T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

Hazırlayan
Mustafa YILDIRIM

Danışman
Prof.Dr. M.Kemal APALAK

Doktora Tezi

Ağustos 2011
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

Hazırlayan
Mustafa YILDIRIM

Danışman
Prof.Dr. M.Kemal APALAK

Doktora Tezi

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FBD-09-881 kodlu proje ile desteklenmiştir

Ağustos 2011
KAYSERİ

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Mustafa YILDIRIM

"Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışları" adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Mustafa YILDIRIM

Danışman
Prof.Dr. M.Kemal APALAK

Makina Mühendisliği ABD Başkanı
İbrahim UZMAY

Prof.Dr. M.Kemal APALAK danışmanlığında **Mustafa YILDIRIM** tarafından hazırlanan **"Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışları"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

02 / 08 / 2011

JÜRİ :

Başkan : Prof.Dr. İbrahim UZMAY

Üye : Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU

Üye : Prof.Dr. M. Kemal APALAK

Üye : Prof.Dr. Ömer EYERCİOĞLU

Üye : Prof.Dr. Sedat ÖZDEN

ONAY :

Bu tezin kabülü Enstitü Yönetim Kurulunun 22/08/2011 tarih ve 2011/29-08 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23 / 08 / 2011

Prof.Dr. Necmettin MARAŞLI
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

"Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışları" isimli tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. M. Kemal APALAK'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca gerçekleştirilen nümerik analizlerde ve tezin yazım aşamasında zaman harcayan, emek veren, yardımlarını esirgemeyen ve en önemlisi bilgilerini paylaşan değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Recep EKİCİ'ye teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasında her zaman olduğu gibi emek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Fehmi NAİR, değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Alper CERİT'e ayrıca YILDIRIM Makina LTD. ŞTİ'ne ve kardeşim Süleyman YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca bana verdiği manevi destek, göstermiş olduğu sabır ve anlayıştan dolayı değerli eşim M. Tülin YILDIRIM'a ve canım kızlarım Firuze ve Zeynep'e teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar bana verdikleri her türlü destek ve hoşgörüden dolayı anneme ve babama teşekkür eder saygılarımı sunarım.

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

Mustafa YILDIRIM
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ağustos 2011
Tez Danışman : Prof.Dr. M.Kemal APALAK

ÖZET

Kullanım amacına ve uygulama yerine göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir ve mühendislikte mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek bir darbeye karşı istenmeyen sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gösterebileceği en uygun davranışı göstermesi istenir. Metallerin darbe davranışı elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir. Metallerde darbe hasarı genellikle çarpma yüzeyinde gelişir ve başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Kompozit malzemelerde ise bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpma türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan tabakalar arası ayrılma şeklinde başlayabilir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek önem arzeder.

Bu tez çalışmasında, farklı veya aynı malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinden üretilmiş metal-metal, kompozit-kompozit ve metal-kompozit bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları sayısal ve deneysel olarak incelendi. Öncelikli olarak darbe hızı, vurucu çapı, vurucu kütlesi, yapıştırıcı kalınlığı ve fiber açısının bağlantıların darbe davranışları üzerinde etkileri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırıldı. Plakalarda ve yapıştırıcı tabakasında oluşan hasar tipleri ve alanları belirlendi. Daha sonra sayısal düşük hızlı darbe analizleri Ceast marka Fractovis Plus test cihazında deneysel olarak gerçeklendi ve sayısal sonuçlar deneysel veriler ile desteklendi. Metal bağlantılarda sayısal darbe davranışı sonuçlarını deneysel sonuçlara yaklaştırmak için elastikiyet bozunum yöntemi uygulandı. Darbe hızının ve kütlesinin, darbe davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu, incelenen vurucu çapının temas kuvveti üzerinde ektisinin ihmal edilebilir bir seviyede olduğu tespit edildi. Ayrıca, metal-kompozit bağlantılarda vurucu ile temas eden plakanın kompozit yada metal olmasının hasar tipleri üzerinde çok büyük etkiye sahip olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızlı darbe, yapıştırıcı, hasar analizi, elastikiyet bozunumu, tabakalı kompozitler, nonlineer sonlu elemanlar metodu.

