kullanılan yöntemlerin başında gelir. Şekil 3.7'de otoklavlama yönteminde kullanılan fırın gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Otoklav fırınına konulan uçak parçası [59].

3.8. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Birleştirilmesi

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 matris malzemesi seçilebilmektedir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet, hafiflik, yüksek korozyon direnci, elektrik, ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklere sahiptirler [45]. 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, deniz 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 (Şekil 3.8) [43, 44].



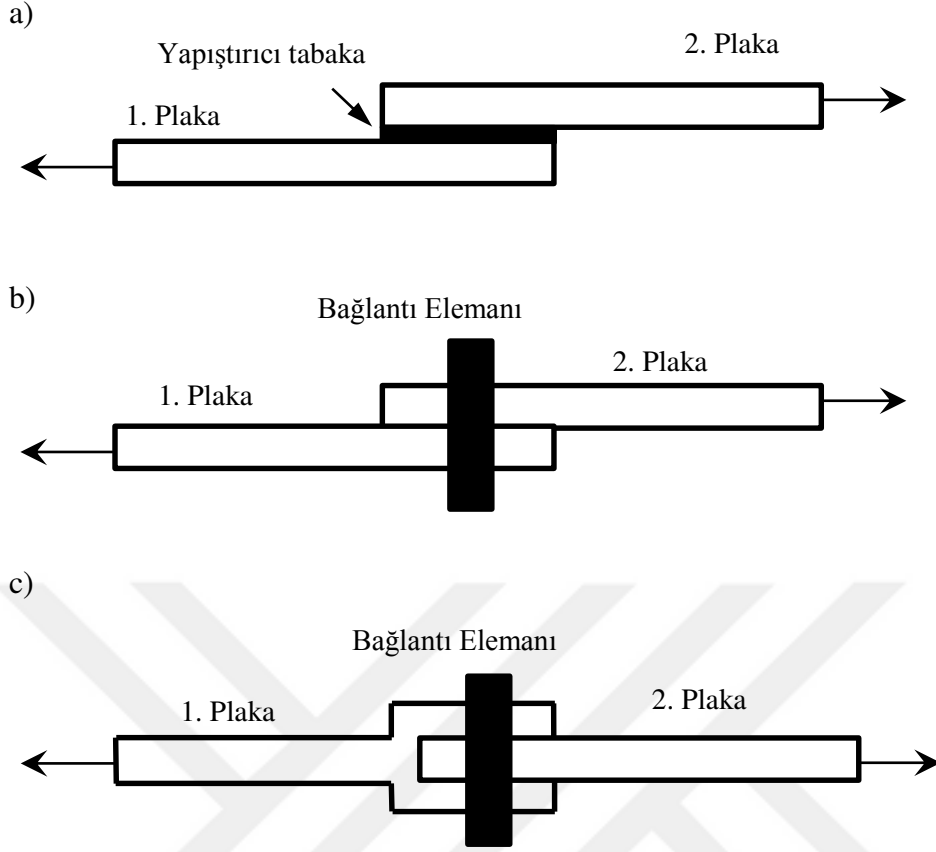
Şekil 3.8. Simetrik ve anti-simetrik tabaka dizilimi [47].

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 [46]. Kompozit malzemeleri birleştirilmesi mekanik davranışlarındaki farklılıklarından dolayı alışılmış metalik malzemelerin birleştirilmesinden daha zor bir işlemdir. Tüm birleştirme işlemleri malzemeler için potansiyel birer zayıf nokta teşkil eder. Sonuç olarak istenmeyen bir durum olan gerilme yığılmalarının malzemelerin birleştirildikleri noktalarda ortaya çıkıyor olması kompozitler için de birleştirilme probleminin önemini artırır.

Temel olarak kompozit malzemelerin birleştirilmesinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

- Çözülebilir (mekanik) birleştirmeler.
- Yapıştırıcılar ile (çözülemeyen) birleştirmeler.

Şekil 3.9’ da 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 birleştirilmiş tabakalı kompozit malzemelerde bağlama elemanlarının montajında 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.



Şekil 3.9. Tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı şekilleri. a) Çözümeyen (yapıştırılmalı) bağlantısı, b) Tek tesirli çözülebilir bağlantı, c) Çift tesirli çözülebilir bağlantı [46].

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:

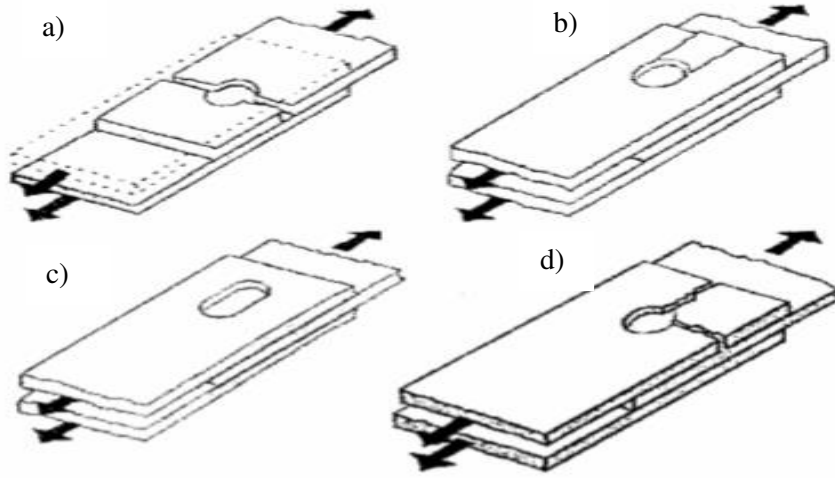
- Çözülebilir birleştirmelerin yapılabilmesi için kullanılan bağlantı elemanı sisteme fazladan yük getirir.
- Bağlantı yapılabilmesi için gerekli olan delik açma işlemi kesitte zayıflamaya ve gerilme yığılmalarına sebep olur.
- Ulaşılması güç olan tamirat gerektirmeyecek yerlerde kullanılması maliyeti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

Bağlantı türü gerekli emniyet hesaplamaları yapılarak seçilmektedir. Çözülebilir bağlantılarda Şekil 3.9’da görüldüğü gibi tek tesirli ve çift tesirli olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Çift tesirli bağlantılarda tabakalı kompozit yapıda çekme gerilmelerinin yanı sıra eksantriklikten dolayı eğilme momenti de etki etmektedir. Tek tesirli çözülebilir bağlantıların mukavemeti çift tesirli bağlantılara göre % 20 daha düşüktür. Bu nedenle tek tesirli mekanik bağlantılarda birden çok bağlama elemanı kullanılması gerekmektedir [48]. 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 3.10’ da çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda oluşması muhtemel hasar tipleri görülmektedir. Bu hasar tipleri çeşitli parametrelere bağlı olarak açıklanabilir;

- Kompozit malzeme bileşenlerinin etkisi: Takviye malzemesinin türü ve yapısı (tekyönlü, örgülü, kırpılmış, rastgele dağılımlı vb.), matris malzemesi (reçine esaslı, plastik esaslı vb.)
- Kompozit malzeme türünün etkisi: Tabakalı kompozit malzeme (simetrik veya anti simetrik dizilime sahip olması, farklı fiber takviye açılarına sahip tabakaların olması vb.),

termoplastik, toz malzemelerden sıkıştırılmış, vb.

- 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.
- Bağlantı tasarım tipinin etkisi: Tek tesirli veya çift tesirli bağlantının olması, farklı bağlantı elemanları kullanılmış olması (civata, perçin veya pim), çekme, basma veya kayma zorlanmaları, yayılı yükleme, moment etkisi gibi konstrüktif zorunluluklardan kaynaklanan etkiler.



Şekil 3.10. Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmeleri muhtemel hasar tipleri, (a- Yırtılma hasarı, b- Kesme hasarı, c- Ezilme hasarı, d- Yırtılma + Kesme hasarı) [48,49].

Hasar tipleri incelendiği zaman Şekil 3.10a’da meydana gelen hasar için iki farklı durum vardır. Birincisi delik kenarında kalan kesit yükleme için fazla küçüktür, ikincisi ise tek yönde takviyeli kompozit yapılarda fiber takviye açısının yükleme doğrultusuna tam dik olması halinde bu hasar tipi görülebilir. Yırtılma hasarı durumu için hasara neden olan gerilmeler Denklem (3.1) ile hesaplanır.

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

Burada $P_{\max}$; levhaya uygulanan hasar anındaki maksimum yük, t : levha kalınlığı, W :levha genişliği, D : pim çapıdır. Şekil 3.10b’ de görülen kesme hasarı durumu genellikle (E/D) oranının bir veya bire yaklaştığı durumlarda görülmektedir. Kesme hasarına neden olan gerilmeler Denklem (3.2) ile hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_{kesme} = \frac{P_{\max}}{2 \cdot E \cdot t} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{ezilme} = \frac{P_{\max}}{D \cdot t} \quad (3.3)$$

Şekil 3.10c’deki ezilme hasarı görülmesi durumu emniyetli çalışma açısından uygun olan ve özellikle izotropik malzemelerde görülen bir hasar türüdür. Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde ise delik içerisindeki gerilmelerden dolayı ezilmiş olan matris 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 Denklem (3.3) kullanılmaktadır. Şekil 3.3d’de ise kesme ve yırtılma hasarının aynı anda gerçekleşmiş olması yüklemelerin eksantrikliğinden, iki eksen de farklı yükleme durumundan veya fiber takviye açısından dolayı ortaya çıkmaktadır.

4. KOMPOZİT MALZEMELERDE HASAR ANALİZİ

Tasarımın başarılı olması için malzeme daha az ve daha etkin kullanılmalıdır. Bundan dolayı hasar analizi dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Uygulanan yüklerin malzemenin dayanım sınırlarını aşması durumunda malzemede hasar meydana gelecektir. Bu durumun oluşmaması için malzemenin mekanik özellikleri ve dayanım noktası daha önceden araştırılmış olmalıdır. Bunun için deneyler yapılarak malzemeye ait mekanik özellikler belirlenebilmektedir.

Kompozit malzemeye ait mekanik özellikler çekme, basma ve kayma testleriyle belirlenir.

Kompozit malzemede üç ekseninde maksimum basma, çekme ve kayma mukavemetleri aşağıdaki gibi adlandırılır.

X_c : takviye doğrultusundaki (1) maksimum basma mukavemetini,

X_t : takviye doğrultusundaki (1) maksimum çekme mukavemetini,

Y_c : takviyeye dik doğrultudaki (2) maksimum basma mukavemetini,

Y_t : takviyeye dik doğrultudaki (2) maksimum çekme mukavemetini,

Z_c : 1-2 düzlemine dik doğrultudaki (3) maksimum basma mukavemetini,

Z_t : 1-2 düzlemindeki dik doğrultudaki (3) maksimum çekme mukavemetini,

S : kayma mukavemetini tanımlar.

4.1. Maksimum Asal Gerilme Teorisi

Asal eksenlerdeki gerilme değerlerinin maksimum mukavemet değerlerini aşması halinde malzemede hasar oluşacağını belirten kriterdir.

Çekme hasarı için;

$$\begin{aligned}\sigma_1 &> X_t & (\sigma_1 > 0) \\ \sigma_2 &> Y_t & (\sigma_2 > 0) \\ \sigma_3 &> Z_t & (\sigma_3 > 0)\end{aligned}\tag{4.1}$$

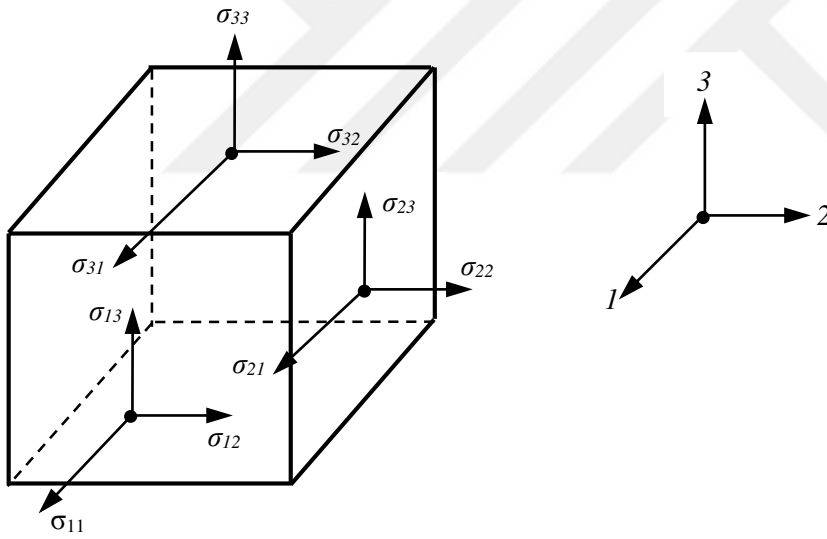
Basma hasarı için;

$$\begin{aligned}\sigma_1 &> X_c & (\sigma_1 < 0) \\ \sigma_2 &> Y_c & (\sigma_2 < 0) \\ \sigma_3 &> Z_c & (\sigma_3 < 0)\end{aligned}\tag{4.2}$$

Kayma hasarı için;

$$\tau_{12} > S \quad (\tau_{12} > 0)\tag{4.3}$$

olma şartı aranmaktadır. Bağıntılarda; σ_1, σ_2 ve σ_3 sırasıyla 1,2 ve 3 doğrultusundaki maksimum normal gerilmeyi, τ_{12} ise 1-2 düzlemindeki maksimum kayma gerilmesini tarif eder. Şekil 4.1. 'de üç boyutlu gerilme sistemi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Üç boyutlu gerilme sistemi.

4.2. Maksimum Asal Uzama Teorisi

Bu teori *St Venant* tarafından ileri sürülmüş ve uzamanın onun maksimum değerine ulaştığı zaman kırılmanın oluştuğu varsayılmıştır. Buna göre nedenle $(\varepsilon_{11})_t$ maksimum çekme uzamasının;

$$(\varepsilon_{II})_t = \varepsilon^* \quad (4.4)$$

değerine ulaşması durumunda meydana gelir. Burada; ε^* çekilen iş parçasında kırılmada çekme uzamasıdır. Basma uzaması için de benzer şekilde;

$$(\varepsilon_{II})_c = \varepsilon^* \quad (4.5)$$

yazılabilir.

Yukarıda açıklanan iki teori kırılmanın normal gerilmelerden dolayı olduğunu, büyüklüğüne bağlı olmaksızın kayma gerilmelerinin ihmal edildiğini varsayar. Bu nedenle, bu teoriler çekme altında sadece gevrek malzemelerin kırılmaları ile ilgili davranışlarını açıklar.

4.3. Hashin Hasar Teorisi

Hashin hasar teorisi sonlu eleman modellemesinde kullanılması için ideal bir teoridir. Özellikle ilerlemeli hasar modellemesi için uyarlanmıştır. Hasar meydana geldiğinde malzeme mekanik özellikleri belirli katsayılarla çarpılarak indirgenir. Bu teoriye göre aşağıdaki durumlar gerçekleştiğinde hasar meydana gelir.

Fiber çekme hasarında:

$$\left(\frac{\sigma_I}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{I2}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{I3}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_I > 0 \text{ olmalı}) \quad (4.6)$$

Fiber basma hasarında:

$$\left(\frac{\sigma_I}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_I < 0 \text{ olmalı}) \quad (4.7)$$

Matris çekme hasarında:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_2 > 0 \text{ olmalı}) \quad (4.8)$$

Matris basma hasarında:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_2 < 0 \text{ olmalı}) \quad (4.9)$$

şartı sağlanmalıdır. Çekme durumunda tabaka ayrılma (delaminasyon) hasarı: z doğrultusunda meydana gelen bir hasar tipidir.

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_3 > 0 \text{ olmalı}) \quad (4.10)$$

Basma durumunda tabaka ayrılma hasarı:

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_3 < 0 \text{ olmalı}) \quad (4.11)$$

şartında elde edilir. Fiber-Matriks arası kayma hasarı, fiber ile matriksin birbirinden ayrılması durumunda meydana gelen bir hasar türüdür.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_b}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S}\right)^2 \geq 1 \quad (\sigma_1 < 0 \text{ olmalı}) \quad (4.12)$$

4.4. Tsai-Wu Hasar Teorisi

Kompozit malzeme hasar analizlerinde en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Aşağıdaki eşitsizlik durumunda malzemede hasar oluşmaz.

$$F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \geq I \quad (i, j=1, \dots, 6) \quad (4.13)$$

İki eksenli gerilme hali için bu eşitlik;

$$F_1 \cdot \sigma_{11} + F_2 \cdot \sigma_{22} + F_{11} \cdot \sigma_{11}^2 + F_{22} \cdot \sigma_{22}^2 + F_{66} \cdot \sigma_{12}^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_{11} \cdot \sigma_{22} \geq I \quad (4.13a)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlikteki F değerleri;

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad (4.13b)$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_t \cdot X_c} \quad (4.13c)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad (4.14d)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t \cdot Y_c} \quad (4.14e)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (4.14e)$$

şeklinde tanımlanırlar. Bu değerler (4.13a) nolu eşitlikte yerine konulduğunda; F_{12} 'de;

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad (4.14f)$$

veya

$$F_{12} = -\frac{1}{2 \cdot \sqrt{X_t \cdot X_c \cdot Y_t \cdot Y_c}} \quad (4.14g)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

4.5. Hoffman Hasar Teorisi

Kompozit tabakadaki gerilme dağılımları aşağıdaki durumu sağlıyorsa malzemede hasar oluşmaz.

$$\frac{C_1 \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2 \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3 \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_4 \cdot \sigma_1 + C_5 \cdot \sigma_2 + C_6 \cdot \sigma_3 + C_7 \cdot \tau_{23}^2 + C_8 \cdot \tau_{13}^2 + C_9 \cdot \tau_{12}^2}{F} < 1 \quad (4.14)$$

Denklem (4.14)' te F ; mukavemet gerilme bileşenidir. ($C_i \ i= 1,2,3,\dots,9$) katsayıları ise Denklem (4.15) ile tanımlanır.

$$C_1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{Z_t \cdot Z_c} + \frac{1}{Y_t \cdot Y_c} + \frac{1}{X_t \cdot X_c} \right) \quad (4.15a)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_t \cdot X_c} + \frac{1}{Z_t \cdot Z_c} + \frac{1}{Y_t \cdot Y_c} \right) \quad (4.15b)$$

$$C_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_t \cdot X_c} + \frac{1}{Y_t \cdot Y_c} + \frac{1}{Z_t \cdot Z_c} \right) \quad (4.15c)$$

$$C_4 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad (4.15d)$$

$$C_5 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \quad (4.15e)$$

$$C_6 = \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \quad (4.15f)$$

$$C_7 = \frac{1}{S_{23}^2} \quad (4.15g)$$

$$C_8 = \frac{1}{S_{13}^2} \quad (4.15h)$$

$$C_9 = \frac{I}{S_{12}^2} \quad (4.15i)$$

4.6. Tsai-Hill Hasar Teorisi

Bu teori ortotropik malzemeler için öngörülmüştür. İzotropik malzemeler için düzenlenmiş olan *Von Mises* hasar teorisinin anizotropik malzemeler için düzenlenmiş halidir.

$$(G+H) \cdot \sigma_1^2 + (F+H) \cdot \sigma_2^2 + (F+G) \cdot \sigma_3^2 - 2 \cdot H \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 - 2 \cdot G \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_3 - 2 \cdot F \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3 + 2 \cdot L \cdot \tau_{23}^2 + 2 \cdot M \cdot \tau_{13}^2 + 2 \cdot N \cdot \tau_{12}^2 < I \quad (4.16)$$

F , G , H , L , M ve N hasar direnç parametreleri, malzeme direnç parametreleri olan X , Y ve S ile ilişkilendirilecek olursa;

$$2 \cdot N = \frac{I}{S^2} \quad (4.17)$$

$$G+H = \frac{I}{X^2} \quad (4.18)$$

$$F+H = \frac{I}{Y^2} \quad (4.19)$$

$$F+G = \frac{I}{Z^2} \quad (4.20)$$

$$2 \cdot F = \frac{I}{Y^2} + \frac{I}{Z^2} - \frac{I}{X^2} \quad (4.21)$$

$$2 \cdot G = \frac{I}{X^2} + \frac{I}{Z^2} - \frac{I}{Y^2} \quad (4.22)$$

$$2 \cdot H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \quad (4.23)$$

şeklinde yazılabilir.

4.7. Puck Hasar Teorisi

Puck hasar kriteri, *Coulomb* ve *Morh* hipotezine dayalı olarak Paul [38] tarafından geliştirilmiştir. *Puck* hasar kriterinin ayrıntıları *Puck* ve *Schuermann* [39, 40] tarafından verilmiştir. Tanımlanan beş temel hasar sırası ile aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Fiber çekme hasarı;

$$\frac{1}{\varepsilon_{1t}} \cdot \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f12}} \cdot m_{\sigma f} \cdot \sigma_2 \right) = 1 \quad (4.24)$$

için;

$$\left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f12}} \cdot m_{\sigma f} \cdot \sigma_2 \right) \geq 0 \quad (4.25)$$

şartında gerçekleşir. Fiber basma hasarı;

$$\frac{1}{\varepsilon_{1c}} \left| \left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f12}} \cdot m_{\sigma f} \cdot \sigma_2 \right) \right| + (10 \cdot \gamma_{12})^2 = 1 \quad (4.26)$$

için

$$\left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f12}} \cdot m_{\sigma f} \cdot \sigma_2 \right) < 0 \text{ ve } \sigma_1 < 0 \quad (4.27)$$

şartlarında meydana gelir. Matris (inter fiber) çekme hasarı (Mod A);

$$\sqrt{\left(\frac{\tau_{I2}}{S_{I2}}\right)^2 + \left(1 - P_{\perp II}^{(+)} \cdot \frac{Y_t}{S_{I2}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_2}{Y_t}\right)^2} + P_{\perp II}^{(+)} \cdot \frac{\sigma_2}{S_{I2}} = 1 - \frac{\sigma_I}{\sigma_{ID}} \quad (4.28)$$

değerine ulaştığı zaman

$$\sigma_2 \geq 0 \quad (4.29)$$

durumu için elde edilir. Düzlem kayma halinde matris hasarı (Mod B);

$$\frac{Y_t}{S_{I2}} \cdot \sqrt{\tau_{I2}^2 + (P_{\perp II}^{(-)} \cdot \sigma_2)^2} + P_{\perp II}^{(-)} \cdot \sigma_2 = 1 - \frac{\sigma_I}{\sigma_{ID}} \quad (4.30)$$

için;

$$0 \leq \left| \frac{\sigma_2}{\tau_{I2}} \right| \leq \frac{R_{\perp I}^A}{|\tau_{I2C}|} \quad \text{ve} \quad \sigma_2 < 0 \quad (4.31)$$

olduğunda gerçekleşir. Matris basma hasarı (Mod C) ise

$$\left[\left(\frac{\tau_{I2}}{2 \cdot (1 + P_{\perp I}^{(-)} \cdot S_{I2})} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y_C} \right)^2 \right] \cdot \frac{\sigma_2}{(-\sigma_2)} = 1 \quad (4.32)$$

değeri elde edildiği zaman

$$0 \leq \left| \frac{\tau_{I2}}{\sigma_2} \right| \leq \frac{|\tau_{I2C}|}{R_{\perp I}^A} \quad \text{ve} \quad \sigma_2 < 0 \quad (4.33)$$

şartı için hasar elde edilir. Burada $\{\varepsilon_{1t}, \varepsilon_{1c}\}$, sırasıyla çekme ve basma hasarı için şekil değiştirme oranlarını, ε_1 fiber doğrultusundaki şekil değiştirmeyi, $\{v_{f12}, E_{f1}\}$ (Tablo 4.1), fiber için Poisson oranı ve elastisite modülünü, $m_{\sigma f}$, gerilme büyütme faktörünü, $\{Y_T, Y_C, S_{12}\}$, fibere dik doğrultudaki çekme ve basma dayanımı ile kayma dayanımını, $\{P_{\perp\parallel}^{(+)}, P_{\perp\parallel}^{(-)}, P_{\perp\perp}^{(-)}\}$, eğim parametrelerini temsil eder (Tablo 4.2).

Tablo 4.1. Kompozit malzeme için fiber özellikleri [54].

Mekanik Özellik	Tanım	Değer
ε_{1t}	Çekme hasarı için şekil değiştirme oranı	%1.45
ε_{1c}	Basma hasarı için şekil değiştirme oranı	%1.00
v_{f12}	Karbon fiber için Poisson oranı	0.25
E_{f1}	Karbon fiber için elastisite modülü	225000 MPa

Tablo 4.2. Puck eğim parametreleri [40].

Parametre	Değer	
	Cam fiber/epoksi	Karbon fiber/epoksi
$P_{\perp\parallel}^{(+)}$	0.30	0.35
$P_{\perp\parallel}^{(-)}$	0.25	0.30
$P_{\perp\perp}^{(-)}$	0.20-0.25	0.25-0.30

$R_{\perp\perp}^A$, uygulama düzlemindeki kayma dayanımı, τ_{12c} , (σ_2, τ_{12}) eğrisindeki kritik nokta ve σ_{1D} , doğrusal indirgeme gerilme değeridir. Yukarıda tanımlanan çeşitli parametreler için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$R_{\perp\perp}^A = \frac{S_{I2}}{2 \cdot P_{\perp\perp}^{(-)}} \left(\sqrt{1 + 2 \cdot P_{\perp\perp}^{(-)} \cdot \frac{Y_C}{S_{I2}}} - 1 \right) \quad (4.34)$$

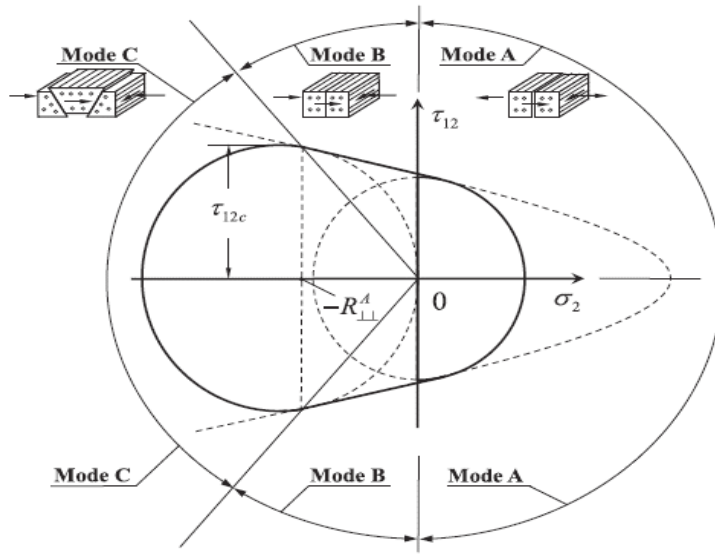
$$\tau_{12c} = S_{I2} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot P_{\perp\perp}^{(-)}} \quad (4.35)$$

$$P_{\perp\perp}^{(-)} = P_{\perp\perp}^{(-)} \cdot \frac{R_{\perp\perp}}{S_{I2}} \quad (4.36)$$

Denklemler (4.24, 4.26, 4.28, 4.30, 4.32)'un sol tarafları (σ_2, τ_{12}) gerilmelerini ve $\{Y_T, Y_C, S_{12}\}$ malzeme dayanımlarını içerir ve mevcut gerilme durumunun hasar limitine yakınlığını tarif eder (f_e) [55]. $f_e = 1$ için $(\sigma_1 = 0)$ ilgili kompozit tabakasındaki eleman hasarlıymış gibi davranacak, $f_e < 1$ için ise hasar olmadığı kabulü yapılacaktır. f_e 'nin maksimum değerinin olduğu kırılma düzlemi (kd) Mod C için elde edilecektir. Mod C için potansiyel kırılma düzlemi (Şekil 4.2)

$$\frac{df_e(\theta)}{d\theta} = 0 \quad (4.37)$$

durumu ile bulunur (Şekil 4.3). Mod A, B ve C için hasar düzlemi açıları



Şekil 4.2. A, B ve C hasar modlarında $(\sigma_1 = 0)$ için (σ_2, τ_{12}) kırılma eğrisi [38, 50].

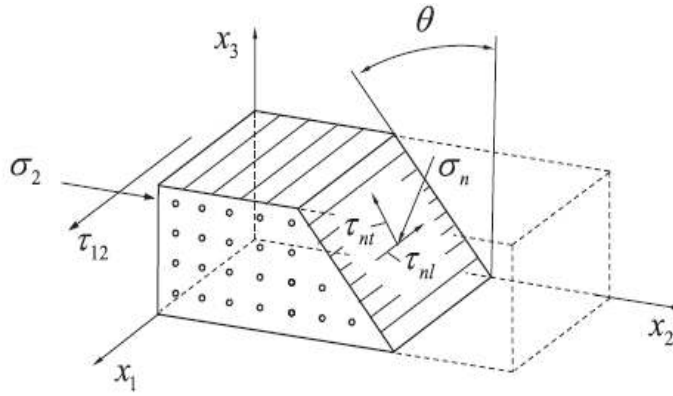
$$\theta_{kd}^{Mod-A} = 0 \quad (4.38)$$

$$\theta_{kd}^{Mod-B} = 0 \quad (4.39)$$

$$\theta_{kd}^{Mod-A} = Arc \cos \sqrt{\frac{1}{2 \cdot [1 + p_{\perp\perp}^{(-)}]} \cdot \left[\left(\frac{\tau_{12}}{\sigma_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{R_{\perp\perp}^A}{S_{12}} \right)^2 + 1 \right]} \quad (4.40)$$

şeklindedir.

Fiber çekme ve basma hasarları ile Mod C hasar durumu son tabaka hasarını temsil ederken, Mod B ve Mod C ilk tabaka hasarını gösterir [54].