LOWSPEED IMPACT BEHAVIORS OF THE ADHESIVELY BONDED JOINTS

Mustafa YILDIRIM
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Ph.D. Thesis, August 2011
Thesis Supervisor: Prof.Dr. M.Kemal APALAK

ABSTRACT

Impact response of a material may depend on its application area and aim. In order to avoid the unstable responses of material due to any external effect, the optimal response of the material is expected. Materials deform elastically and plastically under an impact load in a short period. Impact mechanism develops strongly with surface conditions, and becomes more apparent on the metal surface whereas the damage may initiate inside the composite materials, such as along interfaces between the layers rather than on the surface of the composite material. Therefore, the prediction of the initiation and propagation of the damages in the composite materials needs various damage models to be considered.

In this study, the low-speed impact behaviors of the adhesively bonded lap joints having similar and dissimilar adherends, such as metal - metal, composite - composite, and metal-composite were investigated theoretically and experimentally. The effects of the impact energy, impactor radius and mass, adhesive thickness and fiber angle on the low-speed impact behavior of these similar and dissimilar adhesive joints were investigated in detail using the explicit non-linear finite element method. The initiation, propagation, as well as permanent size of the damaged region in the adhesive layer and plates were studied. The important differences in the damage mechanism in the metal and composite plates appeared.

Low-speed impact tests were performed on Ceast brand Fractovis Plus drop tower, and numerical analyses were compared with experimental findings.Impact velocity and impactor mass have significant effects on the impact behavior. In additon, the macro-scale images of deformed specimens after impact test of metal-composite joints showed that the plate material has a great effect on the impact region on the metal or composite adherend the impactor contacts with.

Keywords: Low-speed impact, adhesive, damage analysis, elastic degradation, laminated composites, nonlinear finite element method.

İÇİNDEKİLER

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI i

YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI ii

KABUL VE ONAY iii

TEŞEKKÜR iv

ÖZET v

ABSTRACT vi

İÇİNDEKİLER vii

TABLOLAR LİSTESİ x

ŞEKİLLER LİSTESİ xi

GİRİŞ 1

1. BÖLÜM
YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ METAL BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

1.1. Motivasyon 15

1.2. Teorik Model 16

1.3. Düşük Hızlı Darbe Analizi ve Sonuçlar 19

2. BÖLÜM
YAPIŞTIRICI KALINLIĞININ METAL BAĞLANTILARIN DARBE DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

2.1. Motivasyon 35

2.2. Al-Al Bağlantı 35

2.3. Al-St Bağlantı 36

2.4. St-Al Bağlantı 37

2.5. St-St Bağlantı 37
2.6. Kalıcı Deformasyonlara Tesiri 38
2.7. Hasar Alanlarına Tesiri 48

3. BÖLÜM
YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ METAL BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI (DENEYSEL ÇALIŞMA)

3.1. Giriş 57
3.2. Yöntem 57
3.3. Numune Hazırlama 58
3.4. Düşük Hızlı Darbe Testi 61
3.5. Bilgisayar Ortamında Verilerin Hazırlanması 62
3.6. Darbe Sonrası Analizler 65
3.7. Sonuçlar 66
3.8. Elastikiyet Bozunumu (Degredasyon) 84

4. BÖLÜM
YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

4.1. Motivasyon 89
4.2. Teorik Model 90
4.3. Hasar Kriterleri 91
4.3.1. Fiber Hasar Kriterleri 93
4.3.2. Matris Hasar Kriterleri 94
4.3.3. Kayma Hasar Kriteri 95
4.3.4. Ayrılma (delaminasyon) Hasar Kriteri 95
4.4. Sayısal Analiz Sonuçları 96
4.4.1. Yapıştırıcı kalınlığı, fiber açısı ve darbe enerjisinin etkileri 96
4.4.2. Yapıştırıcı kalınlığı, fiber açısı ve darbe enerjisinin yapıştırıcı hasarı üzerine etkileri 100
4.4.3. Darbe sonrası kompozit tabakalarda hasar analizleri . . . 102

5. BÖLÜM
YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI (DENEYSEL ÇALIŞMA)

5.1. Giriş 116

5.2. Yöntem 116

5.3. Darbe Sonrası Analizler 117

6. BÖLÜM
YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ METAL-KOMPOZİT PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI (DENEYSEL ÇALIŞMA)

6.1. Giriş 129

6.2. Yöntem 129

6.3. Darbe Testi Sonuçları 129

7. BÖLÜM
SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

7.1. Sonuç, Tartışma ve Öneriler 146

KAYNAKLAR 150

ÖZGEÇMİŞ 156

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı vurucu yarıçapı, kütlesi ve hızı için düşük hızlı darbe test parametreleri. 19