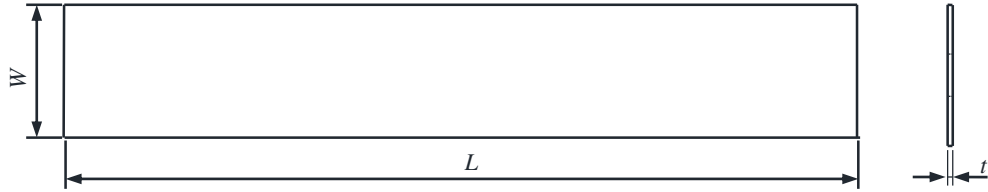
Şekil 4.3. Mod C kırılma düzlemi üzerinde normal ve kayma gerilmesi durumu [38, 50].

5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

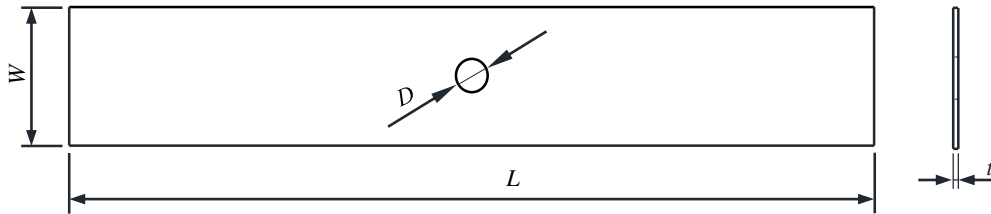
Çalışmada öncelikle çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentikli, U kenar çentikli, tek ve çift pim bağlantısı ile bağlanmış kompozit levhaların çekme deneyleri yapılmıştır. Kompozit levhalara 6 mm çapında tek ve seri pim bağlantı delikleri açılarak hasar davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla simetrik tabaka dizilimine sahip $[0^\circ]_4$ dokuma karbon fiberler ile takviye edilmiş epoksi reçineli kompozit levhalar kullanılmıştır. Deneysel çalışmada bağlantı türü olarak çözülebilir pim bağlantısı kullanılmıştır. Deneysel çalışma Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

5.1. Problemin Tanımlanması

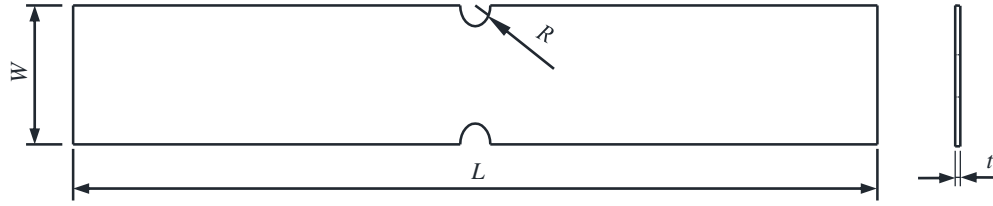
Çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentikli, U kenar çentikli, tek ve seri pim bağlantılı kompozit levhaların deneysel çalışmalarının sonucunda çekme yükü altında yük-uzama grafikleri elde edilmiş olup hasar yükleri belirlenmiştir. Çapraz dokuma karbon fiber/epoksi kompozitlerin hasar davranışları incelenmiştir. Numune ölçüleri Şekil 5.1-6 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir.



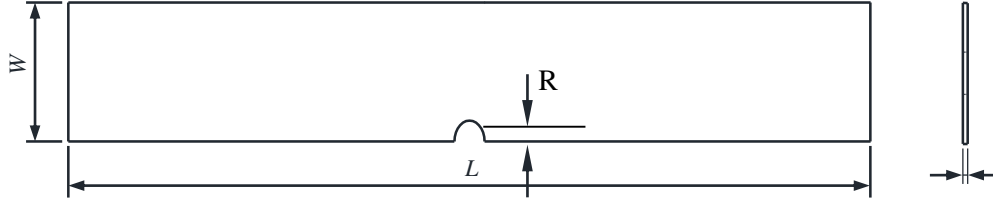
Şekil 5.1. Çentiksiz tabakalı kompozit numune.



Şekil 5.2. Dairesel delikli tabakalı kompozit numune.



Şekil 5.3. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numune.

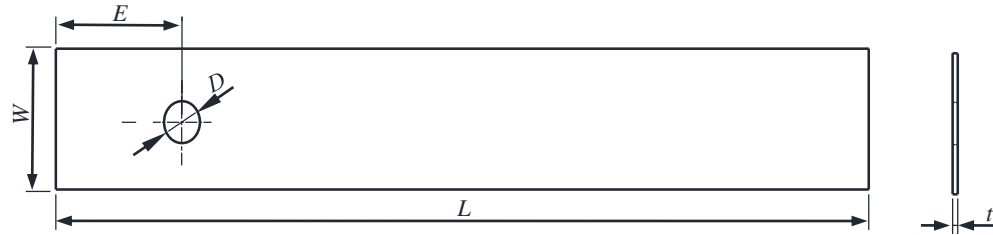


Şekil 5.4. U kenar çentikli tabakalı kompozit numune.

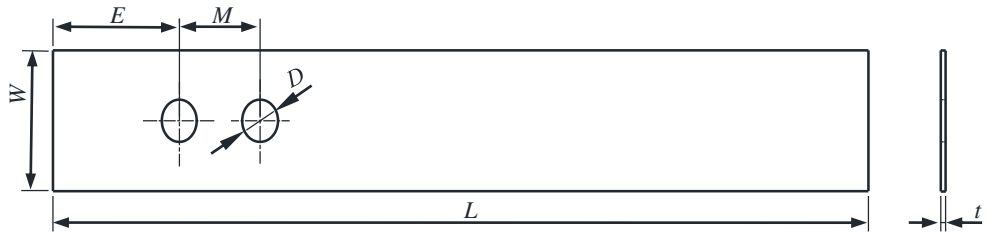
Tablo 5.1’ de numunelerin dairesel delik çapı (D), numune uzunluğu (L), çentik yarı çapı (R), numune kalınlığı (t), numune genişliği (W) ölçüleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Delikli, deliksiz ve çentikli numunelerine ait geometrik boyutlar.

D	Dairesel delik çapı	6 mm
L	Numune uzunluğu	160 mm
R	Çentik yarı çapı	3 mm
t	Numune kalınlığı	1 mm
W	Numune genişliği	20 mm



Şekil 5.5. Tek pim delikli tabakalı kompozit numune.



Şekil 5.6. Çift pim delikli tabakalı kompozit numune.

Tablo 5.2’ de tek ve çift pim delikli numunelerin pim çapı (D), pimin merkezi ile levhanın serbest kenarı arasındaki uzaklık (E), iki pim arasındaki uzaklık (M), numune uzunluğu (L), numune kalınlığı (t) ve numune genişliği (W) ölçüleri verilmiştir.

Tablo 5.2. Tek ve çift pim delikli numunelerine ait fiziksel özellikler.

D	Pim çapı	6 mm
E	Pimin merkezi ile levhanın serbest kenarı arasındaki uzaklık	12/18/24/30 mm
M	İki pim arasındaki uzaklık	9/12/15 mm
L	Numune uzunluğu	160 mm
t	Numune kalınlığı	1 mm
W	Numune genişliği	20 mm

Tablo 5.3’ de ise tek ve çift pim delikli numunelerin E/D ve M/D oranları ve numunelerin adlarını gösteren kodlama sistemi verilmiştir.

Tablo 5.3. Tek ve çift pim delikli numunelere ait gösterimler.

TE2	T: Tek pim bağlantısı	E2: $E/D=2$	-
TE3	T: Tek pim bağlantısı	E3: $E/D=3$	-
TE4	T: Tek pim bağlantısı	E4: $E/D=4$	-
TE5	T: Tek pim bağlantısı	E5: $E/D=5$	-
ÇE2M1.5	Ç: Çift pim bağlantısı	E2: $E/D=2$	M1.5: $M/D=1.5$
ÇE2M2	Ç: Çift pim bağlantısı	E2: $E/D=2$	M2: $M/D=2$
ÇE2M2.5	Ç: Çift pim bağlantısı	E2: $E/D=2$	M2.5: $M/D=2.5$
ÇE4M1.5	Ç: Çift pim bağlantısı	E4: $E/D=4$	M1.5: $M/D=1.5$
ÇE4M2	Ç: Çift pim bağlantısı	E4: $E/D=4$	M2: $M/D=2$
ÇE4M2.5	Ç: Çift pim bağlantısı	E4: $E/D=4$	M2.5: $M/D=2.5$

Tablo 5.4’ de ise çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentik, u kenar çentik numunelerin E/D , M/D oranları ve gösterim biçimleri verilmiştir.

Tablo 5.4. Çentikli numuneye ait gösterimler.

<i>A</i>	Çentiksiz numune	$R=0$
<i>B</i>	Yarım daire çift kenar çentik	$R=3$
<i>C</i>	Dairesel delikli numune	$R=3$
<i>D</i>	U kenar çentik	$R=3$

5.2. Numunelerin Hazırlanması

5.2.1. Delme işleminin yapılması

Levha serbest kenarından E mesafesinde, D çapında dairesel delikli, yarım daire kenar çentikli, U kenar çentikli, tek ve seri pim deliğe sahip numunelere mengeneyle tezgaha sabitlenerek matkap yardımıyla Tablo 5.5’ te belirtilen ölçülerde delikler açılmıştır. Delme işlemi Şekil 5.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Pim deliği açma işlemi.

Tablo 5.5. Tek ve çift pim delikli numunelere ait boyutlar.

Bağlantı tipi	L (mm)	t (mm)	E/D	M/D	W/D
Tek pim	160	1	2	-	3.33
Tek pim	160	1	3	-	3.33
Tek pim	160	1	4	-	3.33
Tek pim	160	1	5	-	3.33
Çift pim	160	1	2	1.5	3.33
Çift pim	160	1	4	1.5	3.33
Çift pim	160	1	2	2	3.33
Çift pim	160	1	4	2	3.33
Çift pim	160	1	2	2.5	3.33
Çift pim	160	1	4	2.5	3.33

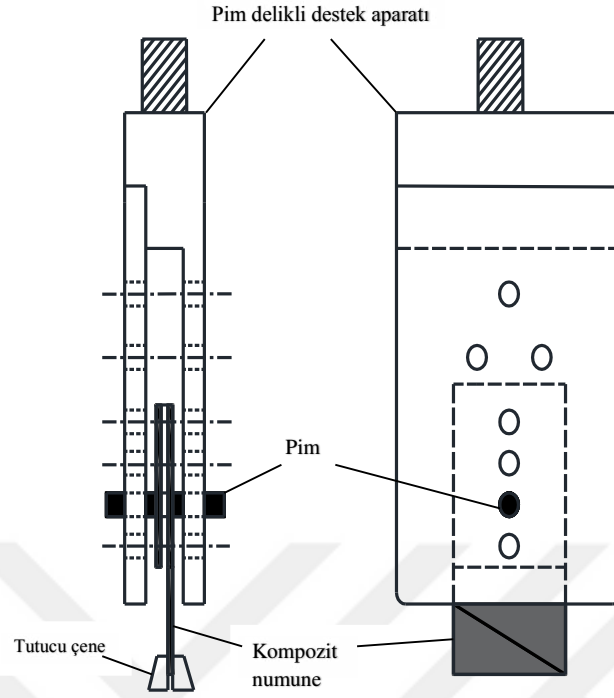
5.3. Deneylerin Yapılışı

Kompozit malzemelerin deneylerinin yapılması için 100 kN kapasiteye sahip *INSTRON BS8801* marka çekme cihazı kullanılmıştır. Hidrolik bir sistem aracılığıyla çekme cihazına güç verilip 100 kN' a kadar yükleme yapılabilmektedir. Çekme cihazından alınan veriler ara bağlantılar aracılığıyla bilgisayara aktarılıp monitör çıktısı alınabilmektedir. Malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 5.6' de verilmiştir.

Tablo 5.6. Tabakalı kompozit malzemeye ait mekanik özellikler.

Mekanik parametreler	Semboller	Değerler
Fiber doğrultusundaki elastisite modülü	E_1	37000 (MPa)
Fibere dik doğrultudaki elastisite modülü	E_2	36600 (MPa)
Poisson oranı	ν_{12}	0.25
Kayma modülü	G_{12}	878 (MPa)
Fiber doğrultusundaki çekme mukavemeti	X_t	530 (MPa)
Fibere dik doğrultudaki çekme mukavemeti	Y_t	530 (MPa)
Fiber doğrultusundaki basma mukavemeti	X_c	-242 (MPa)
Fibere dik doğrultudaki basma mukavemeti	Y_c	-242 (MPa)
Kayma mukavemeti	S	68.9 (MPa)

Kompozit numuneler, pimlere uyumlu açılmış delikli destek aparatı yardımıyla, çekme makinesine bağlanmıştır. Aparatın bir ucu çekme makinesine ankastre edilmiş, diğer taraftan kompozit numuneye tutucu çeneler yardımıyla çekme yükü uygulanmıştır. Şekil 5.8' de destek aparatı ve kompozit numune resmedilmiştir.



Şekil 5.8. Kompozit malzemenin destek aparatı yardımıyla yüklenmesi.

Numunelerin kuvvet-yer değiştirme eğrisi monitörden takip edilmiştir. Statik test gerçekleştirebilmek amacıyla çekme hızı 1 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.9.'da çekme test cihazı ve verilerin kaydedildiği bilgisayar görülmektedir.



Şekil 5.9. Çekme cihazı ve kayıt bilgisayarı.

Tüm numuneler çekme testine tabi tutularak çıkan sonuçlar çekme test cihazı ve bilgisayar arasındaki bağlantı aracılığıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Şekil 5.10.'da bilgisayar ekranından yükleme sırasında alınan anlık görüntü görülmektedir.



Şekil 5.10. Bilgisayar ekranından alınan grafik.

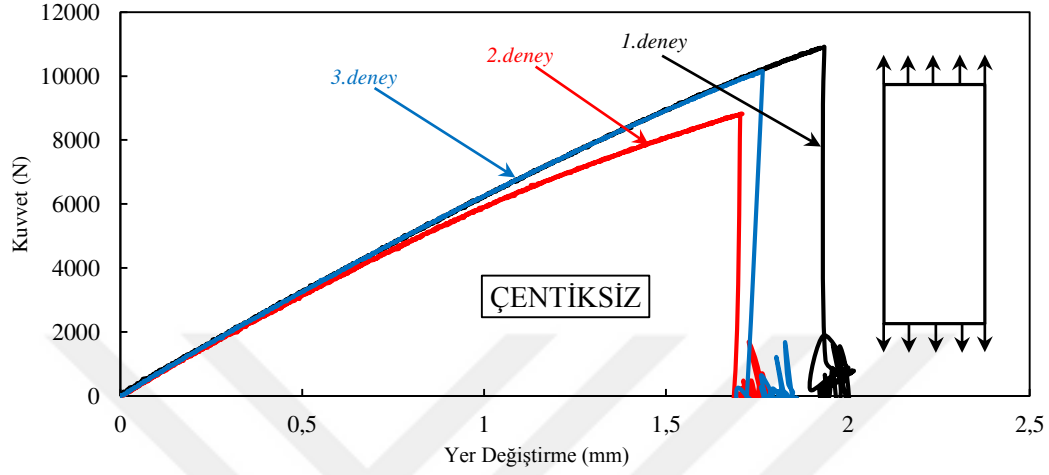
Numunelerin kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde; yükleme belirli bir nihai hasar noktasına çıktıktan sonra takviyeli kompozitteki, yükü taşıyan fiberlerin hasar görmesinden dolayı artık yük taşıyamadığı için numune uzamaya devam etmesine rağmen yüklemenin kademeli olarak düştüğü gözlemlenmiştir. Malzemenin maksimum dayanım yükünü görebilmek için yüklemeler nihai hasar noktalarına kadar devam ettirilmiştir. Çentik tipi ve pim bağlantı geometrisi deneylerde temel alınan değişken parametreler olmuştur.

5.4. Deneye ait grafiksel sonuçlar

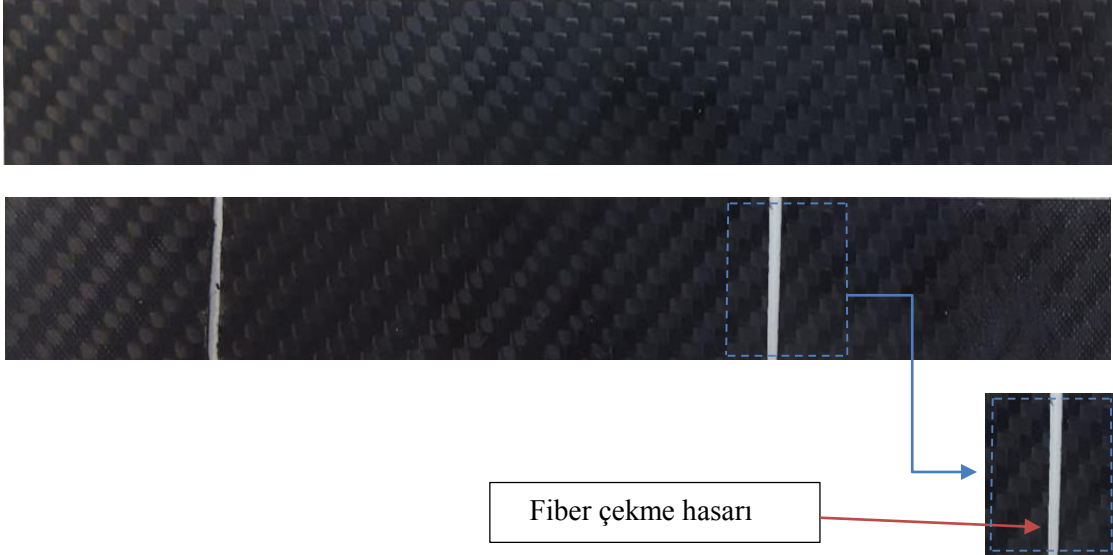
Yapılan deneyler sonucu elde edilen grafikler bu bölümde verilmiştir. Deneylerdeki numunelere ait sabit parametreler, fiber oryantasyon açıları ve tabaka dizilimleridir. E/D ve M/D oranları sabit olmayıp değişkendir. Şekil 5.11-42 arasındaki grafiklerde çekme testi sonucu elde edilmiş çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire kenar çentik, U kenar çentik, tek ve seri pim bağlantılı numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Bu deneysel sonuçlar kendi aralarında çentikli, tek pim bağlantılı ve çift pim bağlantılı olmak üzere üç

gruba ayrılmıştır. Bunun sebebi ise bu numuneleri kendi aralarında mukayese edebilmektir.

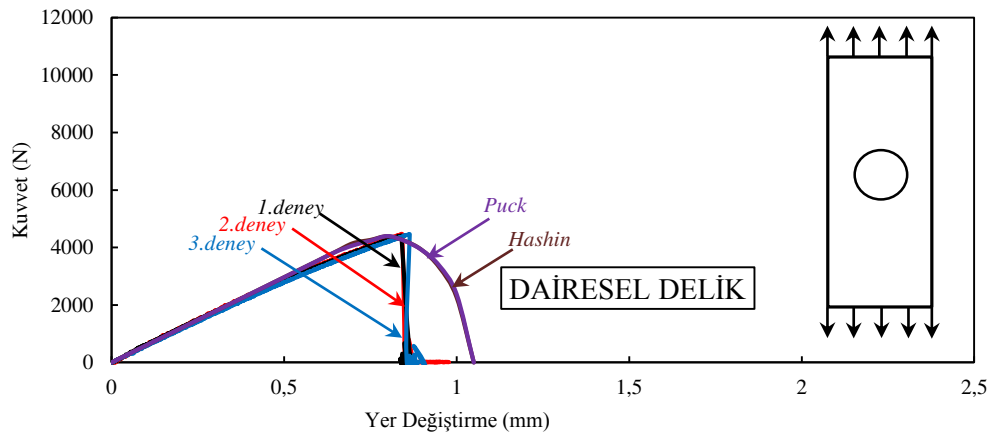
5.4.1. Çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire kenar çentik, U kenar çentik levhalara ait deney sonuçları ve hasar tipleri



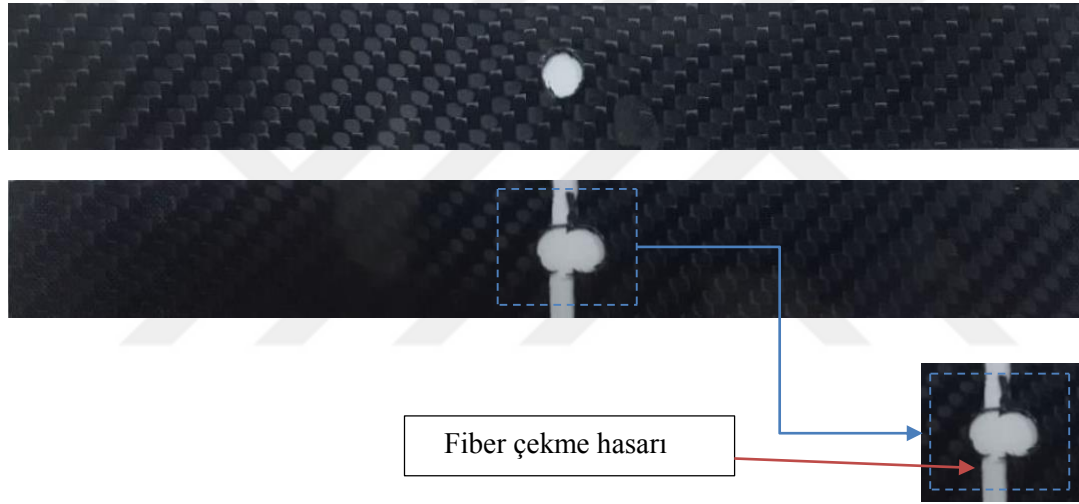
Şekil 5.11. Çentiksiz tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



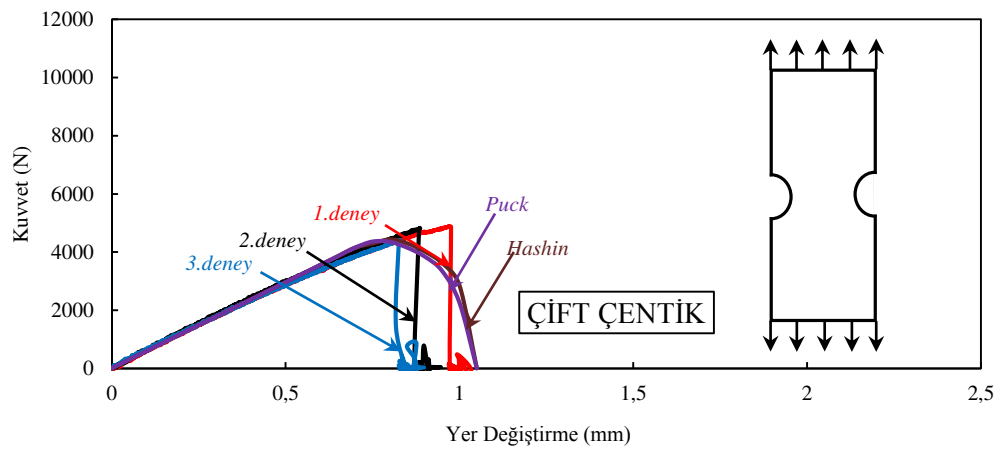
Şekil 5.12. Çentiksiz tabakalı kompozit numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



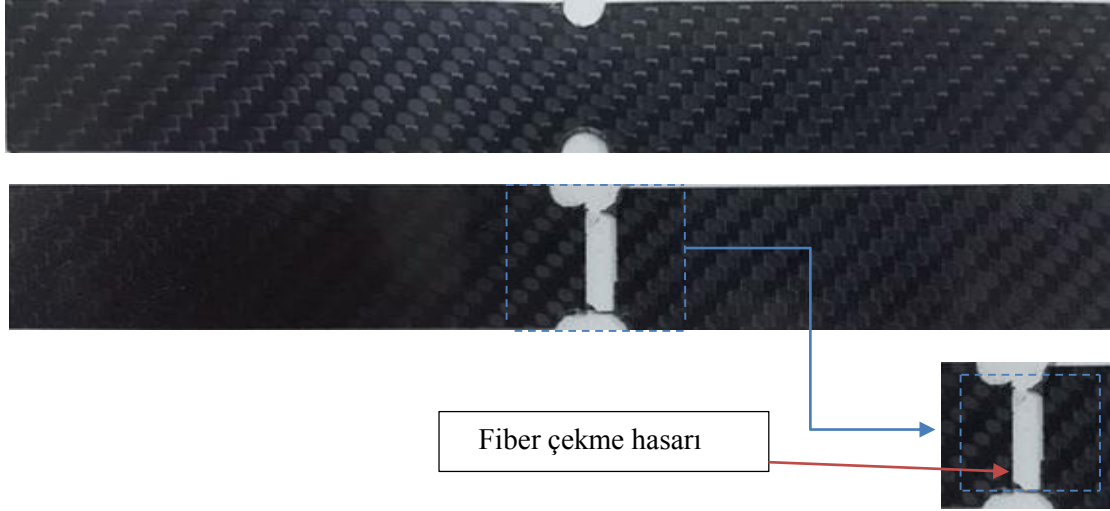
Şekil 5.13. Dairesel delikli tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



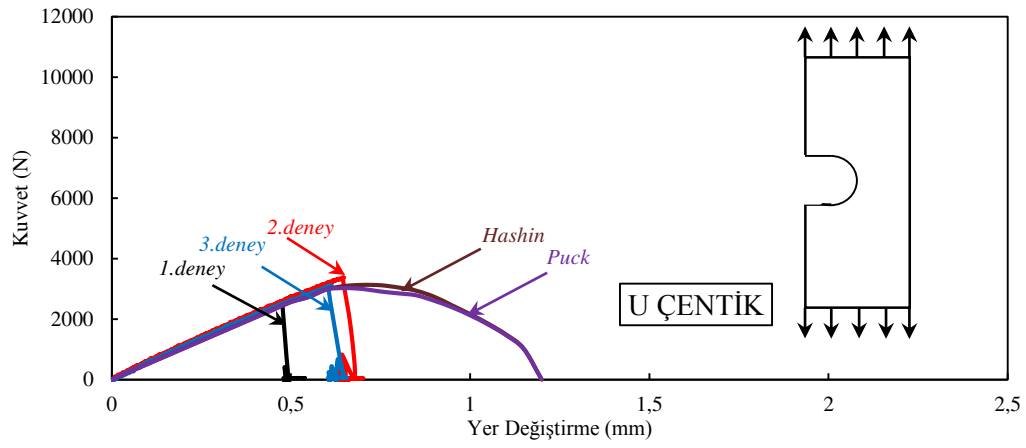
Şekil 5.14. Ortasında dairesel deliğe sahip numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



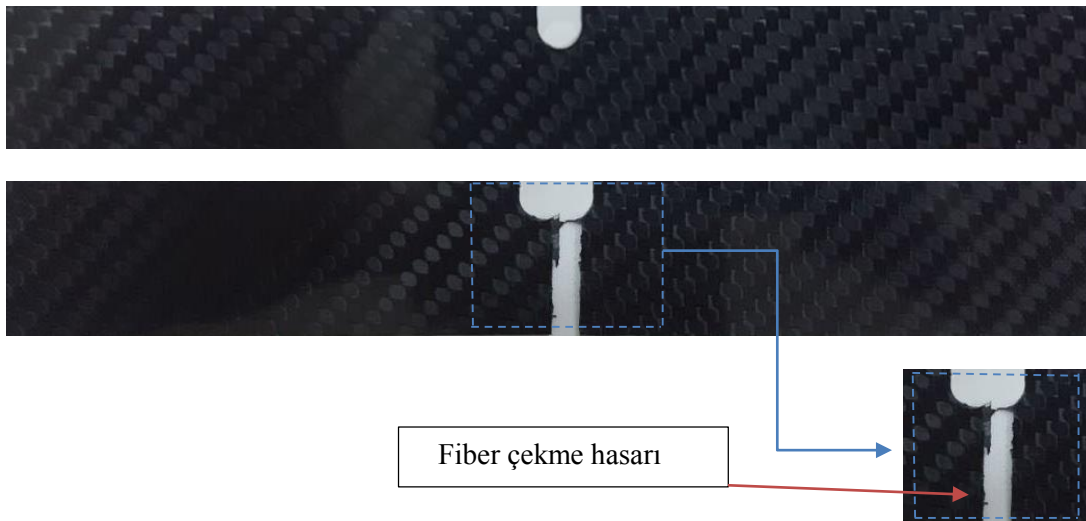
Şekil 5.15. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



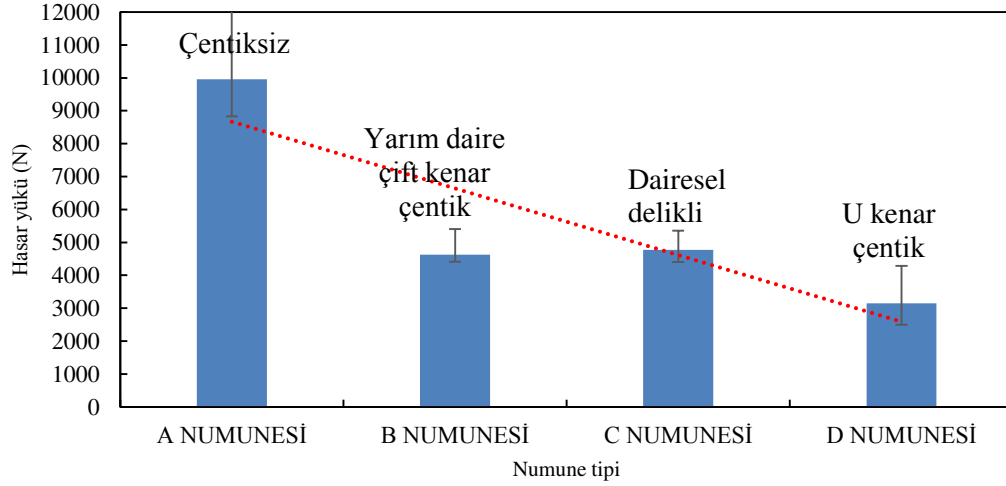
Şekil 5.16. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



Şekil 5.17. U kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



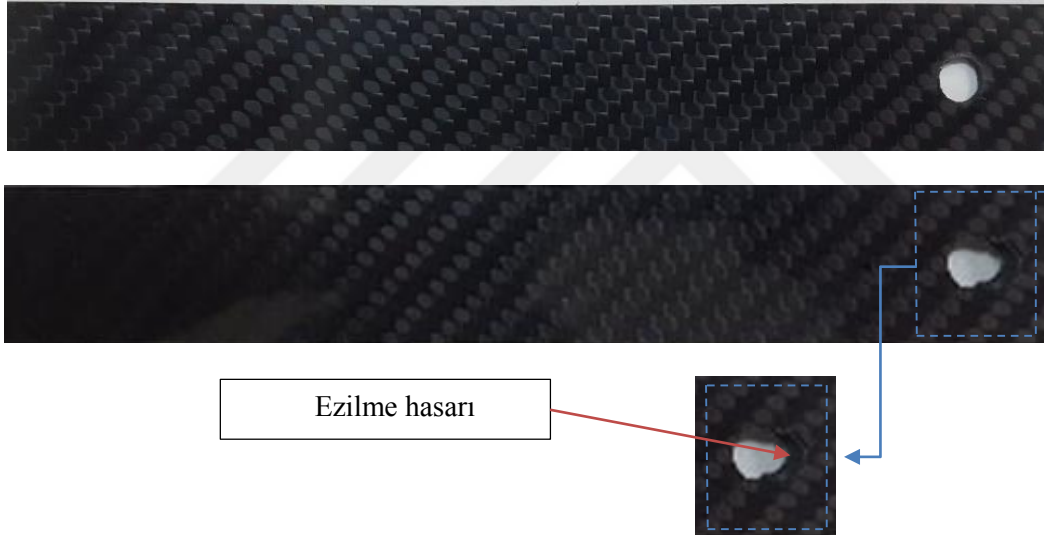
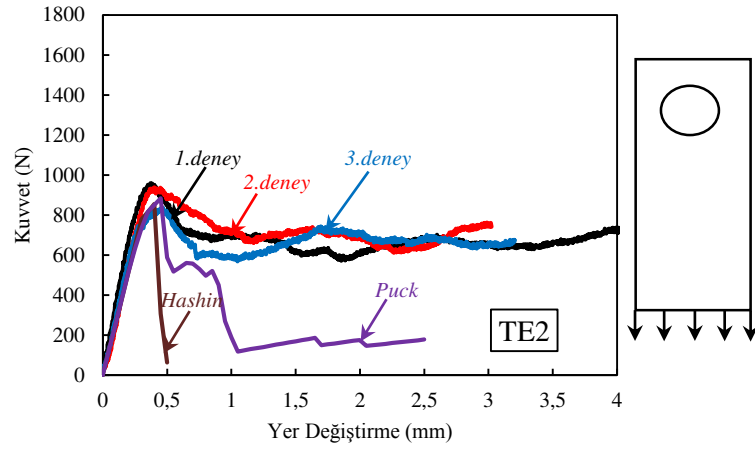
Şekil 5.18. U kenar çentikli tabakalı kompozit numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



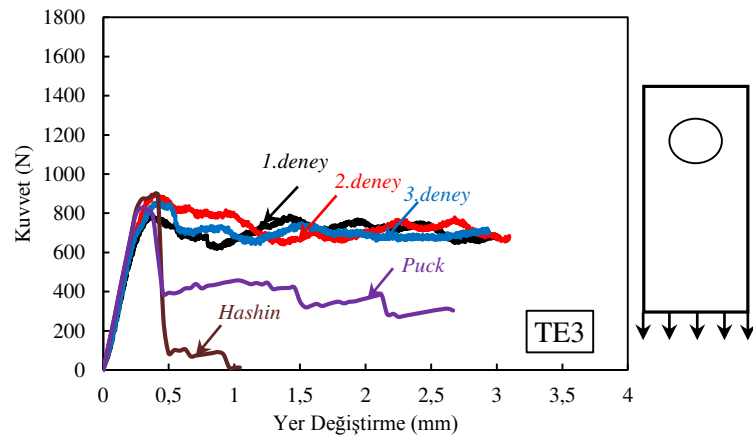
Şekil 5.19. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi.