Tablo 2.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St bağlantıları için üç farklı enerji seviyesinde, üç farklı yapıştırıcı kalınlığında hasar alanları (mm^2), $\varepsilon_{Al}^{hasar} = 0.253$, $\varepsilon_{St}^{hasar} = 0.01596$, $\varepsilon_{Adh}^{hasar} = 0.1656$ 54

Tablo 3.1. Al-Al, Al-St, St-Al, St-St bağlantılarının darbe testlerinde kullanılan darbe enerji seviyeleri. 62

Tablo 3.2. Elastikiyet bozunum tablosu, $E_{üst} = 197$ GPa, $E_{alt} = 78.80$ GPa, $\varepsilon_{üst} = 0.6$, $\varepsilon_{alt} = 0.1$. 86

Tablo 4.1. Kompozit bağlantıda kullanılan kompozit malzemenin (grafit-epoksi IM-6 / 3501-6) mekanik özellikleri ($V_f = \%63.5$). . . 90

Tablo 4.2. Grafit-epoksi kompozit fiber (IM-6) ve matris (3501-6) için mikro-mekanik özellikler 95

Tablo 4.3. Kompozit hasar kriterleri. 103

Tablo 5.1. Kompozit bağlantıların darbe testlerinde kullanılan enerji seviyeleri. 117

Tablo 5.2. Kompozit plakaların düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen en büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri. 126

Tablo 6.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal-kompozit bağlantıların düşük hızlı darbe deneylerinde kullanılan plaka dizilimleri. 130

Tablo 6.2. Alüminyum-kompozit bindirmelerin alt plaka arka yüzeyinde oluşan kalıcı deformasyon alanları. 132

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Soyulma yüklerine karşı mukavemeti arttırıcı tedbirler. 2

Şekil G.2. Darbe tipleri: a) Parçacık darbesi, b) Rijit cisim darbesi (golf sopasının golf topuna vurması), c) Deforme olabilir cisimler üzerinde düşey deformasyon (çekiç ile uzun bir çubuğa yandan vurmak), d) Deforme olabilir cisimler üzerinde eksenel deformasyon (eksenel bir çubuğun ankastre bir çubuğa çarpması). 10

Şekil 1.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik-alüminyum (St-Al) plakalar için teorik model geometrisi. 17

Şekil 1.2. Metal bindirmeleri oluşturan metallerin ve yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri. 17

Şekil 1.3. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı ya da farklı malzemelerden üretilmiş plakaların ABAQUS® sonlu elemanlar programı kullanılarak hazırlanmış modeli. 17

Şekil 1.4. Vurucu yarıçapının r yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların darbe davranışları üzerine etkileri, a) Al-Al, b) Al-St, c) St-Al ve d) St-St, ((1a) $\rightarrow E = 25$ J, $r = 8$ mm, (1b) $\rightarrow E = 25$ J, $r = 12.5$ mm, (2a) $\rightarrow E = 40$ J, $r = 8$ mm, (2b) $\rightarrow E = 40$ J, $r = 12.5$ mm, değerler için Tablo 1.1) 20

Şekil 1.5. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş a) Al-Al, b) Al-St, c) St-Al ve d) St-St bağlantılar için farklı enerji seviyelerinde $E = 6$, 16, 25 ve 40 J kinetik enerji ve plastik kayıp enerjisinin zamana göre değişimleri. 23

Şekil 1.6. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş a) Al-Al, b) Al-St, c) St-Al ve d) St-St plakalar için farklı enerji seviyelerinde ($E = 6$, 16, 25 ve 40 J) temas kuvveti değişimleri. 28

Şekil 1.7. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm). 30

Şekil 1.8. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-St bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm). 31

Şekil 1.9. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-Al bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm). 32

Şekil 1.10. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-St bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm). 33

Şekil 2.1. Yapıştırıcı kalınlığının Al-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri. 39

Şekil 2.2. Yapıştırıcı kalınlığının Al-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri. 40

Şekil 2.3. Yapıştırıcı kalınlığının Al-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri. 41

Şekil 2.4. Yapıştırıcı kalınlığının Al-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri. 42

Şekil 2.5. Yapıştırıcı kalınlığının St-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri. 43

Şekil 2.6. Yapıştırıcı kalınlığının St-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri. 44

Şekil 2.7. Yapıştırıcı kalınlığının St-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri. 45

Şekil 2.8. Yapıştırıcı kalınlığının St-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri. 46

Şekil 2.9. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al bağlantıda üst plaka (Al) ön yüzeyinde, alt plaka (Al) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s). 49

Şekil 2.10. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-St bağlantıda üst plaka (St) ön yüzeyinde, alt plaka (Al) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s). 50

Şekil 2.11. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-Al bağlantıda üst plaka (Al) ön yüzeyinde, alt plaka (St) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s). 51

Şekil 2.12. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-St bağlantıda üst plaka (St) ön yüzeyinde, alt plaka (St) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s). 52

Şekil 2.13. St-St sandviç bindirme bağlantısında 14.68 J enerji seviyesi için üç farklı yapıştırıcı kalınlığında yapıştırıcı tabakasında oluşan hasar bölgeleri (Plaka boyutları mm, yapıştırıcı şekil değiştirme hasar değeri $\varepsilon^{hasar}_{Adh} = 0.1656$). 55

Şekil 3.1. Ceast marka Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı. 58

Şekil 3.2. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal plakaların hazırlanışı; a) Yapıştırılacak arayüzeyleri temizlenmiş 150×150×2 mm boyutlarında plakalar, b) Arayüzeyleri temizlenip sıvı parafin ile yağlanan baskı aparatı, c) Tabanca ve karıştırıcı ucu ile çift fazlı Araldite 2015 yapıştırıcının plakalar üzerine sıkılması, d) Yüzeye dağıtılacak yapıştırıcı. 60

Şekil 3.3. Yapıştırılmış metal bağlantıların darbe sonrası deformasyon yüzeylerinin üç boyutlu olarak çıkartılması. 63

Şekil 3.4. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantılar üzerinden ölçüm yapılan noktalar kümesinin (ızgara) şematik gösterimi, toplam 676 nokta. 64

Şekil 3.5. Üç boyutlu deformasyon yüzeyi taranırken kullanılan lazer sensör ve komparatörden elde edilen kalibrasyon eğrisi. 65

Şekil 3.6. Al-Al bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm). 67

Şekil 3.7. Al-St metal bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm). 68

Şekil 3.8. St-Al metal bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm). 69

Şekil 3.9. St-St metal bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm). 70

Şekil 3.10. Al-Al, Al-St, St-Al, St-St metal bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde elde edilen deneysel en büyük çökme miktarları. . . . 71

Şekil 3.11. Al-Al bağlantılarının üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi. 72

Şekil 3.12. Al-Al bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri. 74

Şekil 3.13. Al-St bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi. 75

Şekil 3.14. Al-St bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri. 76

Şekil 3.15. St-Al bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi. 77

Şekil 3.16. St-Al bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri. 78

Şekil 3.17. St-St plakaların bindirme bağlantılarının üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi. 79

Şekil 3.18. St-St bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri. 80

Şekil 3.19. Darbe sonrası Al-Al bağlantının makro kesit resimleri. 81

Şekil 3.20. Farklı enerji seviyelerinde darbe testi sonrası metal bağlantıların kesit resimleri. 82

Şekil 3.21. Elastikiyet bozunumu, a) Bozunumundan elde edilen plastik şekil değiştirme-elastiklik modülü ($\varepsilon^p - E$) eğrisi, b) Farklı bozunum parametrelerinin elastiklik modülünde tesiri. 87

Şekil 3.22. Deneysel, elastikiyet bozunumsuz ve farklı bozunum parametreleri sonucu teorik (ABAQUS®) temas kuvvetleri. 87

Şekil 4.1. Fiber takviyeli kompozit plakaların yapıştırılmasında kullanılan Araldite 2015'in gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrisi. 91

Şekil 4.2. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakalar için teorik model geometrisi. 92

Şekil 4.3. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakanın sonlu elemanlar modeli, a) Üstten görünüş, b) Yandan görünüş, c) Yapıştırıcı ve kompozit kesiti. 92

Şekil 4.4. Fiber açısının yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların üç farklı yapıştırıcı kalınlığında ($t_2 = 0.2$, 0.5, 1.0 mm) a) kinetik enerji, b) plastik kayıp enerji, c) temas kuvveti, d) yer değiştirme davranışları üzerine etkisi ($E = 10$ J). 97