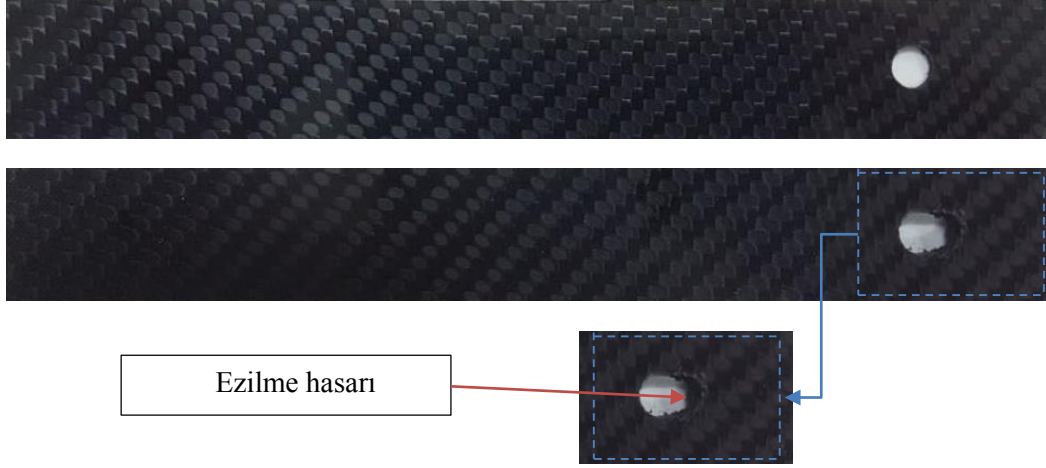
Şekil 5.11.' de Çentiksiz levha için kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri verilmiştir. Bu grafikten elde edilen sonuçlar ayrıca kompozitin modellenmesi için gerekli olan mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla da kullanılmıştır. Böylece kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin programda doğruluğu da test edilmiştir. Şekil 5.19.'da görüldüğü gibi çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentik, U kenar çentik levhalar kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü 3151 N değeri ile U kenar çentik, en yüksek hasar yükü ise 9962 N değeri ile çentiksiz levha için elde edilmiştir. Şekil 5.19' da hasar eğrisi giderek azalacak şekilde numuneler sıralanmıştır. Şekil 5.11, Şekil 5.13, Şekil 5.15 ve Şekil 5.17'deki grafiklerde yüklerin en büyük değeri aldıktan sonra düştüğü görülmektedir. Kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç bölgesinde malzemenin mekanik özelliğinden dolayı, doğrusal bir artış elde edilmiştir. Şekil 5.12, Şekil 5.14, Şekil 5.16 ve Şekil 5.18' de deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi fotoğraflarından görüldüğü gibi bu numunelerde yırtılma (fiber çekme) hasarı oluşmuştur. U kenar çentik, levha geometrisinde simetrik olmayan bir yapı oluşturduğu için, yükleme sırasında çekme yükünün yanında eğilme momenti etkisi meydana getirir. Dolayısıyla en küçük hasar yükü bu tip numunelerde meydana gelmiştir. Çift kenar çentikli numuneler ise, dairesel delikli numunelerden kısmen daha yüksek hasar yüküne sahiptir. Dolayısıyla yükü taşıyan aynı kesit alana sahip kenar çentik ve dairesel delik malzeme hasarı üzerinde yaklaşık olarak benzer etkiye sahiptir denilebilir. Çünkü yarım daire çift kenar çentikli numune hasar yükü, dairesel deliğe göre yalnızca %3 büyüktür.

5.4.2. Tek pim delikli levhalara ait deneysel sonuçlar

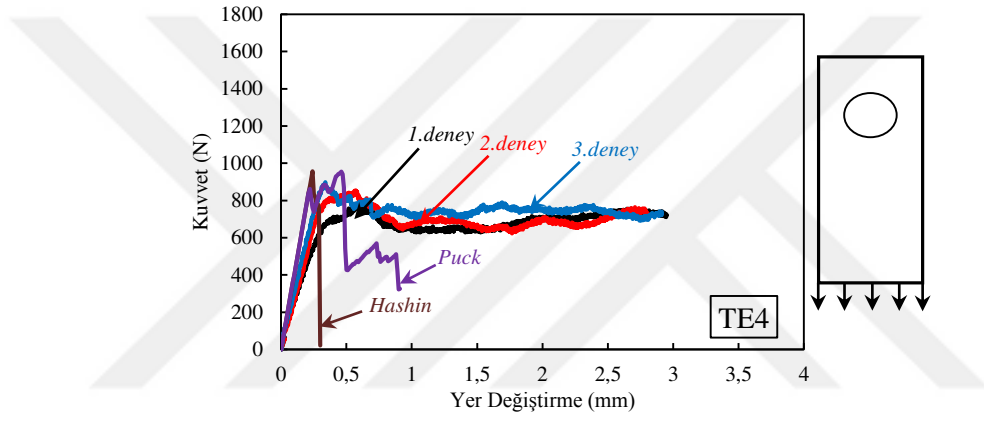


Şekil 5.21. $E/D=2$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.

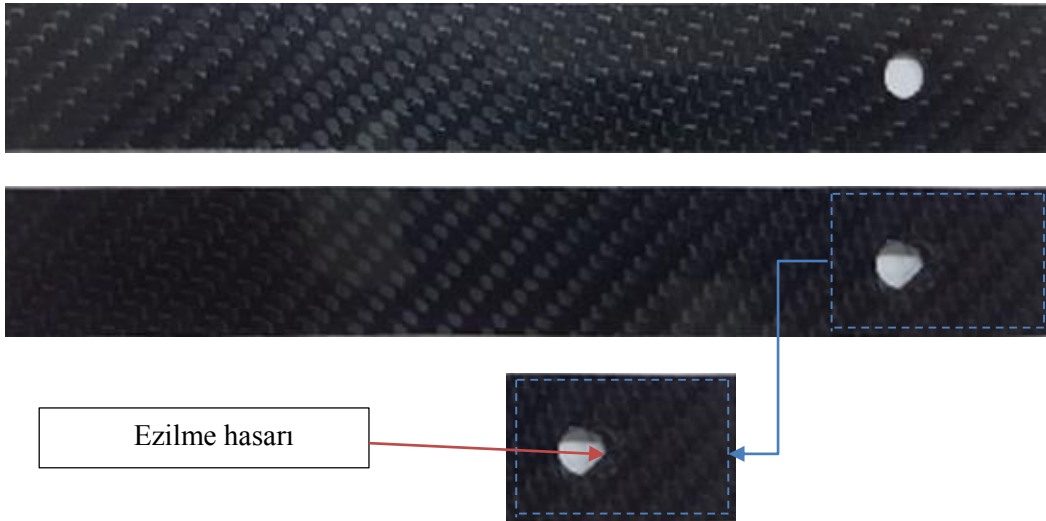




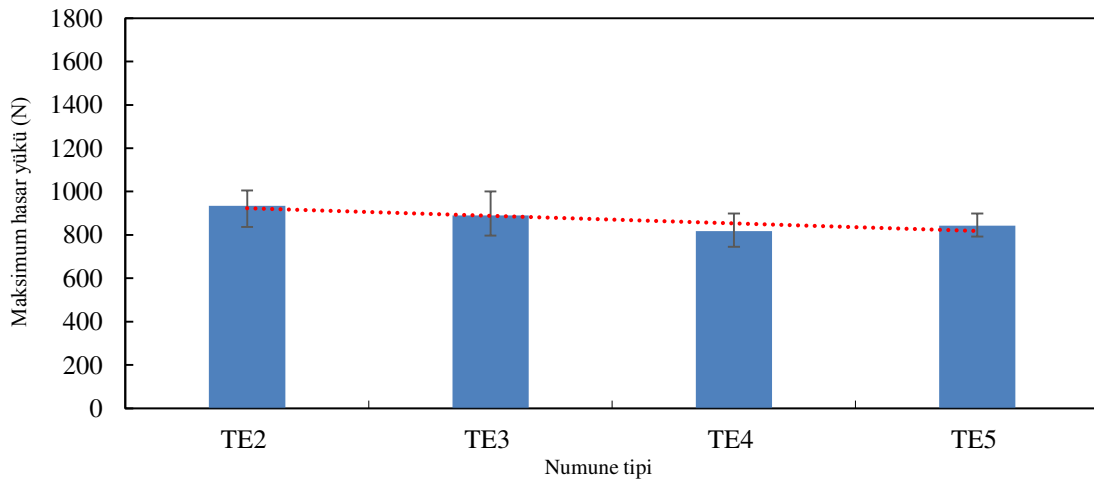
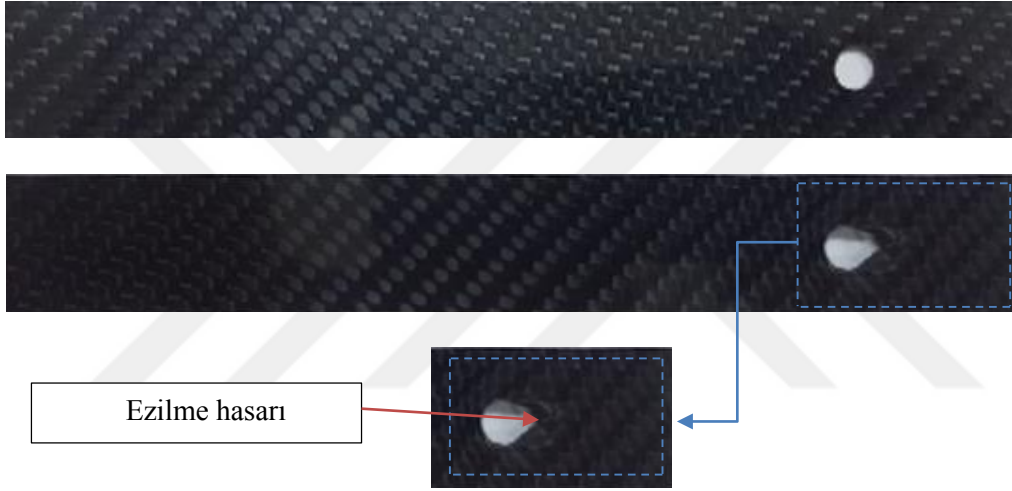
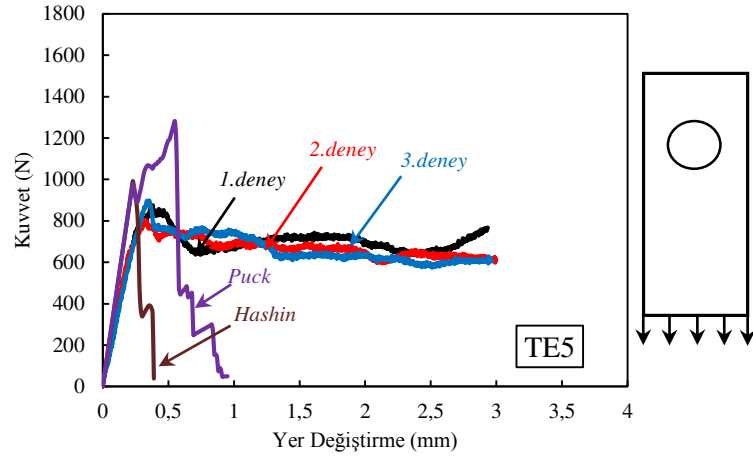
Şekil 5.23. $E/D=3$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



Şekil 5.24. $E/D=4$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



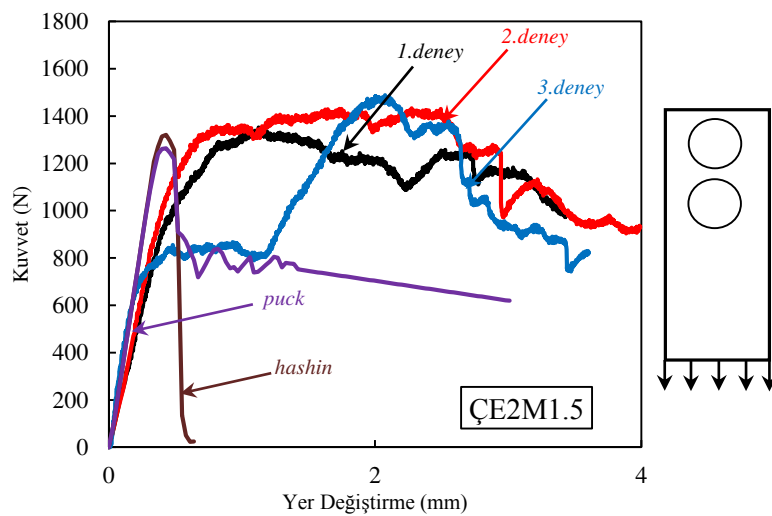
Şekil 5.25. $E/D=4$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



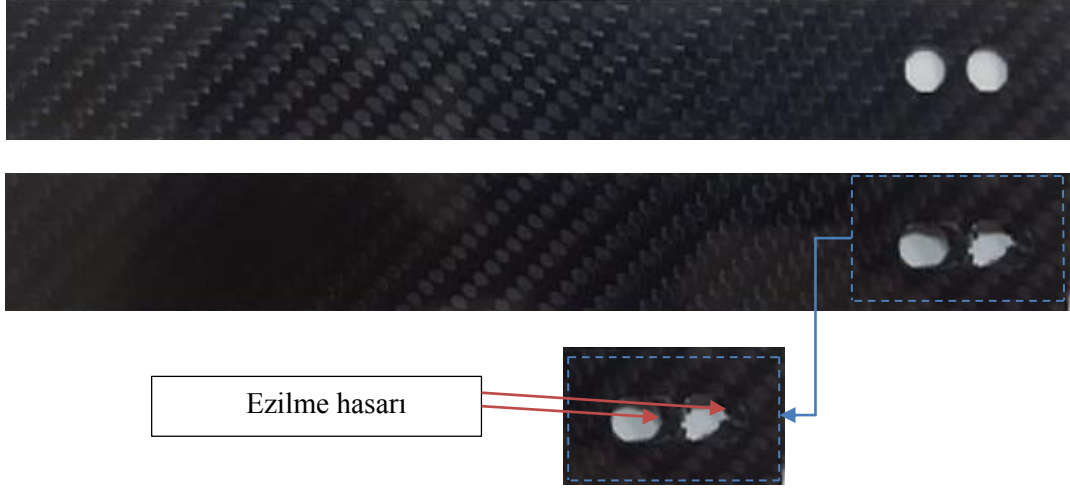
Şekil 5.28’ de hasar yüklerinin E/D geometrik parametreleri ile değişimi görülmektedir. Grafik incelendiğinde E/D oranının artışına paralel olarak hasar eğrisinin kısmen azaldığı görülmektedir. Şekil 5.28’ de tek pim bağlantılı levhalarda yapılmış olan deneylerde en düşük hasar yükü $E/D = 4$ değeri için 817 N olarak, en yüksek hasar yükü ise $E/D = 2$ değeri için 934 N olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.20, Şekil 5.22, Şekil 5.24 ve Şekil 5.26’daki grafiklerde yükün maksimum değere ulaşmasının ardından uzamanın sabit bir değeri için yük değerinin düştüğü ve daha sonra yaklaşık olarak sabit bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir. Bu grafikler $E/D = 2, 3, 4$ ve 5 değerleri için elde edilmiştir. Pim; bağlanmış olduğu deliği ezerek levhanın kısa kenarına doğru sabit bir genişlik değerine sahip parçayı sürüklemektedir. Deneyden sonra levhalar incelendiğinde hasar tipi olarak ezilme hasarının meydana geldiği yani pim tarafından bağlanmış olduğu delik yüzeyindeki matrisin kırılarak fiberlerin ezildiği görülmüştür. Tüm numunelerde ezilme hasarı meydana geldiği için E/D ’nin değişiminin hasar yükü üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Çapraz dokuma kompozitler kullanıldığında, çekmeye dik yöndeki fiberler levhayı ezilmeye zorlayacaktır.

K. Turan çalışmasında $[0]_4$ için E/D ’nin artışının tek yönlü takviyeli kompozitin hasarını artırdığını ve hasarın kesme olduğunu ancak $[0/90]_8$ kullanıldığında ise E/D ’nin değişiminin hasarı etkilemediğini ve ezilme şeklinde hasar tipinin oluştuğunu göstermiştir [58].

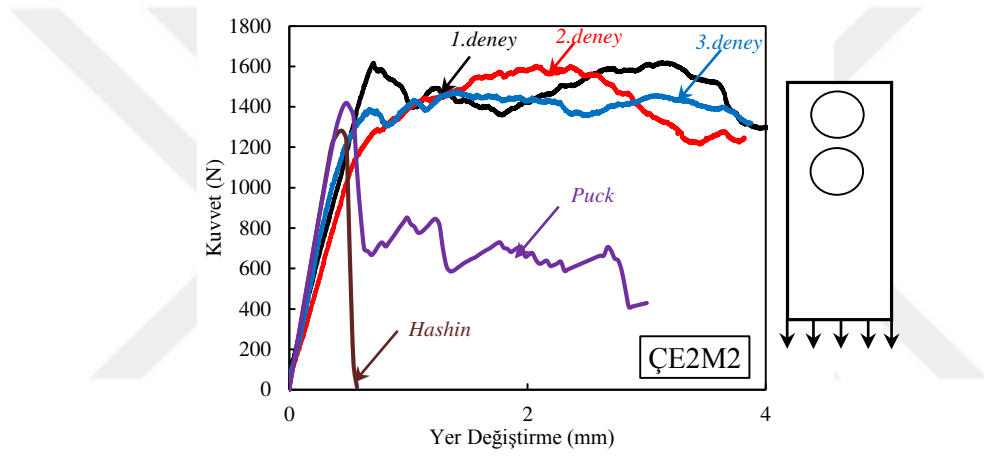
5.4.3. Çift pim delikli $M/D=1.5, 2, 2.5$ ve $E/D=2$ olan levhalara ait deneysel sonuçlar



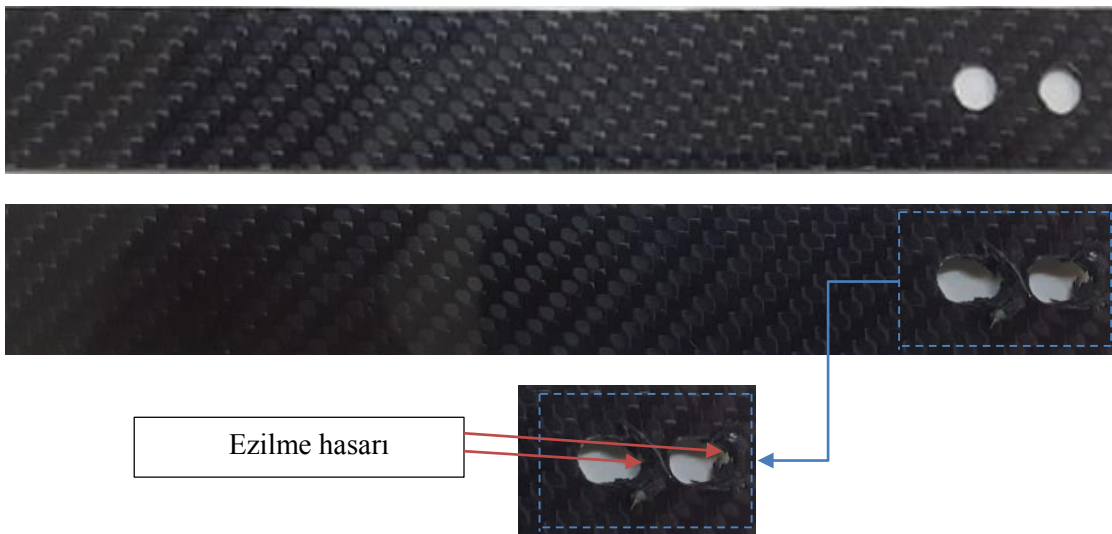
Şekil 5.29. $E/D=2, M/D=1.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



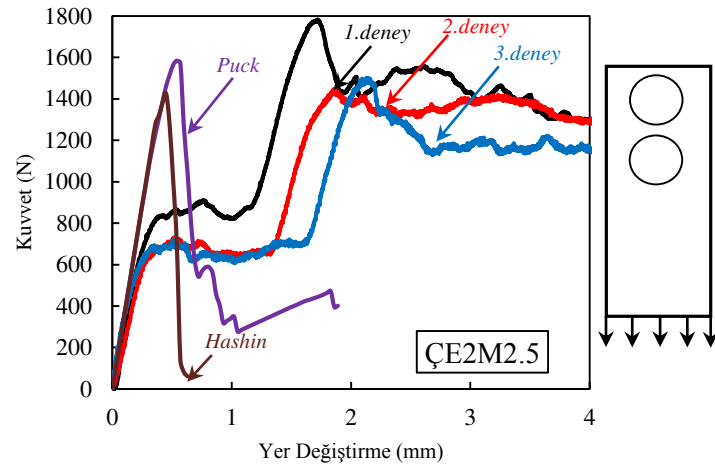
Şekil 5.30. $E/D=2$, $M/D=1.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



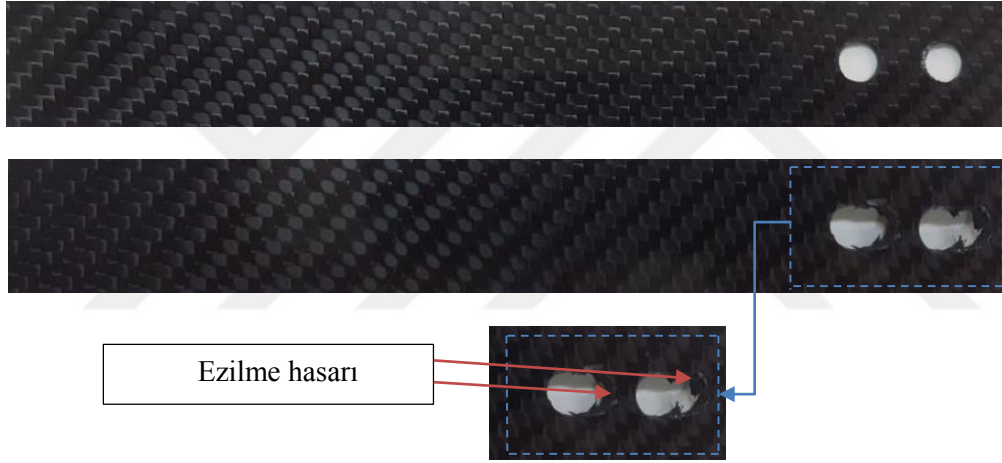
Şekil 5.31. $E/D=2$, $M/D=2$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



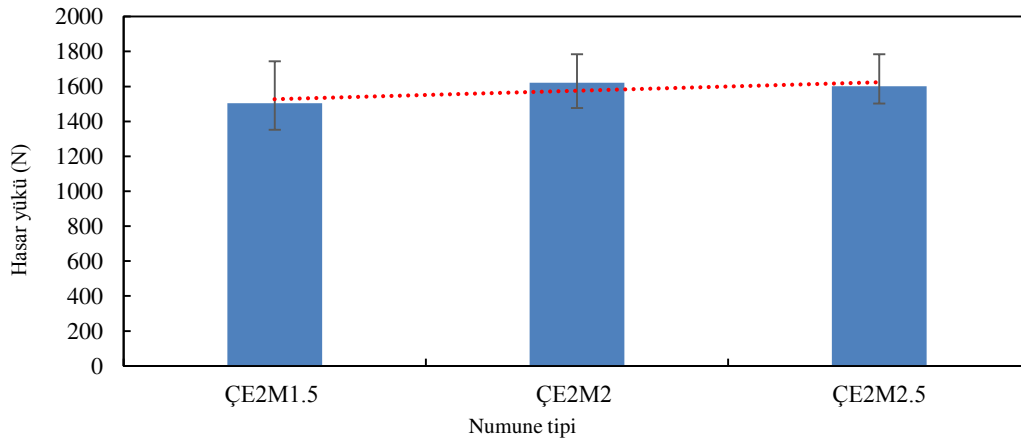
Şekil 5.32. $E/D=2$, $M/D=2$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



Şekil 5.33. $E/D=2$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



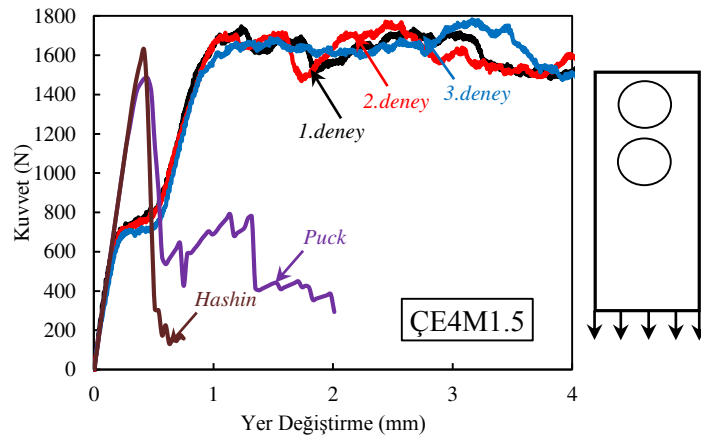
Şekil 5.34. $E/D=2$, $M/D=2.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



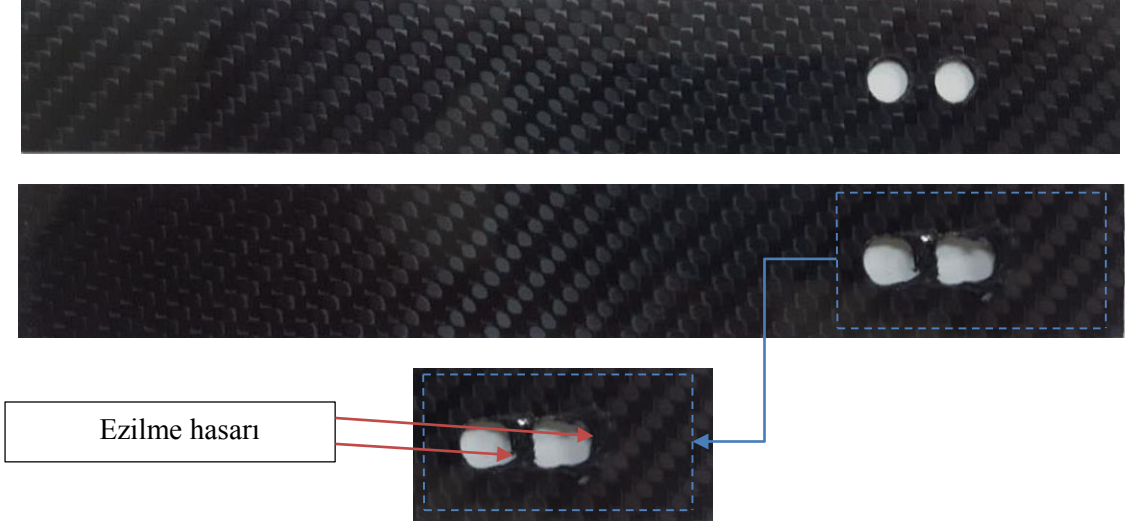
Şekil 5.35. Çift pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi ($E/D=2$).

Şekil 5.35’ deki hasar yüklerinin E/D sabit değerine karşılık olarak M/D değerindeki artışı ile değişimi görülmektedir. Şekil 5.35’ de görüldüğü gibi çift delikli levhalar kullanılarak yapılan deneylerde en düşük hasar yükü $E/D = 2$ ve $M/D = 1.5$ olan levha için 1503 N, en yüksek hasar yükü $E/D = 2$ ve $M/D = 2$ olan levha için 1620 N olarak elde edilmiştir. Şekil 5.29-31’deki grafiklerde yüklerin en büyük değeri aldıktan sonra düştüğü ve sabit bir değerle ilerlediği görülmüştür. Bu durum numuneler için ezilme hasarının meydana geldiğinin göstergesidir. Şekil 5.33’de ise hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerde bir süre kaldıktan sonra tekrar yükselerek en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Bu durum ise; levhanın serbest kenarına uzak olan delikteki hasarın diğer deliğe ulaştığını, artık yükün sadece levha kenarına yakın delik tarafından taşındığını gösterir. Bu tip grafikler özellikle serbest kenarlara daha uzak olan pim deliğinde ilk hasarın başlaması nedeniyle gerçekleşmektedir. (Şekil 5.33). ÇE2M2 numunelerinin tamamında hasarlar her iki pimde de aynı anda başlamıştır (Şekil 5.31). Nihai yükler hesaplanırken ikinci pimin de hasara uğradığı grafikteki ikinci yük düşüş noktası dikkate alınmıştır. Numunelerde delik etrafında meydana gelen ezilme hasarı nedeniyle, M/D oranının değişiminin hasar yükleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ancak küçükte olsa bir artışın olduğu görülmektedir. Bu grafiklerin elde edildiği deneylerde incelenen numunelerde ezilme hasarının gerçekleştiği belirlenmiştir. Eğim çizgisine göre M/D oranının artışına bağlı olarak hasar yüklerinde çok küçük artma olmasının yanında $M/D=2$ değerine karşılık $M/D=2.5$ değerindeki değişime bakıldığında hasar yüklerinin çok fazla değişmediği görülmektedir.

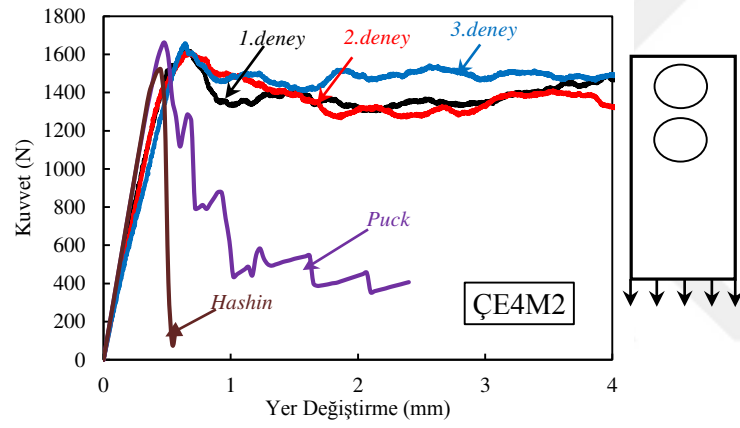
5.4.4. Çift pim delikli $M/D=1.5, 2, 2.5$ ve $E/D=4$ olan levhalara ait deneysel sonuçlar



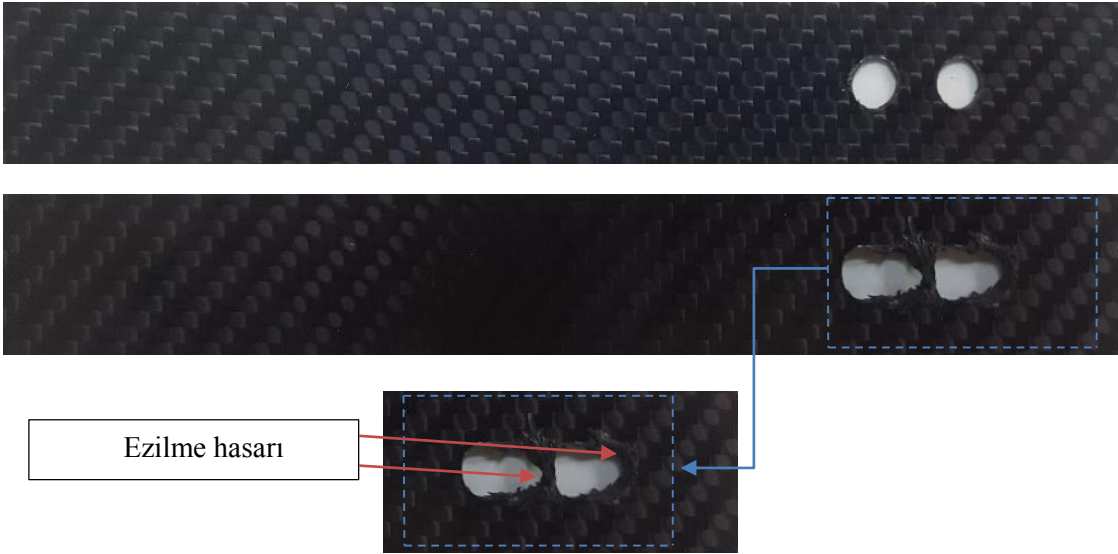
Şekil 5.36. $E/D=4$, $M/D=1.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



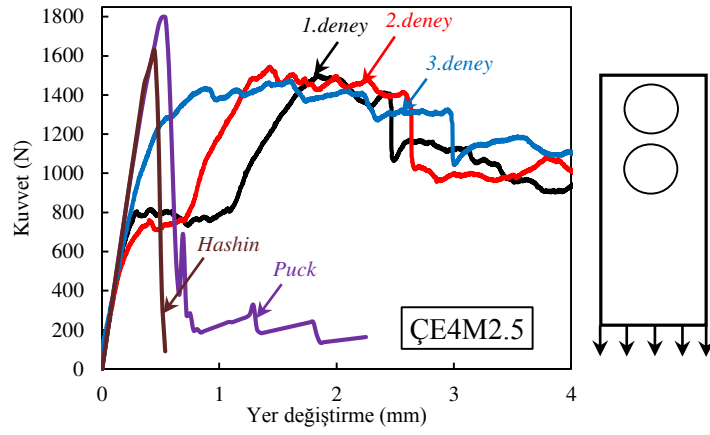
Şekil 5.37. $E/D=4$, $M/D=1.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



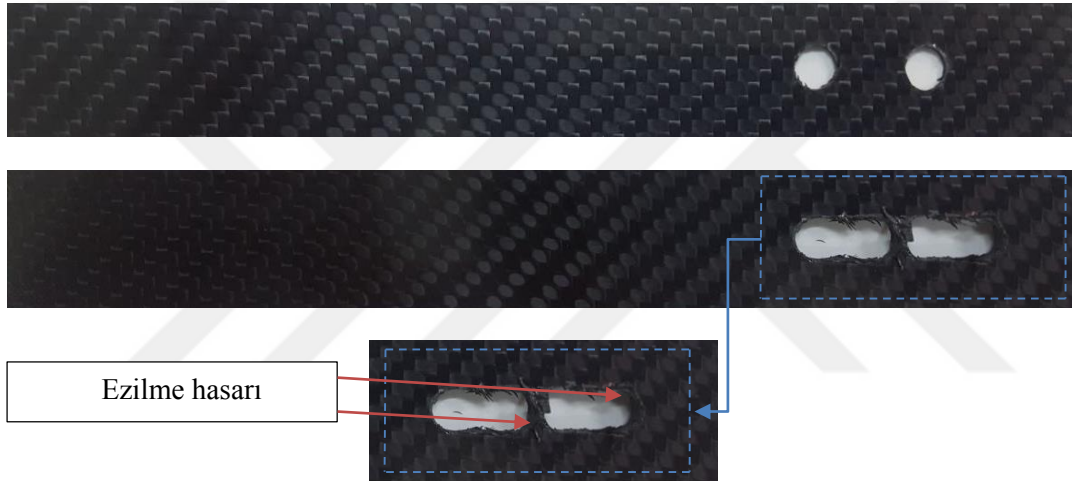
Şekil 5.38. $E/D=4$, $M/D=2$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



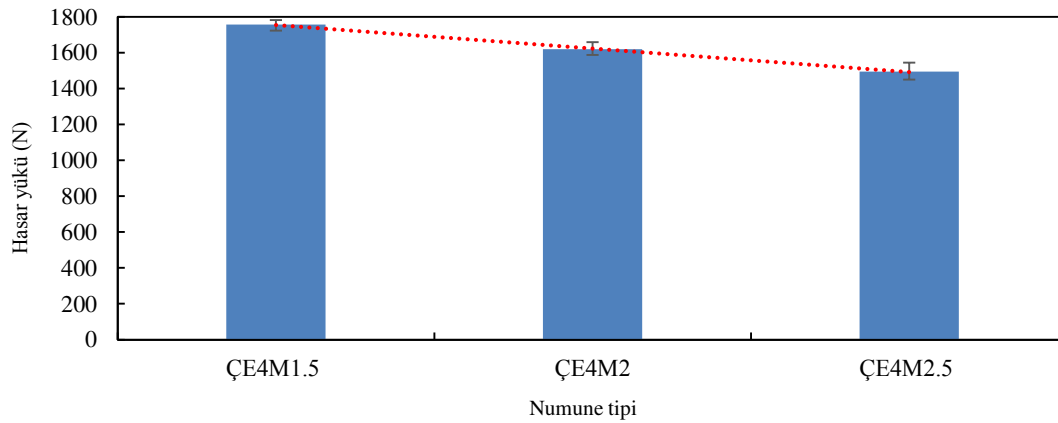
Şekil 5.39. $E/D=4$, $M/D=2$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



Şekil 5.40. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numune için kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 5.41. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numunenin deney öncesi, deney sonrası ve hasar tipi görünümü.



Şekil 5.42. Çift pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin M/D oranına yerlerine göre değişimi ($E/D=4$).

Tablo 5.7. Çift pim delikli numunelere ait maksimum hasar yükü değeri ve hasar resimleri.

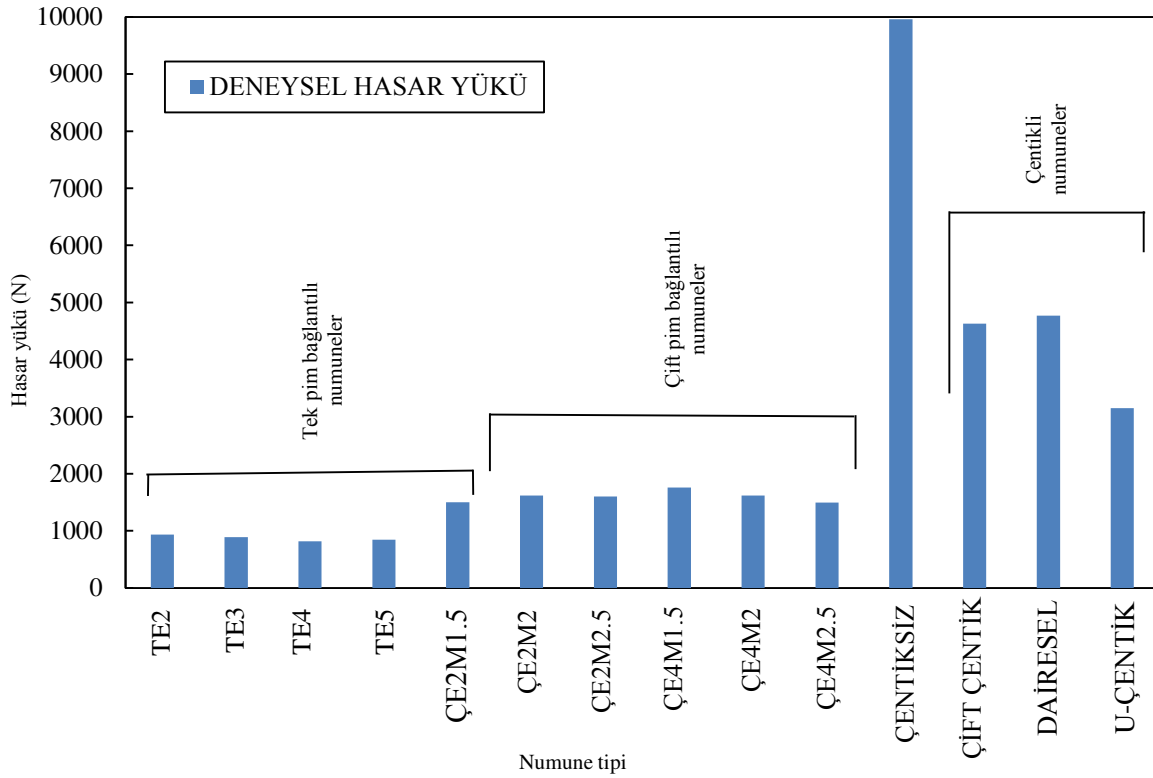
Çift pim bağlantısı	$E/D=2$	$E/D=4$
$M/D=1.5$	 Maksimum hasar yükü=1743 N	 Maksimum hasar yükü=1680 N
$M/D=2$	 Maksimum hasar yükü=1784 N	 Maksimum hasar yükü=1658 N
$M/D=2.5$	 Maksimum hasar yükü=1783 N	 Maksimum hasar yükü=1544 N

Şekil 5.36, Şekil 5.38 ve Şekil 5.40' da görüldüğü gibi çift delikli levhalar kullanılarak yapılan deneylerde $E/D = 4$ ve $M/D = 1.5$ olan levha için en düşük hasar yükü 1494 N, $E/D = 4$ ve $M/D = 2$ olan levha için en yüksek hasar yükü 1756 N olarak elde edilmiştir. ÇE4M1.5, ÇE4M2, ÇE4M2.5'un çekme grafiklerinin elde edildiği deneylerde incelenen numunelerde ezilme hasarının gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 5.42'de hasar yüklerinin E/D sabit değerine karşılık olarak M/D değerindeki artışı ile değişimi görülmektedir. Eğim çizgisine bakarak $E/D=4$ oranının sabit kalarak M/D oranının artışına bağlı olarak hasar yüklerinde kısmi azalma olduğu görülmektedir. $M/D=2$ için hasar yükündeki azalma, $M/D=1.5$ için %1 iken $M/D=2.5$ olduğunda bu oran %7 kadardır.

Tablo 5.7'da seri pim delikli numunelere ait deney sonrası fotoğraflar görülmektedir. Hasar yükü en yüksek $E/D=2$ için $M/D=2$ ve $M/D=2.5$ olan numuneler için elde edilmiştir. Hasar yükü en düşük numune ise $E/D=4$ için $M/D=2.5$ olan ÇE4M2.5' dir. Tüm delik çevrelerinde hasarların ezilme şeklinde gerçekleştiği görülmektedir.

5.5. Deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırması

Bu bölümde çift çentik, U-çentik, dairesel, tek ve seri pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yükleri genel olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 5.43’ de gösterildiği gibi en düşük maksimum hasar yükü değeri 841 N olan TE4 numunesine aittir. En yüksek maksimum hasar yükü değeri ise 4698 N olan U çentik numuneye aittir. En düşük hasar yükleri tek pim bağlantılı numuneler için gerçekleşirken, çift pim bağlantılı tüm numunelerin hasar yükleri tek pim bağlantılı numunelerden yüksektir. Çentikli numunelerin hasar yükleri ise tüm pim bağlantılı numunelerden daha yüksektir (Şekil 5.43). Burada ayrıca M/D sabit iken E/D ’ nin 2’den 4’e çıkmasının çift pim bağlantısında hasar yükünü artırdığı görülmektedir. Bu durum $M/D=2.5$ haricinde tüm M/D oranlarında geçerlidir.



Şekil 5.43. Levhaların maksimum hasar yüklerinin genel olarak karşılaştırılması.

6. SAYISAL ÇALIŞMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde laboratuvarda deneysel olarak incelenen numunelerin hasar davranışı bilgisayar ortamında sayısal olarak analiz edilmiştir. Amaç, hasar yükleri ve hasar modlarının sayısal ortamda bulunmasıdır. Çıkan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

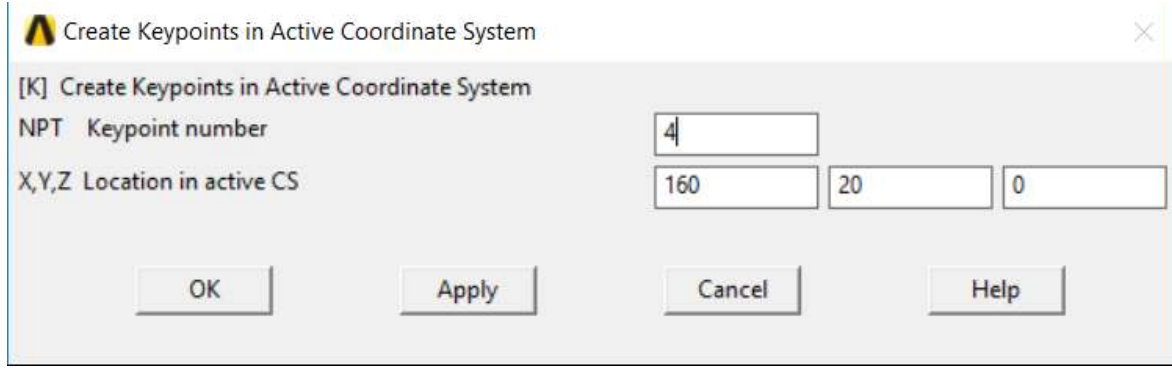
6.1. Problemin Tanımı ve Modelin Oluşturulması

Sayısal model hazırlanırken laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenen numunelerin boyutları kullanılmıştır. Deneysel olarak incelenen ve sayısal olarak incelenecek olan numunelerin sonuçlarının birbirlerine yakın olmaları için numune ölçüleri teker teker dikkatlice kontrol edilerek modelleme yapılmıştır. Kompozit malzeme lineer elastik olarak tanımlanmıştır. Toplam 1mm kalınlığındaki $[0^\circ]_4$ kompozit levhayı oluşturan dört tabaka karbon fiber 0.25 mm kalınlıkta ayrı hacimler halinde tanımlanmış olup, tabakaların birbirine mükemmel bağlı olduğu kabul edilmiştir. *Ansys* programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmada numuneye uygulanan yükler kademeli olarak artırılmıştır. Bilgisayar ortamında *Ansys* programıyla yapılmış olan sayısal çalışmada da benzer sonuçların elde edilebilmesi için *APDL* (*ANSYS* Parametric Design Language) kodları uygulanarak ilerlemeli hasar analizi yapabilen program kullanılmıştır. İki boyutlu ve üç boyutlu olmak üzere programda model yapabilme özelliği mevcuttur. Bu çalışmada üç boyutlu hasar analizi yapılmıştır. Sonlu eleman modeli Şekil 5.2-6 arasında gösterilen boyutlara göre hazırlanmıştır.

Sonlu eleman modelinin oluşturulabilmesi için dört aşamalı bir işlemler bütününden geçmesi gerekir.

- Anahtar noktaların (*Keypoint*) girilmesi.
- Çizgilerin (*Line*) oluşturulması.
- Alanların oluşturulması.
- Derinlik değeri girilerek hacim oluşturulması.

Bilgisayar ortamında sayısal olarak oluşturulan modelin koordinat düzleminde, 0 noktası temel alınarak -x, -y ve -z eksenlerinde değerler girilerek keypointler oluşturulur. Şekil 6.1' de aktif koordinat düzleminde oluşturulan anahtar noktaların oluşturulması görülmektedir.

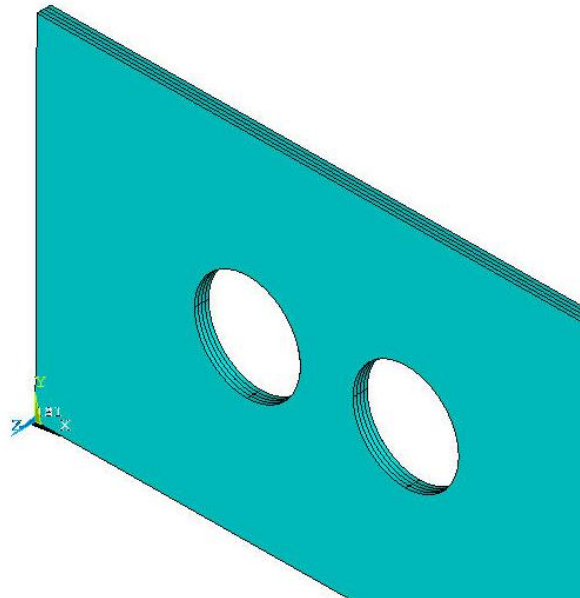


Şekil 6.1. Anahtar noktaların oluşturulması.

Keypoint noktaları birleştirilir. Alan ve hacimler oluşturulur. Bu aşamada deliksiz dikdörtgen levha model oluşturulmuş olur. Daha sonra pim delikli numunelerin modellenmesi yapılır (Şekil 6.2-3).

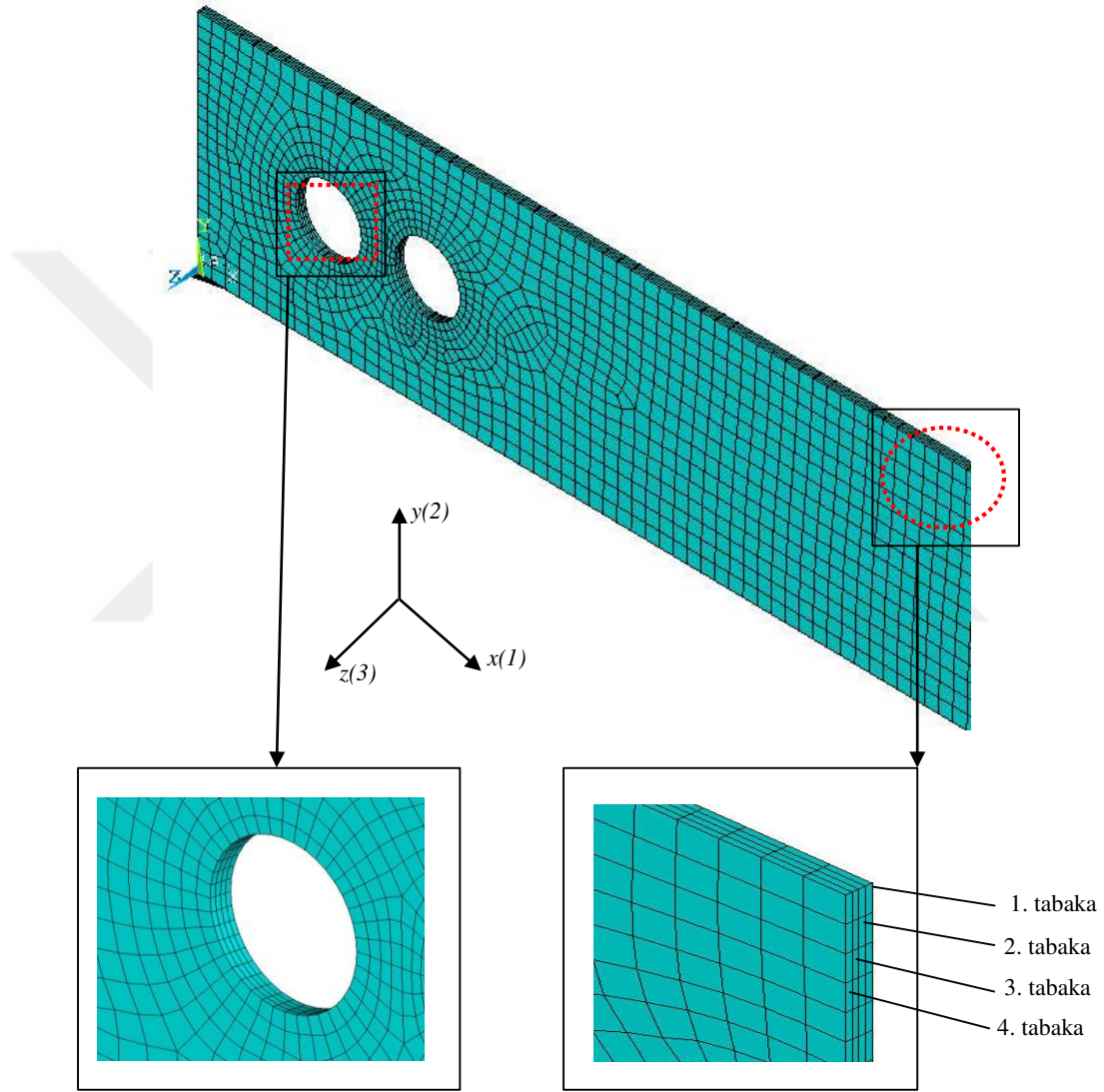


Şekil 6.2. Pim deliğinin oluşturulması.



Şekil 6.3. Pim deliğinin detaylı gösterimi.

Malzeme modellendikten ve malzeme özellikleri girildikten sonra model, sonlu elemanlara bölünür (mesh). Model, yükün bindiği ve hasar gören bölümlerin (özellikle delik kenarları için) daha fazla detaylandırılması ve hassas değer alınabilmesi için, daha küçük elemanlara bölünerek her bir numune için ayrı sonlu elemanlara bölme işlemi yapılır (Şekil 6.6).



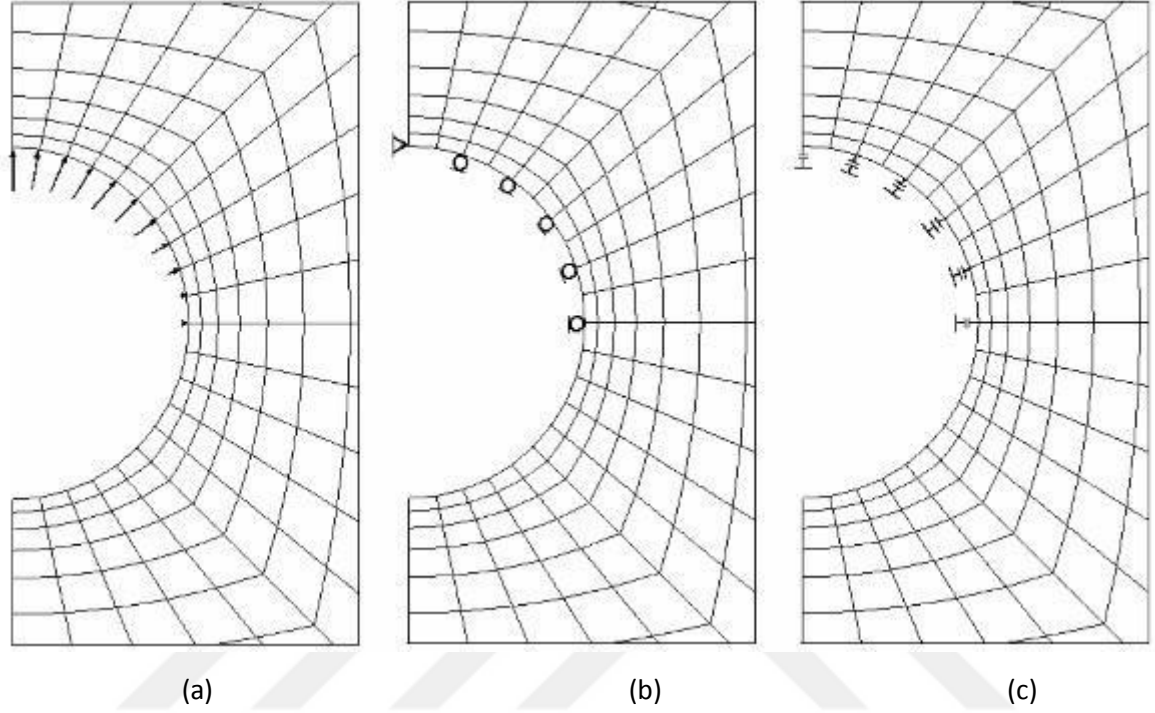
Delik kesitinin sonlu eleman görünümü

Kenar bölgenin sonlu eleman görünümü

Şekil 6.6. Sonlu elemanlara bölünmüş.

6.2. Sınır Şartlarının Girilmesi

Pim modellemesi için; kosinüsoidal yük dağılımı metodu, radyal sınır şartı metodu ve temas elemanları kullanımı metodu olmak üzere üç farklı yöntem vardır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Pim modellemesi için kullanılan üç metod: (a) Kosinüsoidal yük dağılımı metodu (b) radyal sınır şartı metodu (c) temas elemanları kullanımı metodu [52].