Şekil 4.5. Fiber açısının yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların üç farklı yapıştırıcı kalınlığında ($t_2 = 0.2$, 0.5, 1.0 mm) a) kinetik enerji, b) plastik kayıp enerji, c) temas kuvveti, d) yer değiştirme davranışları üzerine etkisi ($E = 40$ J). 99

Şekil 4.6. Farklı fiber açılarında ($\alpha = 0^o$, 45^o, 90^o) ve farklı darbe enerjilerinde yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca 4 katmanında oluşan kalıcı hasar bölgeleri (yapıştırıcı tabakası boyutları $125 \times 75 \times 0.2$ mm). 101

Şekil 4.7. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 10$ J). 104

Şekil 4.8. Çekme altında Hashin 3B fiber hasar kriteri alanlarının $E = 10$ J, $E = 40$ J, $t_2 = 0.2$ mm, $\alpha = 0^o$ için bağlantı kalınlığı boyunca değişimi. 105

Şekil 4.9. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 40$ J). 106

Şekil 4.10. Çekme altında Hashin 3B matris hasar kriteri alanlarının $E = 10$ J, $E = 40$ J, $t_2 = 0.2$ mm, $\alpha = 0^o$ için bağlantı kalınlığı boyunca değişimi. 107

Şekil 4.11. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 10$ J). 110

Şekil 4.12. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 40$ J). 111

Şekil 4.13. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 10$ J). 112

Şekil 4.14. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 40$ J). 115

Şekil 5.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş $\alpha = 0^o$ ve 90^o fiber açılarına sahip kompozit plakaların resimleri. 117

Şekil 5.2. Epoksiye kalıplanan kompozit plaka ve parçalarına ayrılabilir kalıp. 118

Şekil 5.3. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 10 J enerjili darbe testi sonrası hasarlı ön ve arka yüzeylerinin fotoğrafları. 119

Şekil 5.4. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 23 J enerjili darbe testi sonrası hasarlı ön ve arka yüzeylerinin fotoğrafları. 120

Şekil 5.5. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 40 J enerjili darbe testi sonrası hasarlı ön ve arka yüzeylerinin fotoğrafları. 121

Şekil 5.6. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 23 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 90^o$. 122

Şekil 5.7. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 23 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 0^o$. 123

Şekil 5.8. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 40 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 0^o$. 123

Şekil 5.9. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 40 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 0^o$, 3 cm ofsetli. . 124

Şekil 5.10. Kompozit plakaların deneysel temas kuvveti değişimleri, a) $E = 10$ J, b) $E = 23$ J, c)$E = 40$ J, d) Fiber açısı $\alpha = 0^o$ için üç farklı enerji seviyesinde temas kuvvetlerinin değişimi. 125

Şekil 5.11. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların darbe davranışlarının deneysel ve teorik temas kuvvetlerinin kıyaslanması. 127

Şekil 6.1. Alt alüminyum plaka üst kompozit plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J). 131

Şekil 6.2. Alt kompozit plaka üst alüminyum plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J). 133

Şekil 6.3. Alt çelik plaka üst kompozit plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J). 134

Şekil 6.4. Alt kompozit plaka üst çelik plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J). 135

Şekil 6.5. Kesit görüntüleme işlemi için dörde bölünen kompozit-alüminyum bağlantı. 136

Şekil 6.6. Alüminyum-kompozit bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna paralel kesit görüntüsü. 137

Şekil 6.7. Alüminyum-kompozit bağlantının $\alpha = 90^o$ 'lik fiber doğrultusuna paralel ve dik kesit görüntüleri. 138

Şekil 6.8. Kompozit-alüminyum bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna dik kesit görüntüsü. 139

Şekil 6.9. Kompozit-alüminyum bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna dik kesit görüntüsü (ayrıntı). 140

Şekil 6.10. Kompozit-çelik bağlantının $\alpha = 0^o$ fiber doğrultusunda kesit görüntüsü (uzun kenardan kesit). 140

Şekil 6.11. Çelik-kompozit bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusunda kesit görüntüsü (uzun kenardan kesit). 141

Şekil 6.12. Kompozit ile metal plakaların bağlantılarında kompozit plakanın önde ya da arkada olmasının temas kuvveti üzerine etkileri. . . . 142

Şekil 6.13. Kompozit-metal ve metal-metal bağlantıların temas kuvvetleri bakımından kıyaslanması 144

GİRİŞ

Yapıştırıcı (*adhesive*), ASTM tarafından "yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde" olarak tanımlanmaktadır [1]. Yapıştırıcılar havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv gibi endüstriyel bir çok alanda kullanılmaktadır. Uçak sanayi, otomotiv sanayi, denizcilik ve makine parçaları gibi endüstriyel farklı uygulamalarda yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantılar görmek mümkündür [2–6]. Örneğin, Boeing 747 uçağının yüzey alanının %62'si yapıştırıcı kullanılarak birleştirildiği ve Lockheed C-5A uçağının 3250 m^2 yapıştırılmış yapıya sahip olduğu belirtilmektedir [7].