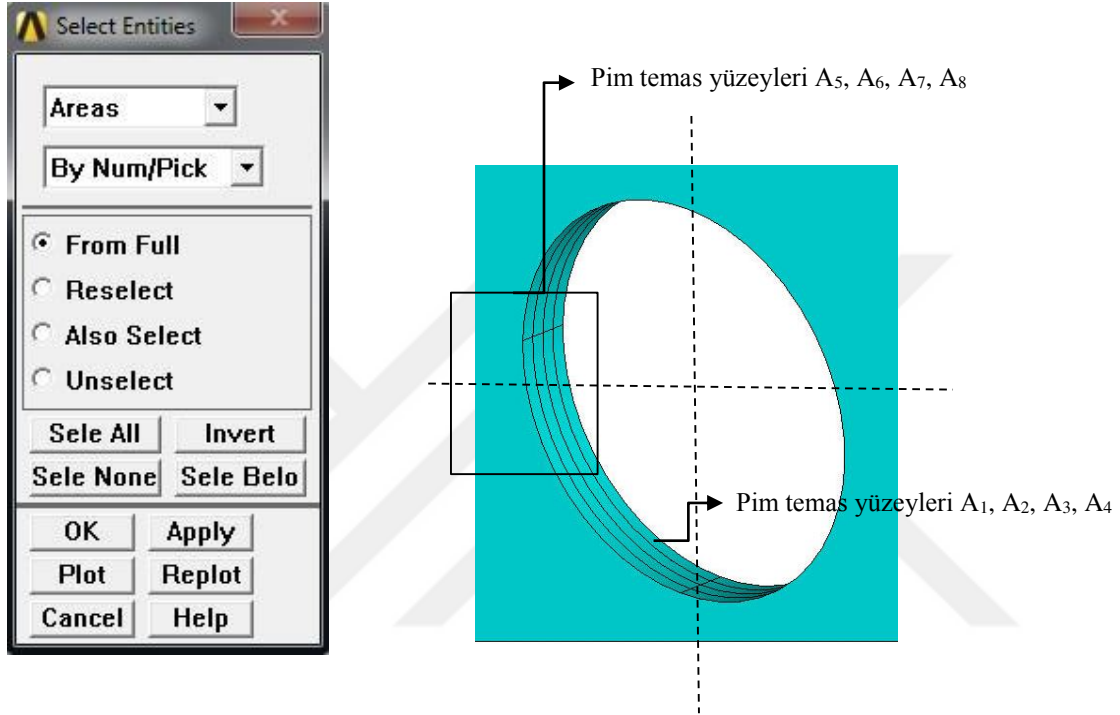
Problemin çözülmesinde en gerçekçi modelin temas elemanları metodu ile oluşturulmasına rağmen radyal sınır şartı metodu çözümlemede temas modellemesine oldukça yakın sonuçlar verdiği ve çözüm zamanı açısından daha kısa sürede cevap alınabildiği için araştırmacılar daha ziyade radyal sınır şartı metodunu kullanmaktadırlar [52].

Bu sayısal çalışmada da radyal sınır şartı metodu uygulanmıştır. *ANSYS*' te pim ile delik yüzeyleri arasında silindirik koordinatlarda sınır şartları verilerek pimin temas ettiği yüzeydeki elemanların radyal doğrultusunda yer değiştirmede kabul edilerek modelleme yapılmıştır.

Daire çevresindeki düğümlerin radyal yönde tutulması için öncelikle daire merkezinde bir anahtar nokta tanımlanır ve daire merkezindeki anahtar nokta tıklanarak lokal koordinat sistemi bu anahtar noktaya taşınır. Koordinat sistemi silindirik koordinat sistemine dönüştürülür. Son aşamada ise çalışma düzlemi tekrar aktif kartezyen koordinat sistemine

dönüştürülür.

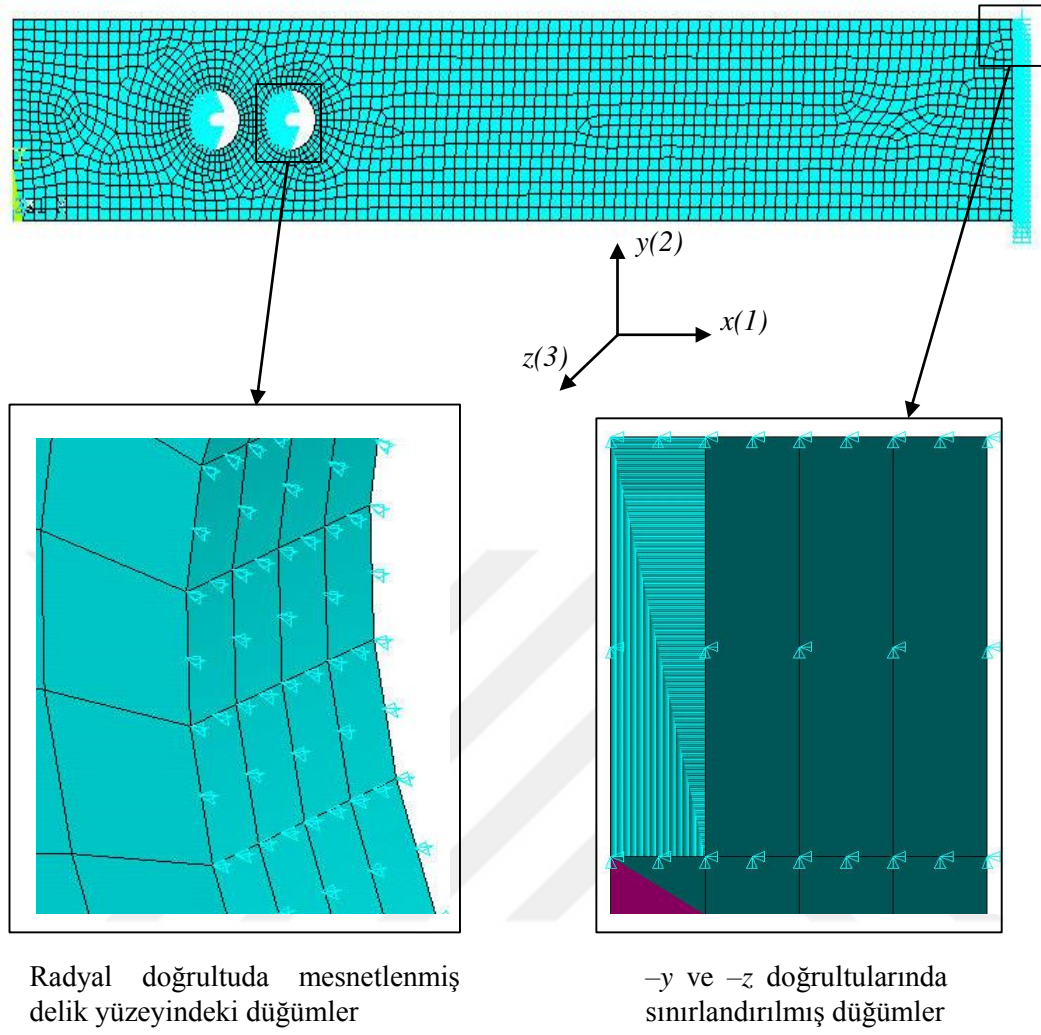
Pimin temas ettiği daire çeperindeki düğümleri silindirik koordinat sistemine dönüştürmek için ilk olarak pim temas yüzeyindeki alanlar belirlenir. Alanlar seçildikten sonra bu alanlar üzerindeki düğümler tespit edilir. Şekil 6.8’ de seçim işlemi ve seçili pim temas yüzeyi görülmektedir.



Şekil 6.8. Pim temas yüzeyinin seçilmesi.

Bu işlemlerden sonra daire üzerindeki düğümler silindirik koordinat sistemine dönüştürülür. Son işlemde düğümlerin deplasmanları $-x$ (silindirik koordinatlar için radyal doğrultuda) sınırlandırılarak radyal sınır şartı gerçekleştirilmiş olur. Yük uygulanacak kenar gerçek deneyde olduğu gibi $-y$ ve $-z$ doğrultularında (kalınlık boyunca ve düşey doğrultuda) sınırlandırılarak mesnetlenir. Şekil 6.9’ da radyal sınır şartı ile oluşturulmuş pim temas yüzeyi ve mesnetlenmiş kompozit levhanın kenarı görülmektedir.

Bütün bu işlemlerin en sonunda, daha önce çalışma düzlemi olarak seçilmiş silindirik koordinat düzlemi, komutlar kullanılarak $(-x, -y, -z)$ global kartezyen koordinat sistemine dönüştürülür.



Şekil 6.9. Sınır şartlarının oluşturulması.

Mesnetlenmiş kenara $-x$ yönünde (levha uzunluğu doğrultusunda) normal uzama uygulanır. Sayısal modelde seçili alanlar üzerindeki düğümlere uygulanan uzama sonucu ilgili alanlardaki $-x$ doğrultusundaki reaksiyon kuvvetleri toplanarak kompozit levhaya uygulanan toplam kuvvet belirlenir. Şekil 6.9' da $-x$ yönünde normal uzama uygulanmış sayısal model görülmektedir.

6.3. İlerlemeli Hasar Analizinin Yapılması

Sonlu elemanlar modeli oluşturulup sınır şartları ve yükleme durumu belirlendikten sonra Şekil 6.10.' da verilen akış diyagramına göre hasar analizi yapılır. İlerlemeli hasar analizinde *Ansys*' te kullanılan *APDL* kodlarından faydalanılmıştır. Oluşturulan bu programda

hasar analizi Bölüm 4' te formülasyonu belirtilmiş olan *Puck* ve *Hashin* Hasar Teorilerine göre yapılmıştır. Sayısal çalışmada fiziksel bir kırılma yapılamayacağı için malzeme özellikleri indirgenerek farazi bir kırılma gerçekleştirilmiştir. *Puck* ve *Hashin* hasar analizi formülasyonu programa girilmiştir ve oluşan hasar durumuna göre ilgili malzeme özellikleri indirgenip hasarın olduğu bölgeler zayıflatılmıştır. Kademeli yükleme yapılabilmesi için uzamanın belirli bir oranda artırılması gerekmektedir. Bu artım oranı çeşitli denemeler yapılarak ve döngü sayısı da hesaba katılarak % 1.15 olarak belirlenmiştir. -X eksen çekme doğrultusunu göstermek üzere uygulanan toplam uzama (u_x) değeri, artım değeri (Δu_x) ve toplam döngü sayısı programa (n_T) girildikten sonra ($u_x = \Delta u_x \cdot n_T$) *Puck* hasar analizi yapılır. Bu hasar analizine göre her bir eleman için hasar kriteri kontrol edilir ve malzeme özellikleri zayıflatılır. Eğer malzemede hasar meydana gelmişse ilgili elemanın malzeme özellikleri indirgenip yeni malzeme numarası verilir ve renklendirme ile tanımlanır. Malzeme özelliklerinin indirgenmesi, ön işlemci de *Material Number* bölümünde malzeme numaralarının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir [50].

Sayısal çalışmadaki sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırmak için her levha için sayısal yük-yer değiştirme grafikleri ayrı ayrı çizilmiştir. Ayrıca her model için program içinde komutlar girilerek farklı klasörler oluşturulmuş ve bu klasörlere her n. adımdaki toplam uzama değerinde ($\Delta x = \Delta u_x \cdot n$) elde edilen hasar resim dosyaları ve reaksiyon kuvvetleri kaydedilmiştir.

6.4. Malzeme İndirgeme Kuralının Uygulanması

Bu çalışmada çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentikli, U kenar çentikli, tek ve seri pim bağlantılı kompozit levhaların sayısal çalışmalarının sonucunda yük-uzama grafikleri elde edilmiş olup hasar yükleri belirlenmiştir. Model sonlu elemanlara bölünerek üç boyutlu olarak *Ansys* programında tasarlanmış olup sayısal çalışmada kompozit malzeme için *Solid186* elemanı kullanılmıştır.

İlerlemeli hasar analizi Bölüm 4'te belirtilen *Puck* ve *Hashin* Hasar Kriteri' nde verilmiş formüllere göre yapılmıştır. Bu formüllerle birlikte hasar tipine göre belirtilen renklendirmeler Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilmiştir.

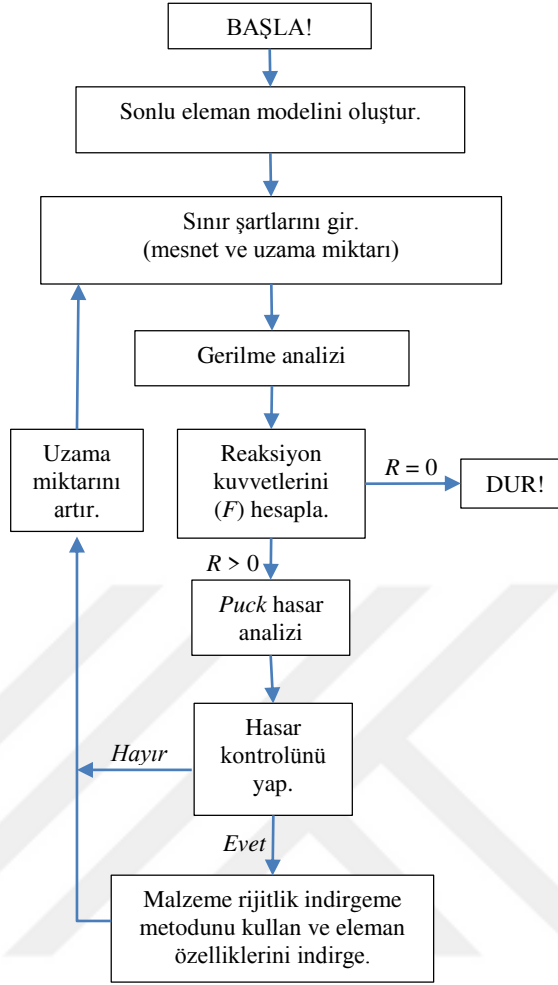
Tablo 6.1. *Hashin* hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler.

<u>Hasar Tipi</u>	<u>Hasar Şartı</u>	<u>Hasar Denklemi</u>	<u>Hasar Öncesi</u>	<u>Hasar Sonrası</u>
Fiber çekme	$\sigma_1 > 0$	(4.6)	 Turkuaz	 Mor
Fiber basma	$\sigma_1 < 0$	(4.7)	 Turkuaz	 Kırmızı
Matris çekme	$\sigma_2 > 0$	(4.8)	 Turkuaz	 Açık mavi
Matris basma	$\sigma_2 < 0$	(4.9)	 Turkuaz	 Pembe
Fiber matris kayma	$\sigma_1 < 0$	(4.12)	 Turkuaz	 Yeşil

Tablo 6.2. *Puck* hasar kriteri ve sayısal analizde ortaya çıkan renkler.

Hasar Tipi	Hasar Şartı	Hasar Denklemi	Hasar Öncesi	Hasar Sonrası
Fiber çekme	$\left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f12}} \cdot m_{\sigma f} \cdot \sigma_2 \right) \geq 0$	(4.24)	 Turkuaz	 Mor
Fiber basma	$\left(\varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f12}} \cdot m_{\sigma f} \cdot \sigma_2 \right) < 0$ ve $\sigma_1 < 0$	(4.26)	 Turkuaz	 Kırmızı
Matris çekme	$\sigma_2 \geq 0$	(4.28)	 Turkuaz	 Açık mavi
Matris basma	$0 \leq \left \frac{\tau_{12}}{\sigma_2} \right \leq \left \frac{\tau_{12C}}{R_{\perp\perp}^A} \right $ ve $\sigma_2 < 0$	(4.30)	 Turkuaz	 Pembe
Fiber matris kayma	$0 \leq \left \frac{\tau_{12}}{\sigma_2} \right \leq \left \frac{\tau_{12C}}{R_{\perp\perp}^A} \right $ ve $\sigma_2 < 0$	(4.32)	 Turkuaz	 Yeşil

Malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri programa girilmiştir. *Puck* hasar kriteri ve *Hashin* hasar kriteri'ne göre hasar analizi yapılmıştır. Hasarın türüne göre malzeme özellikleri indirgenmiştir. Malzeme indirgeme şartı kullanıcıya göre değişebilir. Modelin taşıdığı yük düşüp sıfır veya sabit kalana kadar işlem devam etmiş olup yükün sıfırlandığı veya değişmediği yani sabit kaldığı durumda program sonlandırılmıştır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. İlerlemeli hasar analizi için yazılan program döngüsü [57].

Bu çalışmada, *Ansys* sonlu eleman programında *APDL* (Parametric Design Language) alt kodlar kullanılarak hasarın ilerletilmesi yer değiştirme adımları sayesinde gerçekleştirilmiştir. İlerlemeli hasar analizi için yazılan kodlara ait program döngüsü Şekil 6.10'da sunulmuştur. Şekil 6.10'da verilen döngüye göre sonlu eleman modelinde her bir eleman için hasar kontrolü yapıldıktan sonra ilgili elemanın malzeme özelliklerinin indirgenmesi gerekir. Malzeme özellikleri indirgemesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. *Hashin* hasar kriterinde indirgeme Denklem (6.1)'de görüldüğü gibi, malzemenin başlangıçteki hasarsız mekanik özelliğinin (MP) bir katsayı ile ($\eta \ll 1$) çarpılarak düşürülmesi kuralına dayanır.

$$MP_{hasarlı} = \eta \cdot (MP_{hasarsız}) \quad (6.1)$$

Bu çalışmada kullanılan malzeme indirgeme kuralı Tablo 6.3’de sunulmuştur. Fiber çekme ve basma hasarı yapı için baskın ve yıkıcı hasar olduğundan dolayı malzemenin tüm mekanik özellikleri indirgenirken, matris çekme ve basma hasarında fibere dik doğrultudaki elastisite modülü ve Poisson oranı, matris kayma hasarı durumunda ise kayma modülü ve Poisson oranı indirgenir. Çalışmada indirgeme katsayısı $\eta=0.00001$ olarak alınmıştır.

Tablo 6.3. Malzeme mekanik özellikleri için *Hashin* indirgeme kuralı.

Hasar tipi	Denklem no.	İndirgenecek özellik ($MP_{hasarsız}$)
Fiber çekme	4.6	$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$
Fiber basma	4.7	$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$
Matris çekme	4.8	E_1, ν_{12}
Matris basma	4.9	E_1, ν_{12}
Matris kayma	4.12	G_{12}, ν_{12}

Puck hasarı için ise malzeme rijitlik indirgeme kuralı kullanılır. [3]

Ortotropik malzemeler için üç boyutlu genel gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{24} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \end{Bmatrix} \quad (6.2)$$

şeklinde yazılabilir. Rijitlik matris katsayıları

$$c_{11} = \frac{(1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32})}{\delta} \cdot E_1$$

$$\begin{aligned}
c_{12} &= \frac{(v_{21} + v_{31} \times v_{23})}{\delta} \cdot E_1 = \frac{(v_{12} + v_{32} \times v_{13})}{\delta} \cdot E_2 \\
c_{13} &= \frac{(v_{31} + v_{21} \cdot v_{32})}{\delta} \cdot E_1 = \frac{(v_{13} + v_{12} \cdot v_{23})}{\delta} \cdot E_3 \\
c_{22} &= \frac{(1 - v_{13} \cdot v_{31})}{\delta} \cdot E_1 \\
c_{23} &= \frac{(v_{32} + v_{12} \cdot v_{31})}{\delta} \cdot E_2 = \frac{(v_{23} + v_{12} \cdot v_{13})}{\delta} \cdot E_3 \\
c_{33} &= \frac{(1 - v_{12} \cdot v_{21})}{\delta} \cdot E_3 \\
c_{44} &= G_{23} \\
c_{55} &= G_{13} \\
c_{66} &= G_{12}
\end{aligned} \tag{6.3}$$

dir. Matrisin geriye kalan terimleri ise sıfırdır. Burada Denklem (6.3)'teki δ ifadesi ise

$$\delta = 1 - v_{12} \cdot v_{21} - v_{23} \cdot v_{32} - v_{31} \cdot v_{13} - 2 \cdot v_{21} \cdot v_{32} \cdot v_{13} \tag{6.4}$$

olarak tanımlanır. Malzeme özelliklerinin indirgemesi durumunda bu katsayılar

$$c_{11} = (1 - d_f) \cdot c_{11}^0$$

$$c_{22} = (1 - d_f) \cdot (1 - d_m) \cdot c_{22}^0$$

$$c_{33} = (1 - d_f) \cdot (1 - d_m) \cdot c_{33}^0$$

$$c_{12} = (1 - d_f) \cdot (1 - d_m) \cdot c_{12}^0$$

$$c_{23} = (1 - d_f) \cdot (1 - d_m) \cdot c_{23}^0$$

$$c_{13} = (1 - d_f) \cdot (1 - d_m) \cdot c_{13}^0$$

$$c_{33} = (1 - d_f) \cdot (1 - d_m) \cdot c_{33}^0$$

$$c_{44} = (1 - d_f) \cdot (1 - s_{mt} \cdot d_{mt}) \cdot (1 - s_{mc} \cdot d_{mc}) \cdot c_{44}^0$$

$$c_{55} = (1 - d_f) \cdot (1 - s_{mt} \cdot d_{mt}) \cdot (1 - s_{mc} \cdot d_{mc}) \cdot c_{55}^0$$

$$c_{66} = (1 - d_f) \cdot (1 - s_{mt} \cdot d_{mt}) \cdot (1 - s_{mc} \cdot d_{mc}) \cdot c_{66}^0$$

olarak tanımlanır.

$$d_f = 1 - (1 - d_{ft}) \cdot (1 - d_{fc})$$

$$d_m = 1 - (1 - d_{mt}) \cdot (1 - d_{mc})$$

d_f ve d_m fiber ve matris için toplam hasar değişkenleri, d_{ft} , d_{fc} ve d_{mc} çekme ve basma gerilmesi durumlarındaki fiber ve matris hasarı değişkenleridir. $s_{mt}=0.9$ ve $s_{mc}=0.5$ matris çekme ve basma hasarının sebep olduğu kayma rijitliği için kayıp kontrol faktörleridir [27]. Fiber ve matris hasar değişkenleri Tablo 6.4’de sunulmuştur. *Hashin* ve *Puck* hasar teorilerinin hasar modları matris hasarlar için farklı olduğundan dolayı malzeme indirgeme kuralları da farklı belirlenmiştir.

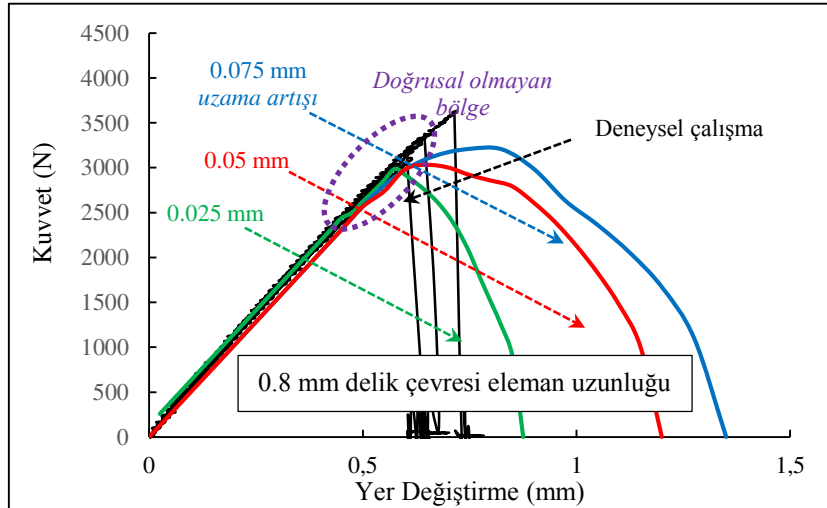
Tablo 6.4. Hasar tipleri için eleman indirgeme şartları [27].

Hasar tipi	Denklem	Hasar değeri
Fiber çekme	(4.24)	$d_{ft}=1$
Fiber basma	(4.26)	$d_{fc}=1$
Matris Mod A	(4.28)	$d_{mt}=1$
Matris Mod B ve Mod C	(4.30) ve (4.32)	$d_{mc}=1$

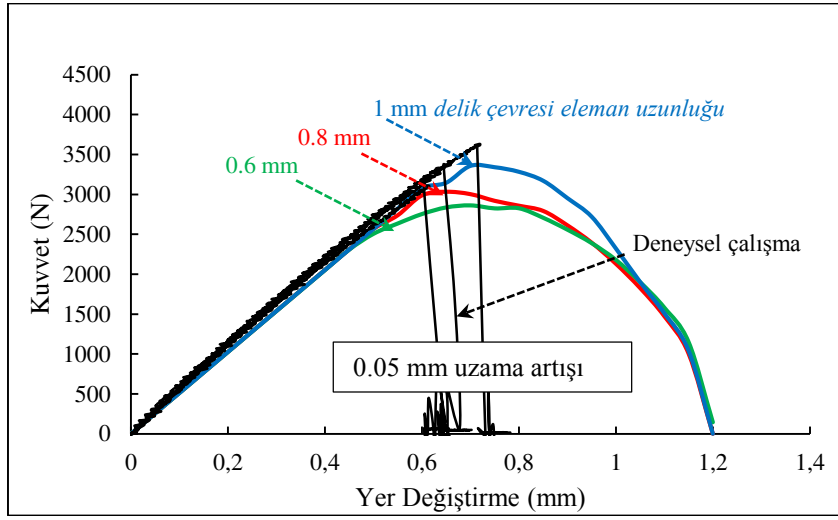
6.5. Gerilme Analizine Eleman Sayısının Etkisi

İlerlemeli hasar analizinin yapıldığı numunede eleman sayısı önemli bir yere sahiptir. Özellikle pim bağlantısı için açılan deliklerin etrafında gerilme yığılmaları oluşur. Bu bölgelerde oluşan gerilme yığılmalarından dolayı hesaplama daha fazla önem arz eder. Bundan dolayı delik çevresinde düğüm sayısı ve eleman sayısı ne kadar hassas olursa o kadar gerçeğe yakın hassas sonuçlar elde edilebilir. Böylece deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar daha gerçekçi olur. Maksimum gerilmelerin referans alındığı ölçümlerde eleman ve düğüm sayılarının artırılarak tekrar edilen çözümlerden elde edilen sonuçların artık değişmediği noktada daha fazla eleman kullanılmasına gerek yoktur.

U kenar çentikli tabakalı kompozit levhanın *ANSYS* sonlu elemanlar paket programında yapılan *Puck* ilerlemeli hasar analizi sonucunda toplam ~1.2 mm uzama için elde edilen sayısal yük-uzama grafiği Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Şekil 6.11’de verilen grafikte dikdörtgen levhanın dört dik kenarı 1.4 mm ve delik çevresi boyunca eleman uzunluğu 0.8 mm’dir. Levhann farklı uzama adımları için (0.025 mm, 0.05 mm ve 0.075 mm) kompozit levhada elde edilen reaksiyon kuvvetinin yer değiştirme ile değişimi verilmiştir. Grafiğe göre uzama artış miktarının artması hasar başlangıcından önce reaksiyon kuvvetinin şiddetinde herhangi bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Ancak hasar başlangıcı ile birlikte uzama adımının artırılması maksimum reaksiyon kuvvetinin değerini artırmaktadır. Ayrıca maksimum hasar yükünün elde edildiği uzama miktarını da artırmaktadır.

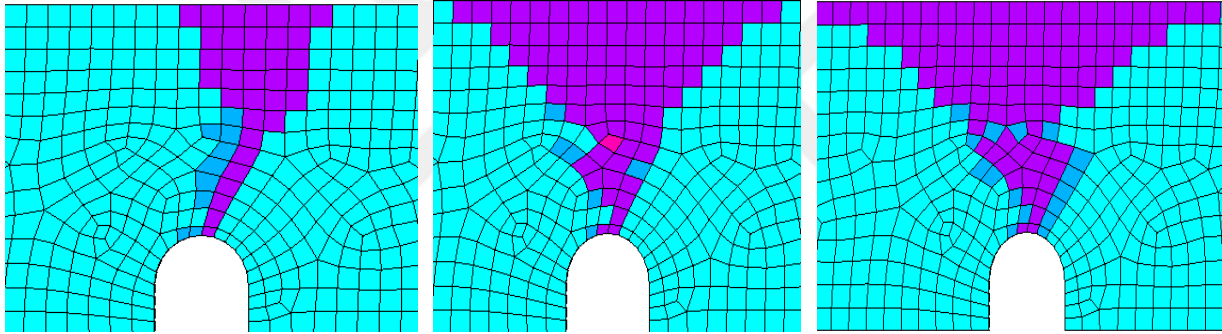


Şekil 6.11. Reaksiyon kuvvetlerinin farklı uzama aralıkları için yer değişimi ilişkisi.



Şekil 6.12. Reaksiyon kuvvetlerinin delik kenarı boyunca farklı eleman uzunlukları için yer değişimi ilişkisi.

Delik çevresindeki eleman uzunluğu: 0.8 mm

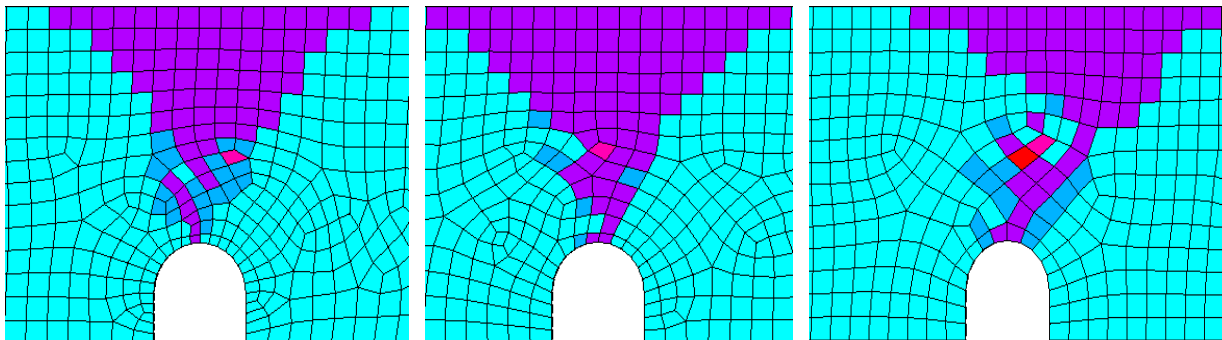


Uzama artışı: 0.025

0.05 mm

0.075 mm

Uzama artışı: 0.05



Delik çevresindeki eleman uzunluğu: 0.6

0.8 mm

1 mm

Şekil 6.13. Delik çevresinde meydana gelen nihai fiber çekme hasarları.

Hasar başlangıcından itibaren kuvvet-yer değiştirme grafiğinde maksimum yüke kadar doğrusal olmayan bölge bulunmaktadır. Bu bölge uzama adımı miktarının artışına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 6.12’de 0.05 mm uzama artış miktarında, delik çevresindeki farklı eleman uzunlukları için kompozit levhanın reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri sunulmuştur. Delik çevresinde eleman boyutunun artırılması da reaksiyon kuvvetini artırmıştır. Bu artış uzama artış miktarından daha etkilidir. Uzama artış miktarının değişiminin yanında delik çevresindeki sonlu eleman sıklığının değişimi reaksiyon kuvvetinin miktarını daha yüksek seviyede etkilemiştir (Tablo 6.5).

Şekil 6.11 ve 6.12’de kullanılan tüm sayısal modeller için reaksiyon kuvvetinin sıfıra düştüğü son çözüm adımındaki hasar resimleri Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Yeşil renkler hasarsız elemanı, mor renkler fiber çekme hasarını, pembe renkler ise matris basma hasarına uğramış olan sonlu elemanı temsil etmektedir. Uzama doğrultusuna bağlı olarak kompozit levhada meydana gelen baskın hasar tipi fiber çekme hasarıdır. Çekme gerilmelerinin maksimum olduğu düşey doğrultudaki delik kenarları civarında başlayan fiber çekme ve az da olsa matris çekme hasarı bu doğrultuda ilerleyerek büyümüştür. Hasar, levha kenarına ulaştığı durumda ise yük sıfırlanmıştır. Verilen resimlerde reaksiyon kuvvetleri sıfıra ulaştığı andaki levha hasar resimlerini temsil etmektedir. Uzama adımının artması maksimum reaksiyon kuvvetini artırmasının sebebi Şekil 6.13’te görülmektedir. Buna göre uzama adımının artışına bağlı olarak yüksek yük adımları artışları hasar başlangıcından itibaren delik çevresinde bir seferde çok fazla miktarda elemanın hasara uğramasına sebep olurken, küçük uzama adımlarında bu durum tam tersidir.

Böylece büyük uzama adımlarında hesaplanmayan ara adımlar nedeniyle hasar başlangıcı sonrasında maksimum yüke kadar daha fazla reaksiyon kuvveti artışı sağlanmaktadır. 0.025 mm uzama adımı için elde edilen son hasar resmi incelendiğinde; hasarın, 0.075 mm uzama adımındaki hasara göre düşey doğrultuda daha dar bir bölgede yayıldığı gözlemlenebilir. Delik çevresinde sonlu eleman sıklığının hasarlı eleman dağılımına etkisi incelendiğinde ise delik çevresindeki hasarların genel olarak benzer olduğu görülmektedir. Bu durum zaten maksimum hasar yüklerinin birbirlerine benzer değerlerde olmasının da sebebidir (Şekil 6.12). Delik çevresinden uzaklaşıp, levha serbest kenarına yaklaştıkça hasarlarda eleman boyutunun küçülmesine bağlı olarak kısmi azalmalar gözlenmiştir. Bu durum ise maksimum hasar yükü sonrasındaki reaksiyon kuvvetlerindeki değişime sebep olmuştur (Şekil 6.12). Benzer durum uzama adımı miktarının değişimi için

incelendiğinde maksimum yük sonrası daha büyük farkların oluştuğu görülebilir (Şekil 6.11).

Çalışmada incelenen bu parametrelerin yanı sıra malzeme mekanik özellikleri, sınır ve yükleme şartları da doğru bir şekilde tanımlanması gereken diğer etmenlerdir. Daha karmaşık deneysel çalışmalar için ilerlemeli hasar analizi yapılması durumunda, basit ve temel modeller için ideal yük ilerleme adımı ve sonlu eleman ağı sıklığı deneysel ve sayısal yük-yer değiştirme grafiği eşleştirmesiyle belirlenmelidir. Devamında gerçek problem için sayısal çözümler yapılmalıdır.

Tablo 6.5. Maksimum reaksiyon kuvvetinin delik çevresi eleman uzunluğu ve uzama adımı ile değişimi.

Uzama adımı (mm)	Delik çevresi eleman uzunluğu (mm)	Maksimum reaksiyon kuvveti (N)
1	0.05	3356
0.8	0.025	2986
0.8	0.05	3030
0.8	0.075	3211
0.6	0.05	2863

Analizlerde elde edilen bu verilere ışığında U çentikli levha için elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Buna göre delik çevresinde eleman boyutu 0.8 mm ve levha uzama adımı ise 0.05 mm olarak belirlenmiştir. Bundan sonraki tüm modellerde ve modellerin çözümünde bu veriler kullanılarak sonlu eleman sayıları ve ilerleme adımları belirlenmiştir.

Buna göre delik çevresinde eleman boyutu 0.8 mm ve levha uzama adımı ise 0.05 mm tüm numuneler için sabittir. Tablo 6.5’de sayısal çalışmada kullanılan tüm modellere ait eleman ve düğüm sayıları yukarıda açıklanan ideal eleman sayısı belirleme yöntemine göre hazırlanarak verilmiştir.

Tablo 6.6. Sayısal çalışmada kullanılan modellere ait eleman ve düğüm sayısı.

Numune ismi	Eleman sayısı	Düğüm sayısı
Dairesel delikli numune	5316	25531
Yarım daire çift kenar çentik	5152	24730
U kenar çentik	5300	25386
TE2	10800	50880
TE3	10504	49535
TE4	10228	48306
TE5	10164	48018
ÇE2M1.5	7165	34446
ÇE2M2	7656	36660
ÇE2M2.5	7832	37439
ÇE4M1.5	7340	35225
ÇE4M2	7288	34965
ÇE4M2.5	7412	35562

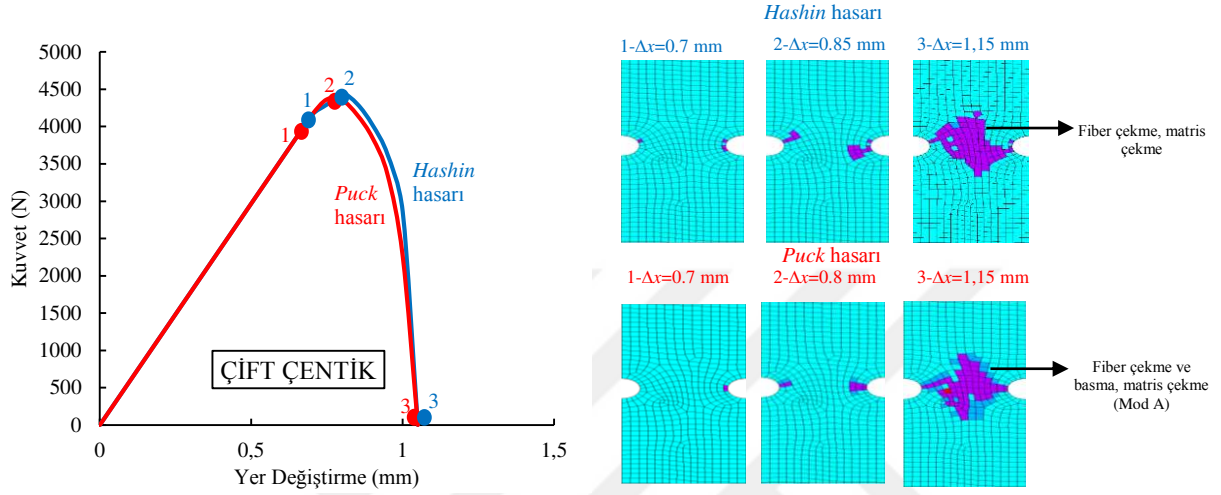
6.6. Sayısal çalışmaya ait grafiksel sonuçlar

Yapılan deneyler sonucu elde edilen grafikler bu bölümde verilmiştir.

6.6.1. Dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentik, U kenar çentik levhalara ait sayısal sonuçlar

Şekil 6.14’de görüldüğü gibi yarım daire kenar çentik levhalar *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri kullanılarak yapılan sayısal çalışmada kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve hasar resimleri üç aşamada gösterilmiştir. Bu aşamalar hasarın başladığı yük- yerdeğiştirme grafiğinde doğrusallığın bittiği aşama (1- Δx), dayanımın maksimuma ulaştığı aşama (2- Δx) ve hasarın ilerlemesinin durduğu aşamadır (3- Δx). Üçüncü aşamada genellikle reaksiyon kuvveti de sıfırlanmaktadır. *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci ve ikinci hasar noktalarında

fiber çekme hasarı görülmektedir. Üçüncü hasar noktasında ise fiber çekme hasarına ek olarak bir elemanda matris çekme hasarı meydana gelmiştir. *Puck* hasar teorisinde ise birinci ve ikinci hasar noktalarında fiber çekme ve matris çekme hasarı görülmektedir. Üçüncü hasar noktasında ise matris çekme, fiber çekme ve bir elemanda fiber basma hasarları görülmektedir.

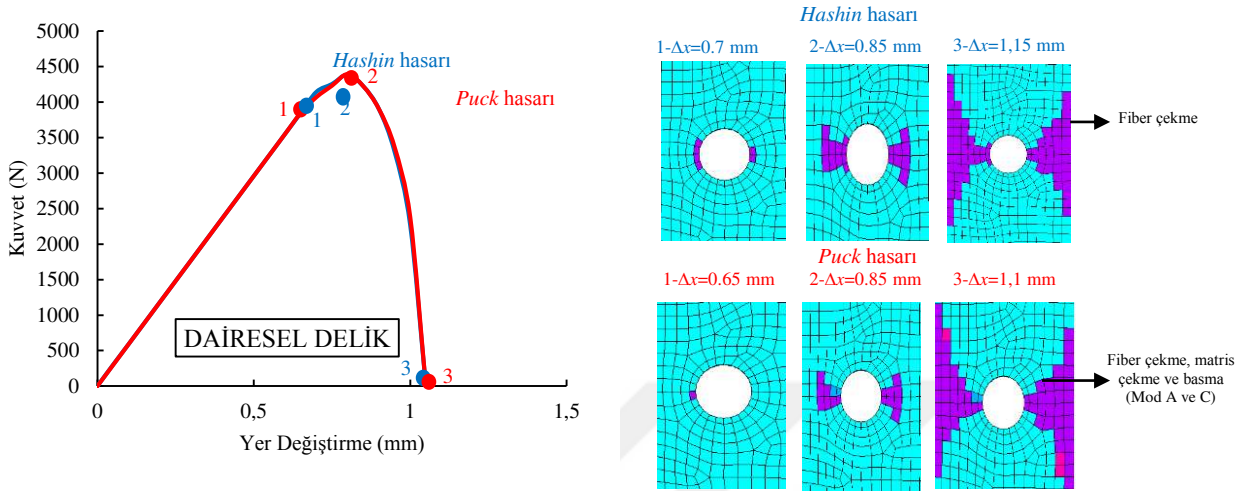


Şekil 6.14. Yarım daire kenar çentikli tabakalı kompozit numune için sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 4156 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 4227 N'dur. Bu yük değerlerinden sonra levhadaki fiber çekme hasarının levha kenarlarına ulaşmasıyla, ayrılma gerçekleşmiştir. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Puck* hasar teorisinde oluşan fiber çekme hasarlarının etrafındaki elemanların matris çekme hasarı olmasıdır. *Hashin* hasar kriterinde, *Puck* hasarına göre oluşan toplam hasarlı eleman alanı kadar bölge tamamen fiber çekme hasarı ile kaplanmıştır. Genel olarak hasar davranışı benzer karakterdedir. Bu durum yük-yerdeğiştirme grafiğinde de görülmektedir.

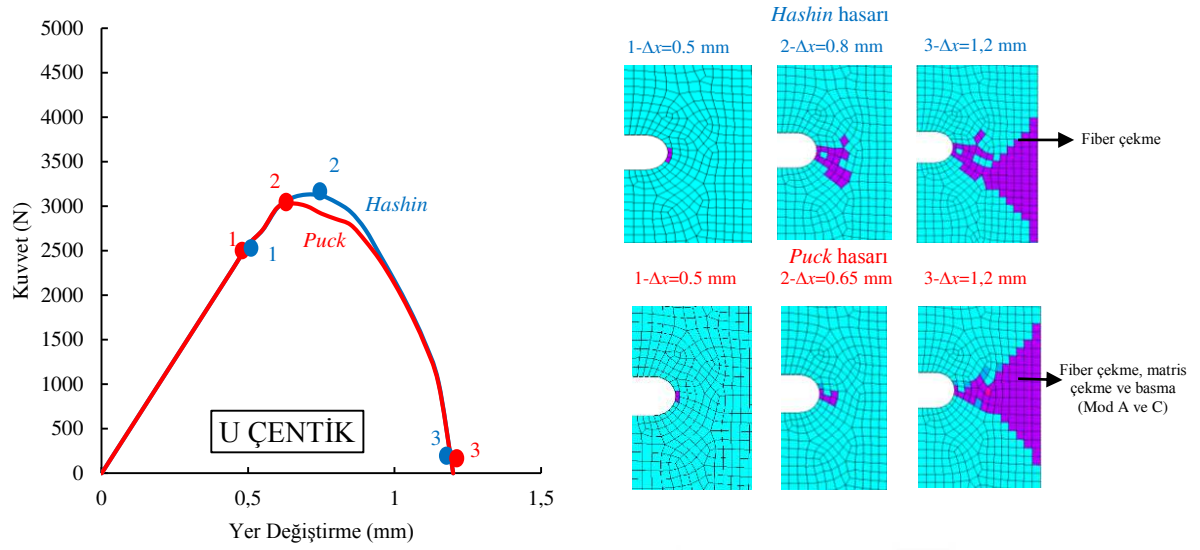
Şekil 6.15.'de dairesel delikli tabakalı kompozit levhada *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci, ikinci ve üçüncü hasar noktalarında fiber çekme hasarı görülmektedir. *Puck* hasar teorisinde ise birinci ve ikinci hasar noktalarında fiber çekme ve matris çekme hasarı görülmektedir. Üçüncü hasar noktasında ise matris çekme, fiber çekme ve matris basma hasarları görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 4185 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 4177 N'dur. Bu yük değerlerinden sonra 3. adımda levha genişliği boyunca fiber çekme hasarının levha

kenarlarına ulaşmasıyla hasar tamamlanmıştır. Burada iki sayısal çalışma arasındaki fark *Puck* hasar teorisinde ek olarak çok küçük bir bölgede matriks çekme ve basma hasarlarının görülmesidir.

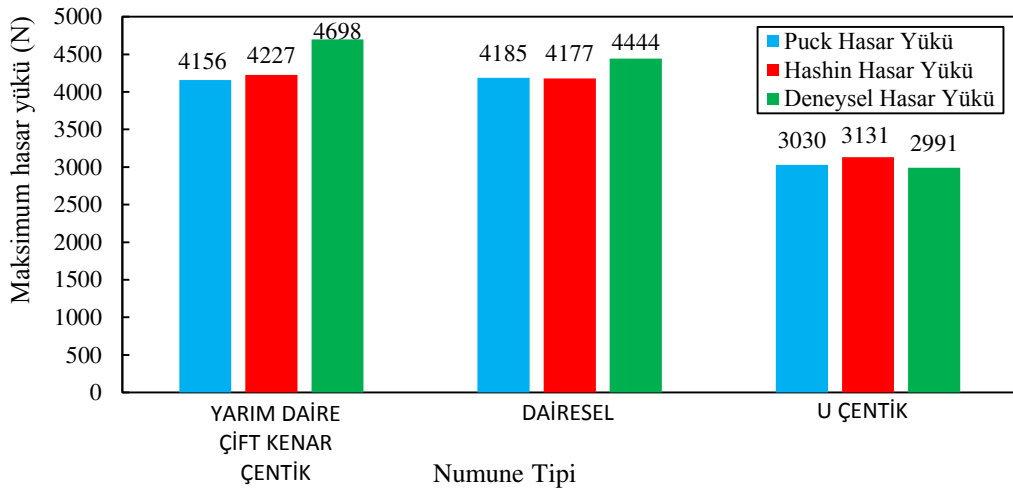


Şekil 6.15. Dairesel delikli tabakalı kompozit numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.16’de U kenar çentikli tabakalı kompozit levhada *Hashin* hasarına bakıldığında birinci, ikinci ve üçüncü hasar noktalarında fiber çekme hasarı görülmektedir. *Puck* hasar teorisinde ise birinci ve ikinci hasar noktalarında fiber çekme ve matriks çekme hasarı görülmektedir. Üçüncü hasar noktasında ise matriks çekme, fiber çekme ve matriks basma hasarları görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 3030 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 3131 N’ dur. Bu yük değerlerinden sonra 3. adımda levha genişliği boyunca fiber çekme hasarının levha kenarlarına ulaşmasıyla nihai (yıkıcı) hasar gerçekleşmiştir. Bu noktada reaksiyon kuvveti de sıfırdır. Burada iki sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinde ek olarak oluşan hasar tipi matriks çekme, matriks basma hasarının görülmesidir.



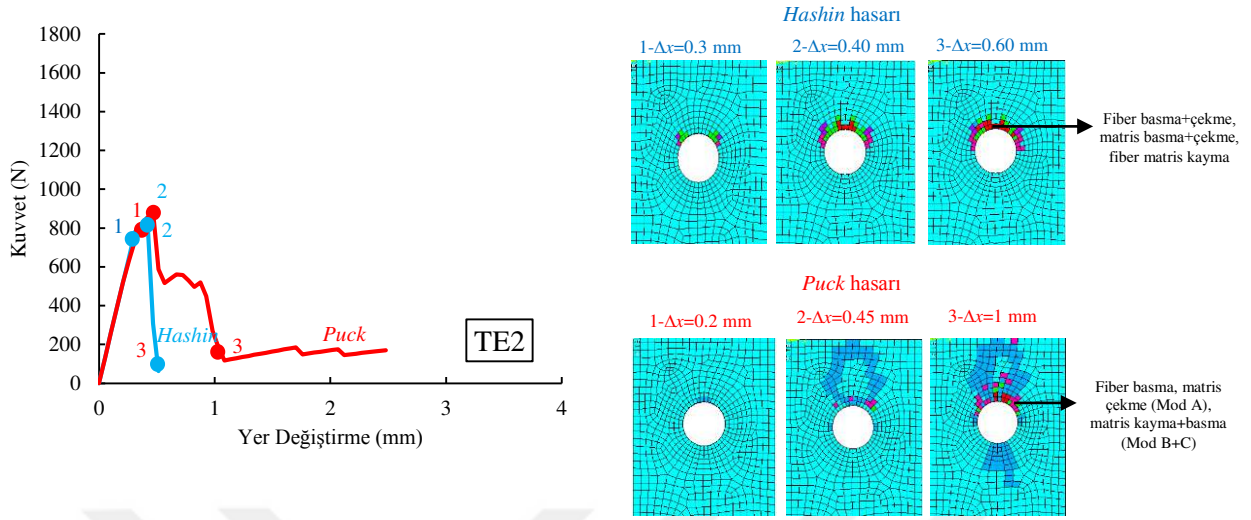
Şekil 6.16. U kenar çentikli tabakalı kompozit numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 6.17. Levhaların maksimum hasar yüklerinin pim delik yerlerine göre değişimi.

Şekil 6.17’de *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri maksimum hasar yükü karşılaştırma grafiklerinde görüldüğü gibi, dairesel delikli, yarım daire çift kenar çentik ve U kenar çentik levhalar kullanılarak yapılan deneylerde *Puck* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değerleri ile *Hashin* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değerleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Levha üzerindeki hasar dağılımları ve tiplerinin çok benzer olması bu sonucun oluşmasına sebeptir. Sayısal çalışmada en büyük hasar yükü, 4227 N ile yarım daire çift kenar çentikli numunede *Puck* hasarı için elde edilirken en düşük hasar yükü yine *Puck* hasarı için 3030 N ile U çentikli levha için elde edilmiştir.

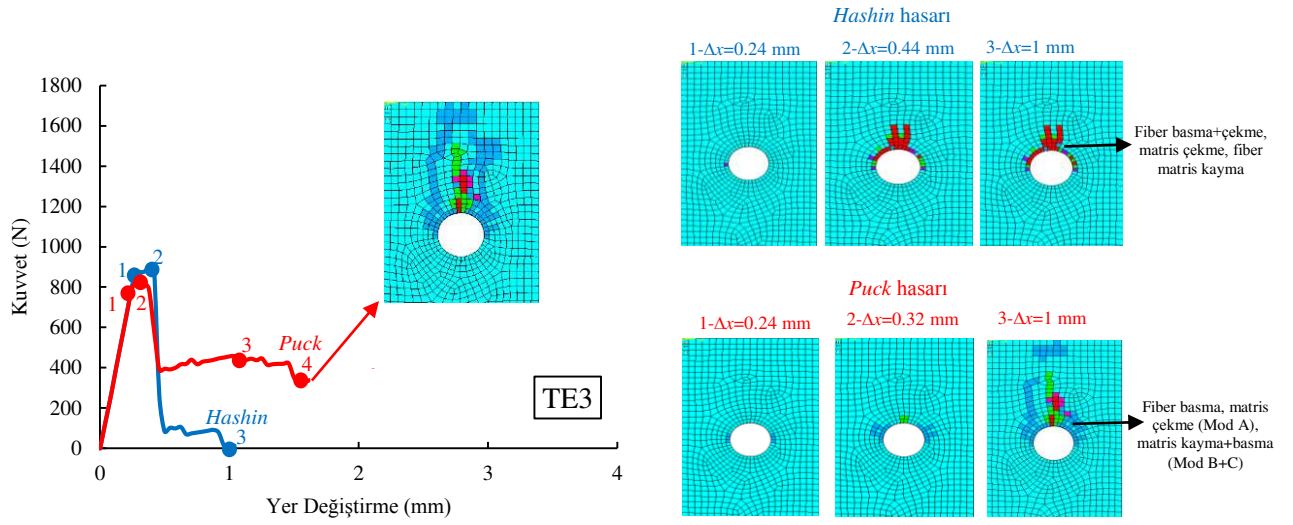
6.6.2. Tek pim delikli levhalara ait deneysel sonuçlar



Şekil 6.18. $E/D=3$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.18-21 arasındaki grafiklerde tek pim bağlantılı levhalarda *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri kullanılarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve hasar resimleri üç aşamada gösterilmiştir. Bu aşamalar hasarın başladığı (doğrusallığın bittiği) aşama (1- Δx), dayanımın maksimuma ulaştığı aşama (2- Δx) ve hasarın maksimuma ulaştığı aşamadır (3- Δx).

Şekil 6.18’ de gösterilen *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında kısmi olarak fiber çekme pim temas yüzeyi boyunca ise fiber matris kayma, matris basma hasarı, ikinci hasar noktasında fiber çekme, matris basma pim temas yüzeyi boyunca ise fiber matris kayma ve fiber basma hasarı, üçüncü hasar noktasında fiber çekme, matris basma, matris çekme pim temas yüzeyi boyunca ise fiber matris kayma ve fiber basma hasarı görülmektedir. *Puck* hasar teorisinde birinci hasar noktasında matris çekme (Mod A) hasarı, ikinci hasar noktasında baskın olarak matris çekme kısmi olarak fiber matris kayma ve matris basma hasarı (Mod B ve C), üçüncü hasar noktasında baskın olarak matris çekme, kısmi olarak fiber basma, fiber matris kayma ve matris basma hasarı (Mod B ve C) görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 884 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 855 N’ dur. Bu yük değerlerinden sonra üçüncü aşamada levha delik kenarı etrafında fiber basma hasarına ek olarak, matris hasarı meydana gelmiş ve ezilme hasarı oluşmuştur. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Puck* hasar teorisinde oluşan hasar tiplerine ek olarak *Hashin* hasar teorisinde fiber çekme hasarının görülmesidir.

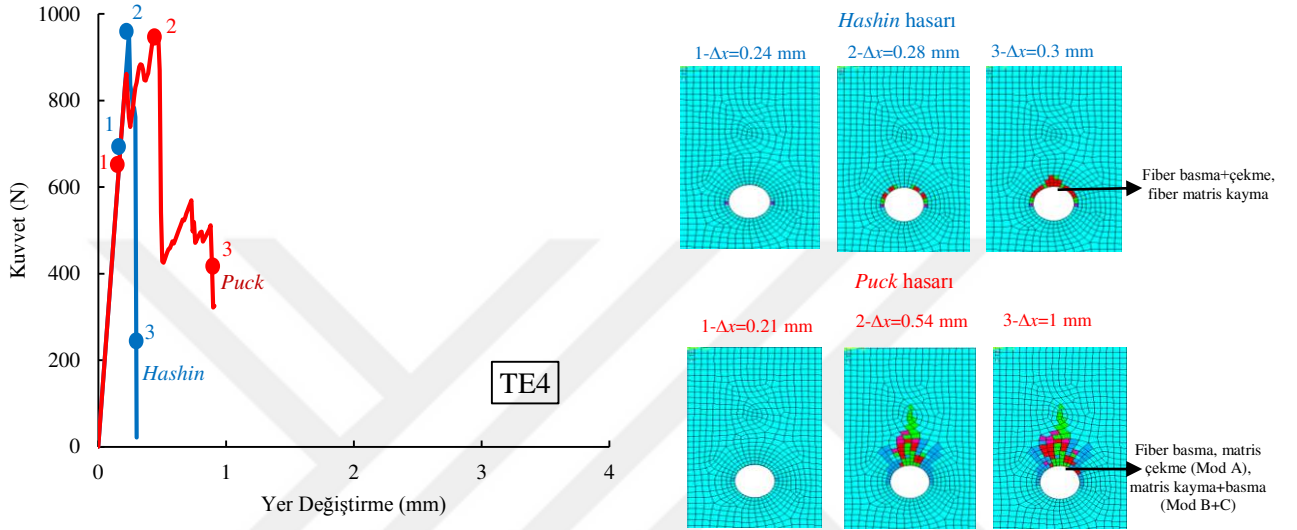


Şekil 6.19. $E/D=3$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.19’ da *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında fiber çekme, ikinci hasar noktasında fiber çekme, fiber matris kayma, matris çekme ve baskın olarak fiber basma hasarı, üçüncü hasar noktasında ise ikinci hasar noktasının benzeri bir hasar dağılımı görülmektedir. *Puck* hasar teorisinde birinci hasar noktasında matris çekme, ikinci hasar noktasında matris çekme ve fiber matris kayma hasarı üçüncü hasar noktasında ise matris kayma, matris basma, fiber basma ve delik kenarlarında baskın olarak matris çekme hasarı görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 828 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 895 N’ dur. Bu yük değerlerinden sonra 3. adımda *Hashin* hasarında ezilme hasarı fiber basma ağırlıklı olarak gerçekleşirken, *Puck* hasarında matris çekme (Mod A), fiber matris kayma ve matris basma (Mod B ve C) hasarları ağırlıklı olarak gerçekleşmiştir. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Puck* hasar teorisinde oluşan hasarın matris çekme hasarının baskın olarak görülmesi ve matris basma hasarının gerçekleşmesidir. *Hashin* hasar teorisinde ise *Puck* hasar teorisinden farklı olarak fiber çekme hasarının görülmesidir. 3. adımda *Hashin* de hasar yükü, diğer modellerdede geçerli olan sıfır değerine ulaşırken, *Puck* hasarına göre yük sıfırlanmamakta, yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Puck analizinde en son çözümün elde edildiği 4. adım ile yükün ani düşüşü sonrası elde edilen 3. adımın hasar dağılım resimleri

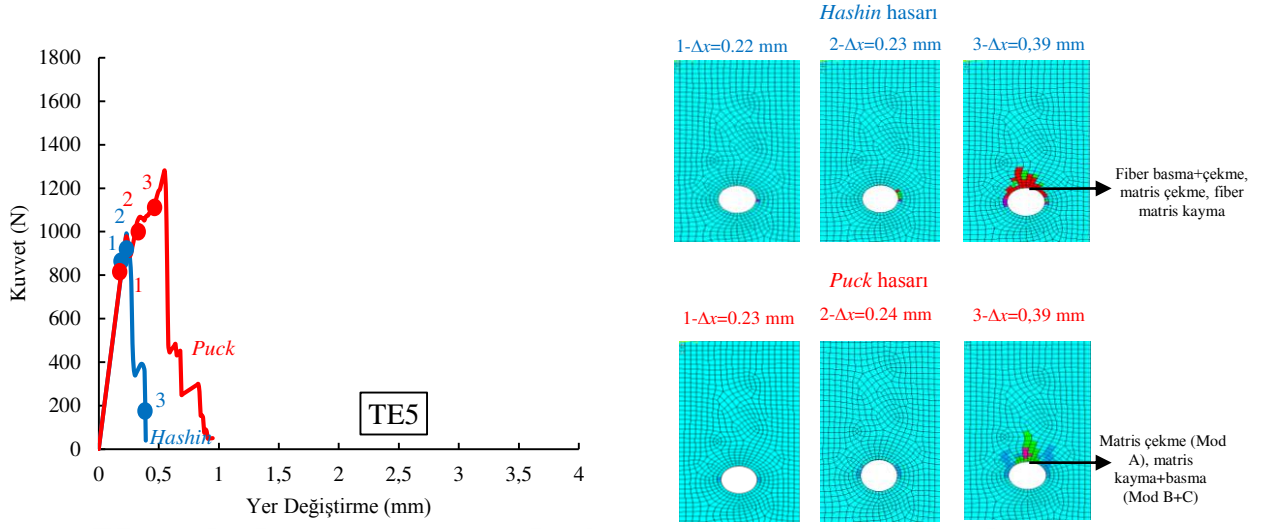
Şekil 6.19’da gösterilmiştir. Elde edilen resimlerden 3. ve 4. adımlarda hasarın benzediği sonucu ortaya çıkar. Yani maksimum yük sonrası ani yük düşüşün devamında hasar ilerlemesi durmaktadır. Bu durum diğer E/D oranlarında da geçerlidir.

Bu nedenle iki hasar kriterini karşılaştırmak amacıyla maksimum yük sonrası aynı Δx adımındaki hasar resimleri karşılaştırmalı olarak grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 6.20. $E/D=4$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.20’ de gösterilen *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında fiber çekme, ikinci hasar noktasında fiber çekme, fiber basma ve fiber matris kayma hasarı, üçüncü hasar noktasında ise ikinci hasarda olduğu gibi fiber çekme ve fiber basma, fiber matris kayma hasarı görülmektedir. *Puck* hasar teorisinde birinci hasar noktasında matris çekme, ikinci ve üçüncü hasar noktasında matris çekme, fiber matris kayma, matris basma ve fiber basma hasarı görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 883 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 957 N’ dur. Bu yük değerlerinden sonra 3. noktada *Hashin* hasarında fiber basma hasarı ağırlıklı ezilme hasarı, *Puck* hasarında ise matris ve fiber basma hasarı ağırlıklı ezilme meydana gelmiştir. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Hashin* hasar analizinde oluşan basma hasar tipine ek olarak *Puck* hasar analizi sonucunda matris basma hasarının görülmesidir.

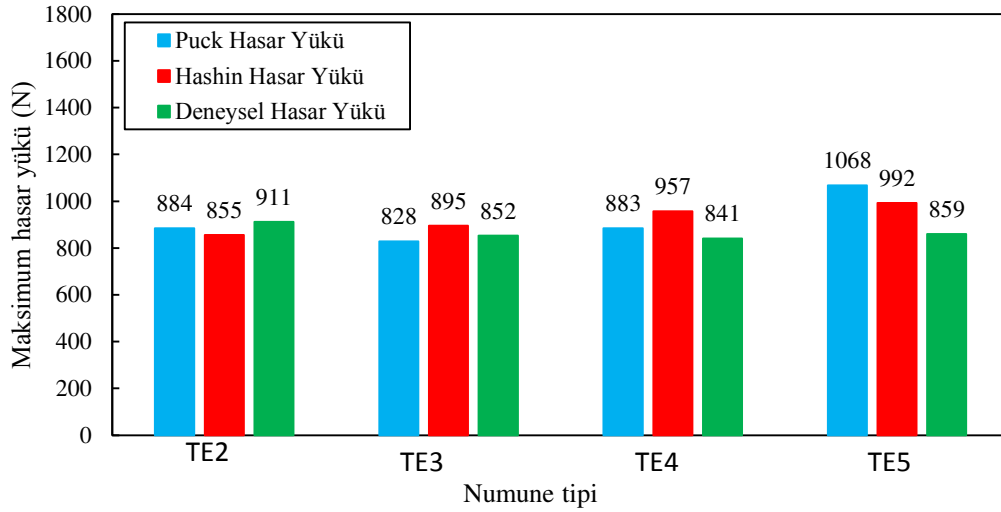


Şekil 6.21. $E/D=5$ olan tek pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.21’ de *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında fiber çekme, ikinci hasar noktasında fiber çekme, fiber matris kayma, fiber basma hasarı, üçüncü hasar noktasında ise fiber çekme, fiber matris kayma, matris çekme, matris basma ağırlıklı olarak fiber basma hasarı görülmektedir. *Puck* hasar teorisinde birinci hasar noktasında matris çekme, ikinci hasar noktasında matris çekme, üçüncü hasar noktasında ise matris çekme (Mod A) fiber matris kayma ve matris basma (Mod B ve C) hasarı görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1068 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 992 N’ dur. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Puck* hasar teorisinde oluşan hasar tipine ek olarak matris basma hasarının görülmesidir. Ayrıca 3. noktada *Hashin* hasar kriterine göre nihai hasara ulaşılırken, *Puck* hasarında henüz maksimum yüke ulaşılmamıştır. Şekil 6.15-18 arasındaki grafiklerde ise 3. noktada hem *Hashin* hem de *Puck* hasar teorisine göre maksimum hasar yükü aşılmıştır. *Puck* hasar analizinde maksimum hasarın olduğu 4. adımdaki ve yükün sıfırlandığı 5. adımdaki hasar resimleri ayrıca şekil 6.21’de gösterilmiştir.

Şekil 6.22’de *Puck* ve *Hashin* hasar teorilerine göre maksimum hasar yükü karşılaştırma grafikleri verilmiştir. TE2, TE3, TE4, TE5 değerlerinden görüldüğü gibi *Puck* hasar teorisindeki maksimum hasar ile *Hashin* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değerleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. *Hashin* hasar teorisine göre E/D oranının artması, hasar yükünün kısmi olarak artırmıştır. TE5 numunesinin hasar yükü TE2 numunesinden %12 fazladır. *Puck* hasar teorisinde ise artış ancak $E/D>3$ için geçerlidir. TE5 numunesinin hasar

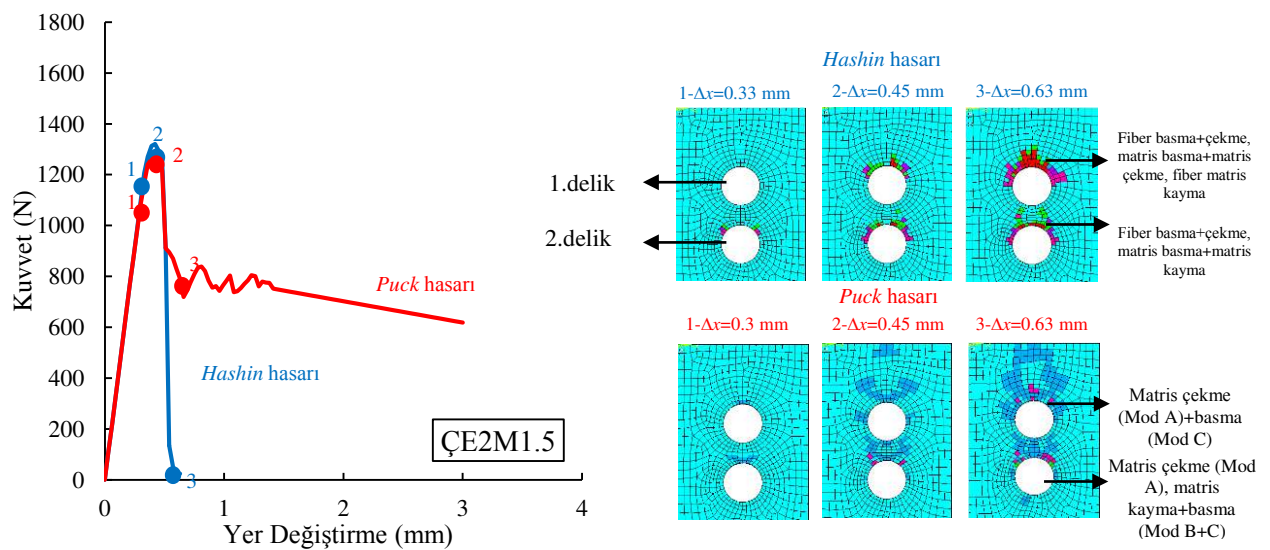
yükü TE3 numunesine göre %29 fazladır.



Şekil 6.22. Tek pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin farklı E/D oranlarına göre değişimi.

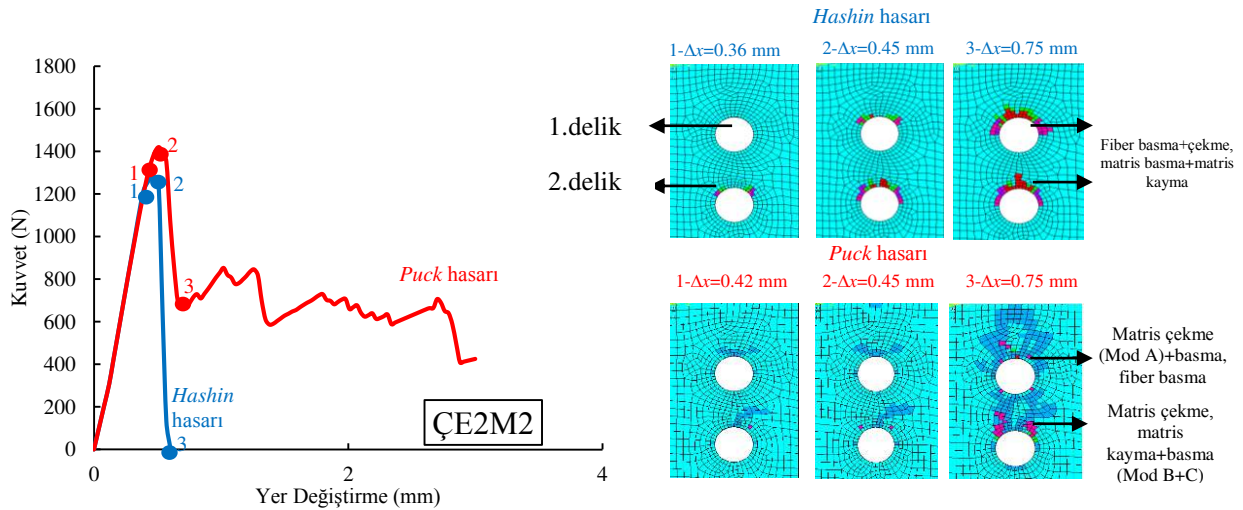
6.6.3. Çift pim delikli $M/D=1.5$, 2, 2.5 ve $E/D=2$ olan levhalara ait deneysel sonuçlar

Şekil 6.23, Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de $E/D=2$ olan çift pim delikli levhaların *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri kullanılarak yapılan sayısal çalışma sonucu kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve hasar resimleri üç aşamada gösterilmiştir. Bu aşamalar hasarın başladığı aşama ($1-\Delta x$), dayanımın maksimuma ulaştığı aşama ($2-\Delta x$) ve hasarın maksimuma ulaştığı aşamadır ($3-\Delta x$).



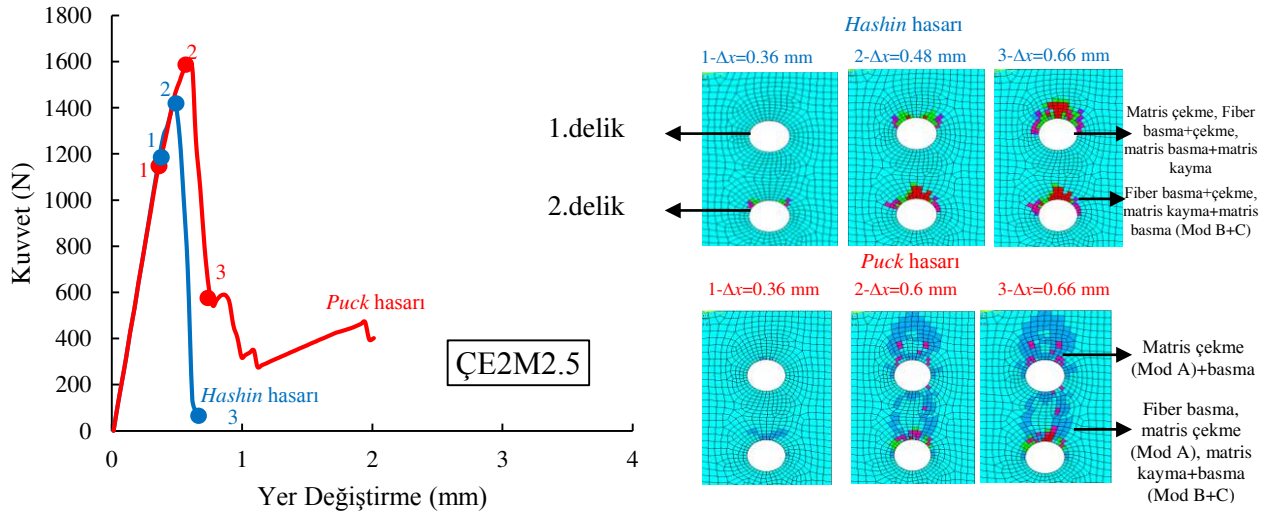
Şekil 6.23. $E/D=2$, $M/D=1.5$ olan çift pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.23’ de gösterilen *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte hasar görülmezken 2. delikte fiber basma, fiber çekme, matris basma, matris kayma, ikinci hasar noktasında her iki delikte matris basma, matris çekme, matris basma ve baskın olarak fiber matris kayma hasarları üçüncü hasar noktasında ise 1. delikte fiber basma, fiber çekme, matris basma, matris çekme ve matris kayma hasarları 2. delikte ise matris basma, fiber basma, fiber çekme ve matris kayma hasarları görülmektedir. Matris kayma hasarı, 2. delikten 1. deliğe doğru yayılmıştır. *Puck* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte hasar görülmezken 2. delikte fiber basma, fiber çekme, matris basma, matris kayma, ikinci hasar noktasında her iki delikte matris basma, matris çekme, matris basma ve baskın olarak fiber matris kayma hasarları üçüncü hasar noktasında ise 1. delikte fiber basma, fiber çekme, matris basma, matris çekme ve matris kayma hasarları 2. delikte ise matris basma, fiber basma, fiber çekme ve matris kayma hasarları görülmektedir. Matris çekme hasarı, 2. delikten 1. deliğe doğru yayılmıştır. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1263.1 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1321.2 N’ dur. Bu yük değerlerinden sonra *Hashin* hasar analizine göre 1. delikte fiber basma ağırlıklı ve 2. delikte fiber basma ve kayma ağırlıklı ezilme hasarı *Puck* hasar analizine göre ise 1. ve 2. delikte matris basma hasarı ağırlıklı ezilme hasarı meydana gelmiştir. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Puck* hasar analizinde yaygın bir matris çekme hasarı görülmesidir.



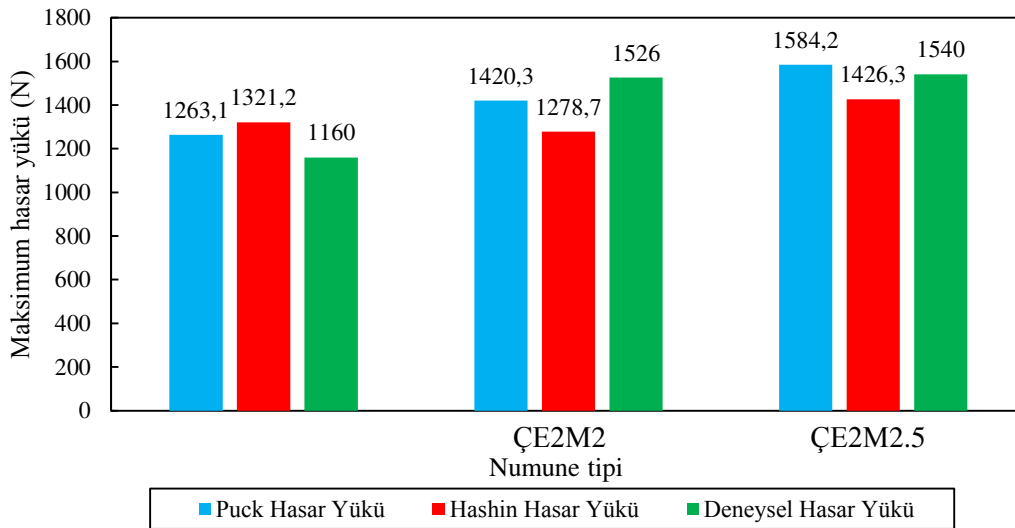
Şekil 6.24. $E/D=2$, $M/D=2$ olan çift pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.24’ de gösterilen *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında hasar 1. delikte hasar görülmezken 2. delikte matris basma, fiber çekme ve matris kayma hasarları ikinci hasar noktasında 1. delikte matris basma, fiber basma ve matris kayma 2. delikte matris basma, fiber basma, matris kayma ve fiber çekme üçüncü hasar noktasında ise 1. delikte matris basma, fiber basma, matris kayma ve fiber çekme 2. delikte matris basma, fiber basma, matris kayma ve fiber çekme hasarı meydana gelmiştir. *Puck* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında hasar 1. delikte matris çekme 2. delikte matris çekme, matris basma hasarları ikinci hasar noktasında 1. delikte matris çekme 2. delikte matris çekme, matris basma hasarları, üçüncü hasar noktasında ise 1. delikte matris çekme, matris basma ve fiber basma 2. delikte matris çekme, matris basma ve fiber matris kayma hasarı meydana gelmiştir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1420 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1278 N’ dur. Bu yük değerlerinde *Hashin* hasar analizine göre pim temas yüzeyi etrafında her iki delikte de fiber basma hasarı ağırlıklı ezilme hasarı, *Puck* hasar analizine göre ise her iki delik etrafında matris çekme ve basma hasarı ağırlıklı olarak ezilme hasarı meydana gelmiştir. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Puck* hasar teorisinde hasar tipinin baskın olarak matriks çekme ve basma (Mod A ve B) olmasıdır.



Şekil 6.25. $E/D=2$, $M/D=2.5$ olan çift pim bağlantılı numuneye ait sayısal kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.25’ de gösterilen *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte hasar görülmezken 2. delikte fiber çekme, matriks basma ve fiber matris kayma, ikinci hasar noktasında 1. delikte fiber çekme, fiber basma, matriks basma ve fiber matris kayma hasarı 2. delikte fiber çekme, fiber basma, matriks basma ve fiber matris kayma hasarı üçüncü hasar noktasın 1. delikte fiber çekme, fiber basma, matriks basma, matris çekme ve fiber matris kayma hasarı 2. delikte fiber çekme, fiber basma, matriks basma, ve fiber matris kayma hasarı meydana gelmiştir. *Puck* hasar teorisinde birinci hasar noktasında 1. delikte matris çekme 2. delikte matris çekme ikinci hasar noktasında 1. delikte matris çekme, matris basma 2. delikte matris çekme, matris basma, fiber matris kayma üçüncü hasar noktasında 1. delikte matris çekme, matris basma 2. delikte matris çekme, matris basma, fiber matris kayma ve fiber basma hasarı görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1584 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1426 N’ dur. 3. noktada *Hashin* hasar analizine göre fiber basma ağırlıklı ezilme hasarı meydana gelirken, *Puck* hasar analizine göre 3. noktada ağırlıklı olarak matris çekme hasarı meydana gelmiştir ve matris çekme hasarı, 2. delikten 1. deliğe doğru yayılmıştır. Burada iki sayısal çalışmayı birbirinden ayıran en belirgin özellik *Hashin* hasar analizinde ağırlıklı ezilme hasarlı eleman bölgesinde fiber basma hasar ağırlıklı olmasıdır.



Şekil 6.26. Levhaların maksimum hasar yüklerinin pim delik yerlerine göre değişimi.

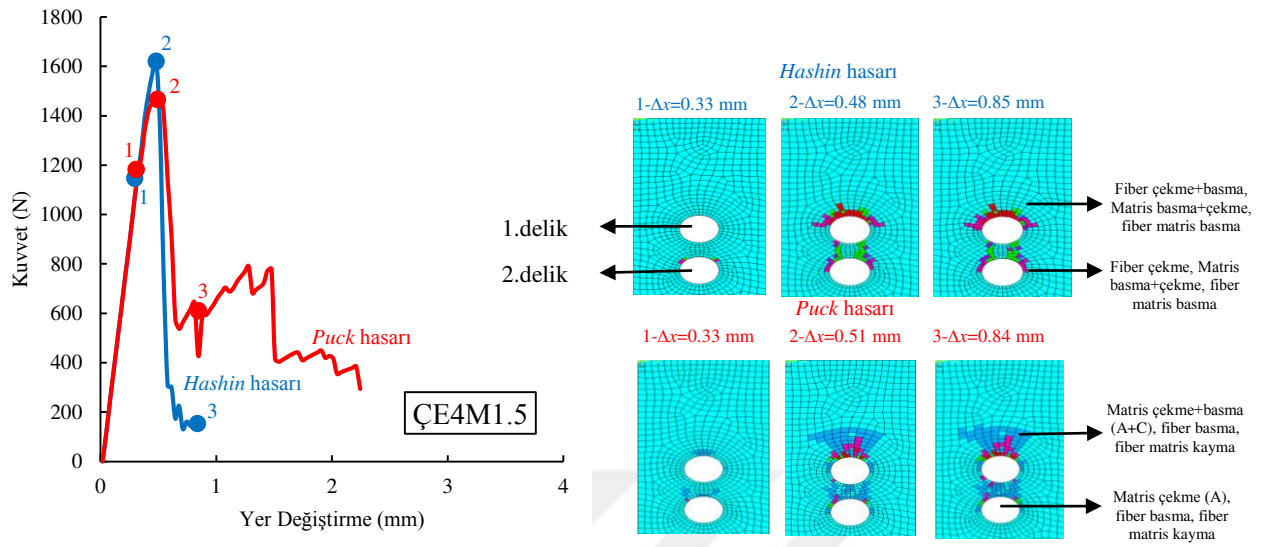
Şekil 6.26’de *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri maksimum hasar yükü karşılaştırma grafiklerinde ÇE2M1.5, ÇE2M2 değerlerinde görüldüğü gibi yapılan sayısal çalışmalarda *Puck* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değeri *Hashin* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değerinden yüksek çıkmıştır. ÇE2M2.5 numunesinde ise *Puck* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değeri *Hashin* hasar teorisindeki maksimum hasar yükü değerinden düşük çıkmıştır. M/D ’ nin artışı *Puck* hasar analizine göre maksimum hasar yükünü kısmi olarak artırırken, *Hashin* hasar analizine göre bunu söylemek mümkün değildir. $M/D=2.5$ için hasar yükü $M/D=1.5$ olduğu durumda %25 kadar *Puck* hasar analizine göre daha büyüktür.

6.6.4. Çift pim delikli $M/D=1.5, 2, 2.5$ ve $E/D=4$ olan levhalara ait deneysel sonuçlar

Yukarıdaki Şekil 6.27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29’da $E/D=4$ olan çift pim bağlantılı levhaların *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri kullanılarak yapılan sayısal analizlerin sonucu kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve hasar resimleri üç aşamada gösterilmiştir. Bu aşamalar hasarın başladığı aşama (1- Δx), dayanımın maksimuma ulaştığı aşama (2- Δx) ve hasarın maksimuma ulaştığı aşamadır (3- Δx).

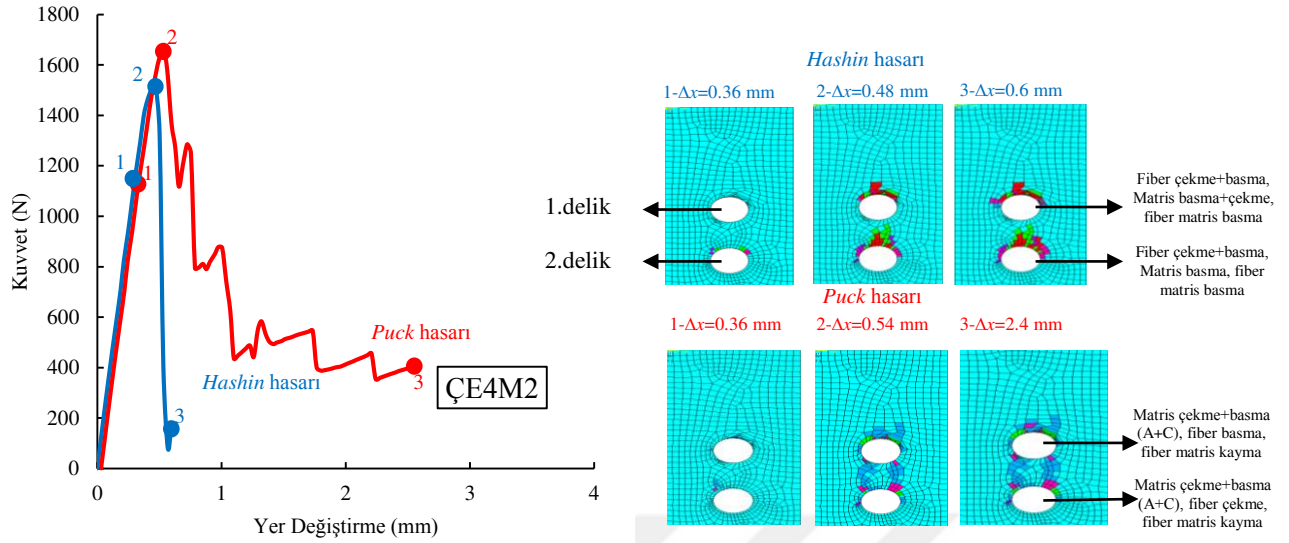
Şekil 6.27’de gösterilen *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte hasar görülmezken 2. delikte matris basma, fiber matris kayma hasarı ikinci hasar noktasında 1. delikte fiber çekme, fiber basma, matris basma ve fiber matris kayma hasarı 2. delikte fiber çekme, matris basma, fiber matris kayma ve matris çekme hasarı üçüncü hasar noktasında 1. delikte fiber çekme, fiber basma, matris basma, fiber matris kayma ve matris çekme hasarı 2. delikte fiber çekme, matris basma, fiber matris kayma ve matris çekme hasarı görülmektedir. *Puck* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte matris çekme 2. delikte matris çekme, matris basma hasarı ikinci ve üçüncü hasar noktalarının 1. deliğinde fiber basma, matris çekme, matris basma, fiber matris kayma hasarı 2. deliğinde matris çekme, matris basma, fiber matris kayma hasarı üçüncü hasar noktasında ise hasarı görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1483 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1445 N’ dur. 3. hasar noktasında *Hashin* hasar analizine göre 1. delikte matris basma ağırlıklı 2. delikte ise fiber matris kayma hasar ağırlıklı ezilme hasarı meydana gelmiştir. *Puck* hasar analizine göre ise 1. ve 2. Delikte ağırlıklı olarak matris çekme (Mod A) ve matris basma (Mod C) hasarı görülmüştür ve matris

çekme hasarı, 2. delikten 1. deliğe doğru yayılmıştır.



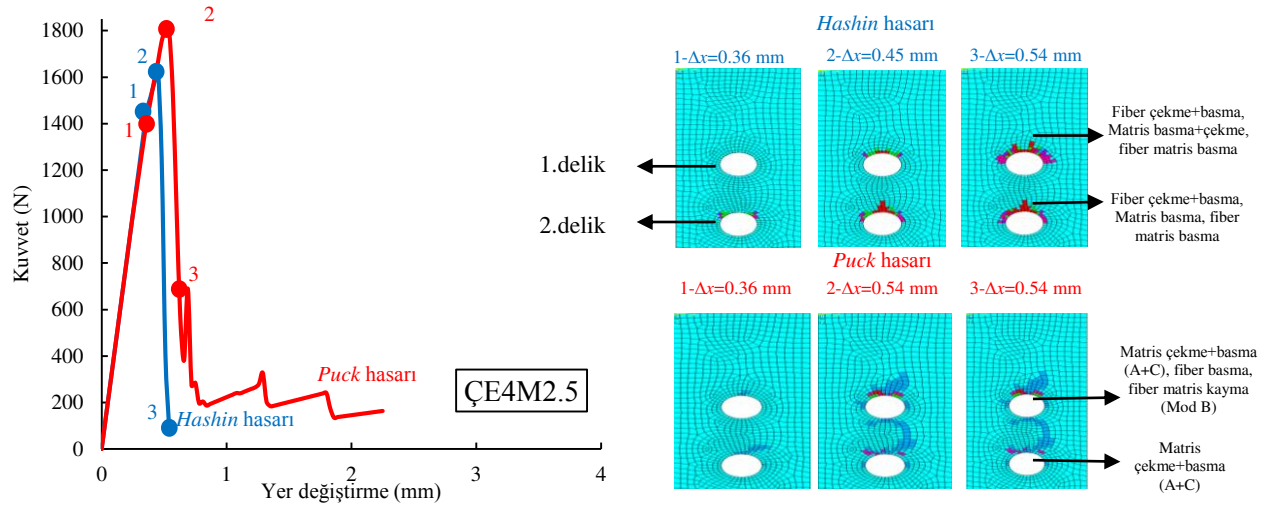
Şekil 6.27. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.29'da Hashin hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte hasar görülmezken, 2. delikte fiber çekme, matris basma, fiber matris kayma hasarı, ikinci hasar noktasında her iki delikte matris basma, fiber matris kayma, fiber çekme ve basma hasarı, üçüncü hasar noktasında 1. delikte matris basma ve çekme, fiber matris kayma, fiber çekme ve basma hasarı 2. delikte matris basma, fiber matris kayma, fiber çekme ve basma hasarı hasarları görülmektedir. Puck hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında her iki delikte de matris çekme hasarı, ikinci hasar noktasında 1. delikte fiber basma, matris çekme ve basma, fiber matris kayma hasarı 2. delikte matris çekme ve basma hasarları, üçüncü hasar noktalarında ise her iki delikte de ikinci hasar noktasında görülen hasar tipleri görülmektedir.

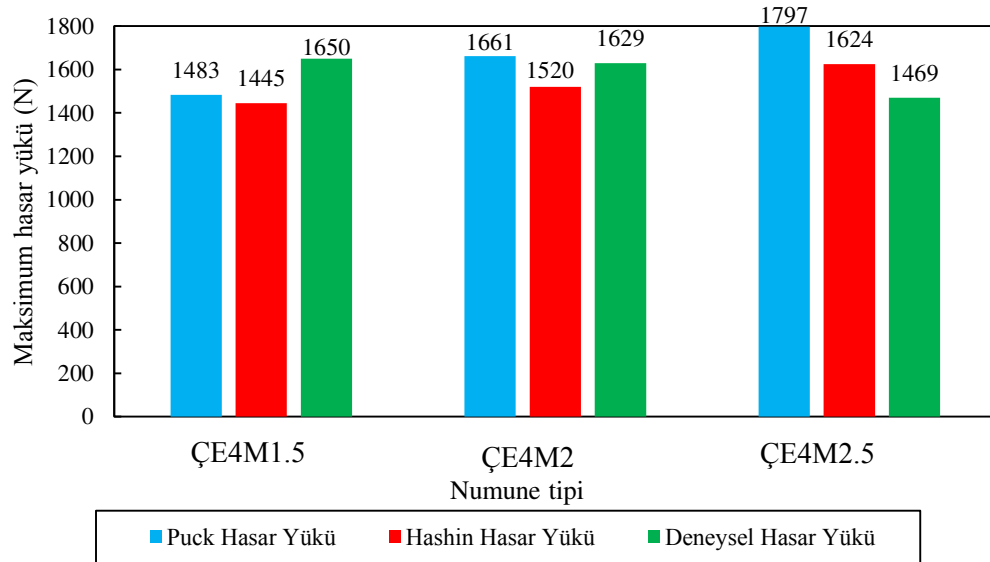


Şekil 6.28. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.

Şekil 6.28’de *Hashin* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte hasar görülmezken 2. delikte fiber çekme ve basma, matris çekme ve basma, fiber matris kayma hasarı, ikinci hasar noktasında her iki delikte fiber çekme ve basma, matris çekme ve basma, fiber matris kayma hasarı, üçüncü hasar noktasında ise her iki delikte fiber çekme ve basma, matris çekme ve basma, fiber matris kayma hasarları görülmektedir. Her iki delikteki hasar tipleri birbirine benzerdir. *Puck* hasar teorisine bakıldığında birinci hasar noktasında 1. delikte matris çekme hasarı, 2. delikte matris çekme ve basma (Mod A ve C), ikinci hasar noktasında 1. delikte fiber basma, matris çekme ve basma (Mod A ve C) ve fiber matris kayma (Mod B) hasarı, 2. delikte fiber çekme, matris çekme ve basma, fiber matris kayma (Mod B) hasarı, üçüncü hasar noktasında 1. delikte fiber basma, matris çekme ve basma (Mod A ve C), fiber matris kayma (Mod B), 2. delikte fiber çekme, matris çekme ve basma, fiber matris kayma (Mod B) hasarları görülmektedir. Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1661 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1520 N’ dur. *Hashin*’e göre her iki delik çevresinde ezilme hasarı yayılmıştır. *Puck* a göre ise matris çekme hasarı serbest kenara kadar yayılmış olmasına rağmen Mod B+C baskın hasarlı ezilmenin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.29. $E/D=4$, $M/D=2.5$ olan numuneye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.



Şekil 6.30. Çift pim bağlantılı levhaların maksimum hasar yüklerinin farklı M/D oranlarına göre değişimi ($E/D=4$).

Yapılan sayısal çalışmada *Puck* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1797 N, *Hashin* hasar teorisinin maksimum hasar yükü 1624 N' dur. Her iki analizde de meydana gelen hasar tipleri ezilme hasarıdır. Ancak *Hashin* analizinde hasar delik çevresinde çekme doğrultusuna göre belirli bir eğimle yayılırken, *Puck* hasar analizinde hasar çekme doğrultusunda levha serbest kenarına doğrudur.

Şekil 6.30'de *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri maksimum hasar yükü için karşılaştırıldığında ÇE4M1.5, ÇE4M2, ÇE4M2.5 değerlerinden görüldüğü üzere *Puck* hasar teorisine göre maksimum hasar yükü değerleri *Hashin* hasar teorisine göre maksimum hasar yükü değerlerinden daha yüksek olduğu görülür. Her iki analizde de hasar yükünün artışı M/D oranının artışı ile doğru orantılıdır. M/D=2.5 için hasar yükündeki artış M/D= 1.5 olan numunelere göre *Hashin* hasar analizi için %11, *Puck* hasar analizi için %12 dir.

6.7. Hasara Uğramış Numunelerin Deneysel Çalışmalarla Olan Benzerlik Oranı

Tablo 6.7'de yarım daire çift kenar çentik, dairesel ve U-çentik tek pim bağlantılı ve çift pim bağlantılı numunelerin deneysel ve sayısal hasar tipleri ile maksimum hasar yüklerinin iki yöntem için karşılaştırmalı deneysel % yaklaşım oranları sunulmuştur. Pim de deliksiz numunelere bakılacak olursa deneysel hasar tipinde yırtılma hasarı, *Puck* hasar analizi için baskın hasar benzer olarak yırtılma yani fiber çekme hasarıdır. Deneysel yaklaşım oranları Tablo 6.3'e göre incelenecek olursa dairesel ve U-çentikli numunelerde *Puck* hasar teorisine göre elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara benzerlik yüzdesi *Hashin* hasar teorisine göre elde edilen sonuçlardan daha yüksektir. Yarım daire çift kenar çentikli numunede ise *Hashin* hasar teorisi sonuçlarının deneysel benzerlik oranı *Puck* hasar teorisine göre elde edilen deneysel benzerlik oranından %2 daha yüksektir.

TE2, TE3, TE4, TE5 numunelerine bakıldığında deneysel hasar tipinde ezilme hasarı görülmüştür. TE2 numunesinde *Puck* hasar analizinde baskın hasar matris çekme ve basma, TE3 numunesinde baskın hasar matris çekme ve fiber matris kayma, TE4 numunesinde baskın hasar fiber basma, matris çekme, fiber matris kayma ve TE5 numunesinde ise baskın hasar matris çekme, fiber matris kayma hasarlarıdır. *Puck* ve *Hashin* teorileri için deneysel yaklaşım oranları Tablo 6.3'e göre incelenecek olursa; TE2, TE3 ve TE4 numunelerinde *Puck* hasar teorisinin deneysel benzerlik oranı *Hashin* hasar teorisinin deneysel benzerlik oranına göre daha yüksektir. TE5 numunesinde ise *Hashin* hasar teorisinin deneysel benzerlik oranı, *Puck* hasar teorisinin deneysel benzerlik oranına göre daha yüksektir. Dolayısıyla TE2, TE3 ve TE4

numuneleri için elde edilen *Puck* sonuçlarının *Hashin* hasar sonuçlarından daha iyi olduğu söylenebilir.

ÇE2M1.5, ÇE2M2, ÇE2M2.5 numunelerine bakıldığında deneysel hasar tipinde ezilme hasarı görülmüştür. ÇE2M1.5 ve ÇE2M2 numunelerinde *Puck* hasar analizi için baskın hasar 1. delikte matris çekme ve basma 2. delikte matris çekme ve basma, ÇE2M2.5 numunelerinde ise baskın hasar 1. delikte matris çekme ve basma 2. delikte matris çekme ve basma, fiber matris kayma hasarıdır. ÇE2M1.5, ÇE2M2 ve ÇE2M2.5 numunelerinde *Puck* hasar teorisi sayısal sonuçları *Hashin* hasar teorisi sayısal sonuçlarına göre deneysel sonuçlara göre daha yakındır.

ÇE4M1.5, ÇE4M2, ÇE4M2.5 numunelerine bakıldığında ise deneysel hasar tipinde ezilme hasarı görülmüştür. ÇE4M1.5 numunelerinde *Puck* hasar analizi için baskın hasar 1. delikte matris çekme ve basma 2. delik matris basma, fiber matris kayma ÇE4M2 numunelerinde *Puck* hasar analizi için baskın hasar 1. delik matris çekme, fiber matris kayma 2. delik matris çekme ve basma ve ÇE4M2.5 numunelerinde *Puck* hasar analizi için baskın hasar 1. delik matris çekme ve basma 2. delik matris çekme ve basma hasarıdır. ÇE4M1.5, ÇE4M2 numunelerinde *Puck* hasar teorisi deneysel benzerlik oranı *Hashin* hasar teorisi deneysel benzerlik oranına göre daha iyidir. ÇE4M2.5 numunesinde ise *Hashin* hasar teorisi deneysel benzerlik oranı *Puck* hasar teorisi deneysel benzerlik oranına göre daha yüksektir.

Sonuç olarak *Hashin* hasar teorisi deneysel benzerlik oranları kısmi olarak yarım daire çift kenar çentik, TE5 ve ÇE4M2.5 numunelerinde, *Puck* hasar teorisi sonuçlarına göre daha iyi çıkmıştır. Geri kalan bütün numunelerde *Puck* hasar teorisi deneysel benzerlik oranları *Hashin* hasar teorisi sonuçlarından daha iyidir.

Tablo 6.7. *Puck* ve *Hashin* hasar teorilerine göre elde edilen analiz sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması.

Numune ismi	Deneysel Hasar Tipi	Sayısal Baskın Hasar (<i>Puck</i>)	Deneysel maksimum hasar yükü (N)	Sayısal yaklaşım % (<i>Puck</i>)	Sayısal yaklaşım % (<i>Hashin</i>)
B	Yırtılma	Yırtılma (Fiber çekme)	4460	5	6
C	Yırtılma	Yırtılma (Fiber çekme)	4981	12	10
D	Yırtılma	Yırtılma (Fiber çekme)	3631	1	5
TE2	Ezilme	Ezilme (Matris çekme ve basma)	959	3	6
TE3	Ezilme	Ezilme (Matris çekme, fiber matris kayma)	902	3	5
TE4	Ezilme	Ezilme (Fiber basma , Matris çekme, fiber matris kayma)	898	5	14
TE5	Ezilme	Ezilme (Matris çekme, fiber matris kayma)	875	24	15
ÇE2M1.5	1.delik Ezilme/2.delik Ezilme	1.delik Matris çekme ve basma /2.delik Matris çekme ve basma	1487	9	14
ÇE2M2	1.delik Ezilme/2.delik Ezilme	1.delik Matris çekme ve basma /2.delik Matris çekme ve basma	1620	7	16
ÇE2M2.5	1.delik Ezilme/2.delik Ezilme	1.delik Matris çekme ve basma /2.delik Matris çekme+ basma , fiber matris kayma	1783	3	7
ÇE4M1.5	1.delik Ezilme/2.delik Ezilme	1.delik Matris çekme ve basma /2.delik Matris basma , fiber matris kayma	1771	10	12
ÇE4M2	1.delik Ezilme/2.delik Ezilme	1.delik Matris çekme, fiber matris kayma/2.delik Matris çekme ve basma	1658	2	7
ÇE4M2.5	1.delik Ezilme/2.delik Ezilme	1.delik Matris çekme ve basma /2.delik Matris çekme ve basma	1544	22	10

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde deneysel ve sayısal olarak incelenen numunelerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Deneysel çalışmalarda çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire kenar çentik, U-kenar çentikli levhalarda maksimum hasar yük değerinin eğrisinin sırasıyla azaldığı görülmüştür. Bu numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri başlangıçta doğrusal bir davranış göstermektedir. Bu numunelerin deney sonuçlarında levhada yırtılma (fiber çekme) hasarı baskın hasar tipidir. *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri kullanılarak yapılan çalışmalarda deneysel ve sayısal sonuçlar birbirlerine en düşük % 12 oranında yaklaşım göstermişlerdir. *Puck* ve *Hashin* hasar teorileri kullanılarak yapılan analizlerde hasar tiplerinin birbirine çok benzediği, hasar yüklerinin de birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu tip numunelerin sayısal baskın hasar tipi fiber çekme hasarıdır. Dolayısıyla fiber çekme hasarının etkin olduğu modellerde *Hashin* ve *Puck* hasar analizlerinin benzer sonuçlar verdiği söylenebilir.
- Tek pim delikli levhaların deneysel çalışmalarında TE2, TE3, TE4 ve TE5 numunelerinin maksimum hasar yükünün E/D oranının artmasıyla çok fazla değişmediği görülmüştür. Baskın hasarın pim deliği etrafında $E/D \geq 2$ için ezilme hasarı olduğundan bu sonuç ortaya çıkmıştır. Sayısal çalışmada ise deneysel çalışma sonuçlarına en yakın % 3 oranında *Puck* teorisi için, TE2 ve TE3 numunelerinde en uzak ise % 24 oranında yine *Puck* teorisi için TE5 numunesinde yaklaşım göstermiştir. Sayısal çalışmalarda TE2, TE3, TE4 numunelerinde *Puck* hasar teorisi deneysel çalışmaya daha yakın, TE5 numunelerinde ise *Hashin* hasar teorisi deneysel çalışmaya daha yakın çıkmıştır.
- Çift pim delikli levhalar kullanılarak yapılan deneyler M/D oranının artmasıyla $E/D = 2$ ve $M/D = 1.5, 2, 2.5$ olan numunelerin maksimum hasar yükünün kısmi olarak arttığı görülmüştür. Bu deney sonuçlarında her iki pim

deliği etrafında da ezilme hasarı meydana gelmiştir. Sayısal çalışmalarda $E/D=2$ için tüm çift pim bağlantılı numunelerde *Puck* hasar teorisi sonuçları deneysel çalışmaya daha yakın çıkmıştır.

- Çift pim delikli levhalar kullanılarak yapılan deneylerde M/D oranının artmasıyla $E/D = 4$ ve $M/D = 1.5, 2, 2.5$ olan numunelerin maksimum hasar yükünün arttığı görülmüştür. Sayısal çalışmalarda ÇE4M1.5, ÇE4M2 numunelerinde *Puck* hasar teorisi maksimum hasar yükü sonuçları deneysel çalışmaya daha yakın, ÇE2M2.5 numunesinde ise *Hashin* hasar teorisi maksimum hasar yükü sonuçları deneysel çalışmaya daha yakın çıkmıştır.
- Sonuç olarak tek ve çift pim delikli numunelerde $E/D \geq 2$ ve $M/D \geq 1.5$ için tüm pim bağlantılı numunelerde ezilme hasarı görülmektedir. Bu durumun sebebi çapraz dokuma fiberlerin olması ve E/D ve M/D oranının kesme hasarına izin vermemesindendir. Pim bağlantısı yapılmayan çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire kenar çentik, U kenar çentik levhalarda ise yırtılma hasarı görülmektedir. Bu durumun sebebi ise fiberlerin tek yönde takviye edilmesi ve fiberlerin 0° fiber takviye açısına sahip olmasından dolayıdır.
- Sonuç olarak çentikli numuneler için yapılan analizlerde *Puck* ve *Hashin* hasar analizleri benzer sonuçlar verirken, pim bağlantılı kompozitlerin analizinde bu iki kriter hasar yükleri açısından benzer sonuçlar verse de hasar bölgeleri ve tipleri açısından kısmi farklılıklar göstermiştir. Çünkü çentikli numunelerde baskın hasar fiber çekme hasarı olduğundan ve her iki hasar teorisinde bu tip hasara yaklaşımı benzer olduğu için benzer sonuçların elde edilmesi doğaldır. Ancak pim bağlantılı modellerde matris hasarının etkin rol almaya başlamasıyla ve malzeme indirgeme kurallarının yardımıyla bu iki hasar teorisinin farkı ortaya çıkmaktadır. Pim bağlantıları için *Puck* hasar kriterine göre yapılan analizlerde elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara maksimum hasar yükü bakımından yakınlığı, *Hashin* hasar kriterine göre elde edilen sonuçlardan numune sayısına göre çok daha fazladır. Pim bağlantılı numunelerde *Hashin* hasar teorisinde maksimum yük sonrasında reaksiyon kuvveti sıfır değerine düşerken, *Puck* hasar teorisinde sıfırlanmamakta belirli

bir değerde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu durum ise matris hasarının Puck analizinde etkin bir hasar tipi olması ancak yıkıcı hasara malzeme indirgeme kuralları gereği ($E_1=E_2 \neq 0$) sebep olmamasından kaynaklıdır.

- Deneysel çalışmalarda da, ezilme hasarının baskın olduğu pim bağlantılarında maksimum yük sıfırlanmamakta, aynı *Puck* hasarında olduğu gibi belirli bir yük değerinde sabit kalmaktadır. Bu durum *Puck* analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın bir davranış sergilediğinin bir göstergesidir.
- Sayısal maksimum hasar yüklerinin deneysel verilerle karşılaştırılması sonucu *Hashin* hasar kriterine göre elde edilen sonuçların %15 ile %16 arasında yaklaşım elde edilirken, *Puck* hasarında bu yaklaşım aralığı %12 ile %24 arasında olduğu görülmüştür. Ancak deneysel verilere en yakın değerler *Puck* hasar analizi için elde edilmiştir.
- Farklı modlar için matris hasarı *Puck* hasar kriterinde *Hashin*'e göre daha etkin bir hasardır. Sayısal hasar modelinde de sonuçlar incelendiğinde; *Hashin*'e göre *Puck* hasarında özellikle matris hasarının daha geniş bir bölgeye baskın olarak yayıldığı görülmüştür. *Hashin* hasar analizinde ise hasarlar özellikle ve sadece deliğe yakın bölgelerde baskın fiber hasarı şeklinde ortaya çıkmıştır.
- Yukarıda belirtilen sonuçlar doğrultusunda tasarımcılar matris hacim oranının yüksek olduğu kompozitler veya matris hasarının önemli olduğu yükleme şartları için *Puck* hasar teorisini tercih edebilirler. Hasar analizlerinde tabaka sayısının nispeten fazla olduğu daha kalın kompozitler için eğilme durumunda delaminasyon etkisi de dikkate alınmalıdır. Bu çalışma ile günümüzde özellikle havacılık sektöründe önemli bir yere sahip olan fiber takviyeli ortotropik kompozitlerin farklı sınır şartları için yük-yerdeğiştirme davranışının sayısal olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Çalışma farklı kompleks yükleme ve kompozit modeller için geliştirilmeye açıktır.

8. KAYNAKLAR

- [1] Camanho, P.P., Matthews, F.L., 1997, Stress Analysis and Strength Prediction of Mechanically Fastened Joints in FRP Review, Composites Part A 28 529-547.
- [2] Oh, J.H., Kim, Y.G., Lee, D.G., 1997, Optimum Bolted Joints for Hybrid Composite Materials, Composite Structures 38 329-341.
- [3] Camanho, P.P., Matthews, F.L., 1999, A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in composite laminates, Journal of Composite Materials, 33 2248–80.
- [4] Dano, M.L., Gendron, G., Picard, A., 2000, Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joint in Composite Laminates, Composite Structures 50 287–296.
- [5] McCarthy, M.A., Lawlor, V.P., Stanley, W.F., McCarthy, C.T., 2002, Bolt-Hole Clearance Effects and Strength Criteria in Single-Bolt, Single-Lap, Composite Bolted Joints, Composites Science and Technology 62 1415–1431.
- [6] Whitworth, H.A., Othieno, M., Barton, O., 2003, Failure Analysis of Composite Pin Loaded Joints, Composite Structures 59 261–266.
- [7] Kelly, G., Hallstrom, S., 2004, Bearing Strength of Carbon Fibre/Epoxy Laminates: Effects of Bolt-Hole Clearance, Composites: Part B 35 331–343.
- [8] Xiao, Y., Ishikawa, T., 2005, Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted Composite Joints (Part I: Experimental investigation), Composites Science and Technology 65 1022–1031.
- [9] Xiao, Y., Ishikawa, T., 2005, Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted Composite Joints (Part II: Modeling and Simulation), Composites Science and Technology 65 1032–1043.
- [10] Camanho, P.P., Lambert, M., 2006, A Design Methodology for Mechanically Fastened Joints in Laminated Composite Materials, Composites Science and Technology 66 3004–3020.
- [11] Khashaba, U.A., Salam, H.E.M., Al-Shorbagy, A.E., Seif, M.A., 2006, Effect of Washer Size and Tightening Torque on the Performance of Bolted Joints in Composite Structures, Composite Structures 73 310–317.

- [12] Khashaba, U.A., Selmy, A.I., Sonbaty, I.A.E., Megahed, M., 2007, Behavior of Notched and Unnotched $[0/\pm 30/\pm 60/90]_s$ Gfr/Epoxy Composites Under Static and Fatigue Loads, *Composite Structures* 81 606–613.
- [13] Bouiadjra, B.B., Rezgani, L., Ouinas, D., Belhouari, M., Ziadi, A., 2007, Numerical Analysis of the Notch Effect and the Behavior of Notch Crack in Adhesively Bonded Composite Laminates, *Computational Materials Science* 38 759–764.
- [14] Whitworth, H.A., Aluko, O., Tomlinson, N.A., 2008, Application of the Point Stress Criterion to the Failure of Composite Pinned Joints, *Engineering Fracture Mechanics* 75 1829–1839.
- [15] Aluko, O., Whitworth, H.A., 2008, Analysis of Stress Distribution Around Pin Loaded Holes in Orthotropic Plates, *Composite Structures* 86 308– 313.
- [16] Kishore, A.N., Malhotra, S.K., Prasad, N.S., 2009, Failure Analysis of Multi-Pin Joints in Glass Fibre / Epoxy Composite Laminates, *Composite Structures* 91 266-277.
- [17] Kannan, V.K., Murali, V., Rajadural, A., Rao, N., 2011, Finite Element Analysis and Notched Tensile Strength Evaluation of Center-Hole 2D Carbon/Carbon Laminates, *Advanced Composite Materials*, 20 289– 300.
- [18] Caminero, M.A., Lopez-Pedrosa, M., Pinna, C., Soutis, C., 2013, Damage Monitoring and Analysis of Composite Laminates with an Open Hole and Adhesively Bonded Repairs Using Digital Image Correlation, *Composites: Part B* 53 76–91.
- [19] Turan, K., Gur, M., Kaman, M.O., 2013, Progressive Failure Analysis of Pin Loaded Unidirectional Carbon-Epoxy Laminated Composites, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 21 98–106.
- [20] Li, H., Li, S., 2013, Maximum Entropy Method for Probabilistic Bearing Strength Prediction of Pin Joints in Composite Laminates, *Composite Structures* 106 626–634.
- [21] Hoang, T.D., Herbelot, C., Imad, A., Benseddig, N., 2013, Numerical Modelling for Prediction of Ductile Fracture of Bolted Structure Under Tension Shear Loading, *Finite Elements in Analysis and Design* 67 56–65.

- [22] Phadnis, V.A., Makhadmeh, F., Roy, A., Silberschmidt, V.V., 2013, Drilling in Carbon/Epoxy Composites: Experimental Investigations and Finite Element Implementation, *Composites: Part A* 47 41-51.
- [23] Ahmad, H., Crocombe, A.D., Smith, P.A., 2014, Strength Prediction in CFRP Woven Laminate Bolted Double-Lap Joints Under Quasi-Static Loading Using XFEM, *Composites: Part A* 56 192–202.
- [24] Zhang, J., Liu, F., Zhao, L., Chen, Y., Fei, B., 2014, A Progressive Damage Analysis Based Characteristic Length Method for Multi-Bolt Composite Joints, *Composite Structures* 108 915– 923.
- [25] Egan, B., McCarthy, M.A., Frizzell, R.M., Gray, P.J., McCarthy, C.T., 2014, Modelling Bearing Failure in Countersunk Composite Joints Under Quasi-Static Loading Using 3D Explicit Finite Element Analysis, *Composite Structures* 108 963–977.
- [26] Turan, K., Kaman, M.O., Gur, M., 2015, Progressive Failure Analysis of Laminated Composite Plates with Two Serial Pinned Joints, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 10 839–849.
- [27] Lee, C.S., Kim, J.H., Kim, S., Ryu, D.M. and Lee J.M., 2015, Initial and Progressive Failure Analyses for Composite Laminates Using Puck Failure Criterion and Damage-Coupled Finite Element Method, *Composite Structures* 121 406-419.
- [28] Zhou, Y., Nezhad, H.Y., Hou, C., Wan, X., McCarthy C.T. and McCarthy, M.A., 2015, A Three Dimensional Implicit Finite Element Damage Model and Its Application to Single-Lap Multi-Bolt Composite Joints with Variable Clearance, *Composite Structures* 131 1060-1072.
- [29] Gadade, A.M., Lal, A. and Singh, B.N., 2016, Accurate Stochastic Initial and Final Failure of Laminated Plates Subjected to Hygro-Thermo-Mechanical Loadings Using Puck's Failure Criteria, *International Journal of Mechanical Sciences (IJMS)* 114 177-206.

- [30] Egan, B., McCarthy, M.A., Frizzell, R.M., Gray, P.J. and McCarthy, C.T., 2014, Modelling Bearing Failure in Countersunk Composite Joints Under Quasi-Static Loading Using 3D Explicit Finite Element Analysis, *Composite Structures* 108 963-977.
- [31] Chowdhury, N.M., Wang, J., Chiu, W. K., Chang, P., 2016, Experimental and Finite Element Studies of Thin Bonded and Hybrid Carbon Fibre Double Lap Joints Used in Aircraft Structures, *Composites: Part B* 85 233–242.
- [32] Chowdhury, N.M., Wang, J., Chiu, W. K., Chang, P., 2016, Experimental and Finite Element Studies of Thin Bonded and Hybrid Carbon Fibre Double Lap Joints Used in Aircraft Structures, *Composites: Part B* 100 68–77.
- [33] Warren, K.C., Lopez-Anido, R.A., Senthil, S.V., Bayraktar, H.H., 2016, Progressive Failure Analysis of Three-Dimensional Woven Carbon Composites in Single-Bolt, Double-Shear Bearing, *Composites: Part B* 84 266–276.
- [34] Zhang, J., Liu, F., Zhao, L., Chen, Y., Fei, B., 2016, Investigation on a Novel Bolted Joint Scheme for Foam Inserted Top-Hat Stiffened Composite Plates, *Materials and Design* 93 448–457.
- [35] Sola, C., Castanie, B., Michel, L., Lachaud, F., Delabie, A., Mermoz, E., 2016, On the Role of Kinking in the Bearing Failure of Composite Laminates, *Composite Structures* 141 184–193.
- [36] Nerilli, F., Vairo, G., 2017, Progressive Damage in Composite Bolted Joints Via a Computational Micromechanical Approach, *Composites: Part B* 111 357–371.
- [37] Ahn, H. and Yu, W.R., 2017, Mechanical Analysis of 3D Braided and Woven Composites Using Fiber-Based Continuum Analysis, *Composite Structures* 160 1105-1118.
- [38] Puck, A. and Schuermann, H., 1998, Failure Analysis of FRP Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models, *Composites Science and Technology* 58(7) 1045–67.

- [39] Puck, A. and Schuermann, H., 2002, Failure Analysis of FRP Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models, *Composites Science and Technology* 62(12–13) 1633-62.
- [40] Puck, A., Kopp, J. and Knops, M., 2002, Guide Lines for the Determination of the Parameters in Puck's Action Plane Strength Criterion, *Composites Science and Technology* 62 371-378.
- [41] Şahin, Y., 2000, *Kompozit Malzemelere Giriş*, Gazi Kitabevi, Ankara.
- [42] Yalçın H., Gürü M., 2002, *Malzeme Bilgisi*, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [43] A., Turgut ve M., Gür, 1994, Statik Sürtünmeli Temas Problemlerinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümü, *Tr. Journal of Engineering and Environmental Sciences* 18 119-125.
- [44] Gür, M., Turgut, A., and 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.
- [45] Hoa, S., V., 2003, *Composite Materials Design and Applications*, CRC Pres 233 s.
- [46] Vinson, J., R., Chou, TsuWei, 1975, *Composite Materials and Their Use in Structures*, Applied Science Publishers Ltd., 438 s.
- [47] Ansys 11. (Academic Teaching Introductory) Command References and Gui.
- [48] Hoa, S., V., 1975, *Computer Aided Design of Polymer Matrix Composite Structures*, CRC Pres Inc., 371 s.
- [49] Hull, D., 1981, *An Introduction of Composite Materials*, Applied Science Publishers Introduction of Composite Materials, Cambridge University Pres Inc., 246 s.
- [50] Dong, H., Wang, J., and Karihaloo, B.L., 2014, An Improved Puck's Failure Theory for Fibre-Reinforced Composite Laminates Including the in Situ Strength Effect, *Composites Science and Technology* 98 86-92.
- [51] Ansys 13.0., (Academic Teaching Introductory) Command References and Gui.
- [52] Okutan, B., 2001, *Stress and Failure Analysis of Laminated Composite Pinned*

Joints, PhD Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences Dokuz Eylül University, İzmir

- [53] <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2041863/Boeing-787-Dreamliner-reality-carbon-fibre-plane-delivered-Japan.html>
- [54] Gadade, A.M., Lal, A. and Singh, B.N., 2016, Finite Element Implementation of Puck's Failure Criterion for Failure Analysis of Laminated Plate Subjected to Biaxial Loadings, Aerospace Science and Technology 55 227-24.
- [55] <http://news.livedoor.com/article/detail/9298000/>
- [56] <https://www.eldictamen.mx/2018/01/estatal/estacion-espacial-internacional-fue-perceptible-a-su-paso-por-veracruz-video/>
- [57] Kaman, M.O., Gur, M., 2018, Puck Failure Criteria and Application for Laminated Composites 4-5s.
- [58] Turan, K., 2009, Mechanical Behavior Analysis of Resolvable Joints Composite Plates 171.
- [59] <https://www.muhendisbeyinler.net/otoklav-nedir/>

ÖZGEÇMİŞ

Caner DOĞAN 1991 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2010 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü' nü kazanarak 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2015-2016 yılları arasında TSE'de Asansör Gözetim Muayene Uzmanı olarak çalıştı. 2016 yılında Fırat Asansörleri İnş. Nak. San. ve Tic. Ltd. Şti.' de Makina Mühendisi olarak işe başladı. Halen aynı görevine devam etmektedir.