Endüstriyel yapıştırıcılardan a) birleştirilen malzemelerin yüzeylerini tamamen ıslatması, b) birleştirilecek malzemelerin yüzeyleri arasını dolduracak şekilde akıcı olması, c) istenilen yükü taşıyacak mukavemette yapıştırma bağını oluşturması beklenir.

Yapıştırıcılar *doğal yapıştırıcılar*, *elastomer(sentetik) yapıştırıcılar*, *termoplastik yapıştırıcılar* ve *termoset yapıştırıcılar* olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Termoset yapıştırıcılar en yüksek dayanımı sergiler. Organik ve inorganik doğal yapıştırıcılar düşük mukavemetli yapışma bağına sahiptirler. Bundan dolayı yük taşıyan yapı elemanlarının birleştirilmesinde termoset yapıştırıcılar tercih edilmektedir.

Birleştirme tiplerinin herbirinin avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Yapıştırıcı ile birleştirmenin avantajları

» Perçin ve somun-civata bağlantılarına göre oldukça hafif olması,

» Daha geniş yüzey ile düzenli gerilme/yük dağılımı sağlanması,

» Yapıştırıcı tabakasının ilaveten sızdırmazlık sağlaması,

» Somun-civata bağlantısında olduğu gibi plakalar üzerinde delik delme operasyonlarına ya da operasyona uğramış ek malzemelere ihtiyaç duyulmaması,

» Seri ve fason imalatlarda yapıştırıcı ile birleştirme oldukça ekonomik olması,

» Yumuşak ve gözenekli/delikli malzemelerin birleştirilmesinde etkin bir çözüm olması,

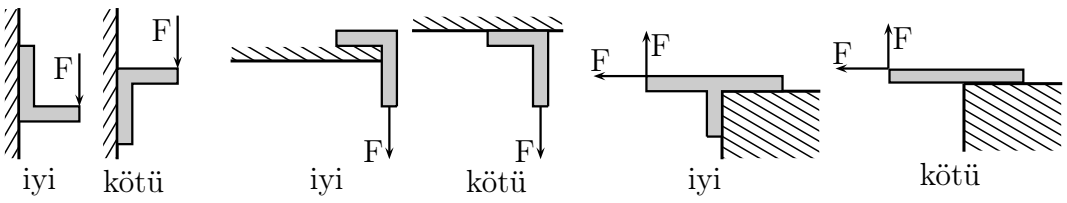
» Yapıştırıcının korozyona karşı direnç sağlaması,

» Yapıştırıcı ile farklı malzemeler birleştirilebilmesi,

» Daha iyi ısıl ve elektriksel yalıtım sağlanmasıdır.

Yükleme şartları, yapıştırıcı bağlantısının dayanımında etkindir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıda yapıştırıcı üzerinden taşınan gerilme için çekme gerilmesi yerine kayma gerilmesi şeklinde olması gerektiği belirtilmektedir. Yapıştırıcıların soyulma ve dilinme/ayrılma şartlarında zayıf kaldığı ifade edilmektedir [8]. Şekil G.1'de gösterilen tedbirler ile yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıda yapıştırıcının soyulma yüklerine karşı daha mukavemetli olması sağlanabilir. Dinamik yüklerde statik yükler kadar bağlantıların dayanımında önem arz eder.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantıları üzerinde gerilme dalgalarının etkilerini inceleyen Zachary ve Burger [9], tek bindirme bağlantısında gerilme dalgasınının ilerleyişini dinamik fotoelastisite yöntemi kullanarak incelemişlerdir.



Şekil G.1. Soyulma yüklerine karşı mukavemeti arttırıcı tedbirler.

Impulsif gerilme dalgasının yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirme bağlantısında yapıştırıcı ve bindirme bölgesi boyunca yayıldığını, fakat dalganın serbest kenarlara ulaşması ile aniden yönünün ve etkisinin değiştiğini tespit etmişlerdir.

Vaidya ve diğerleri [7], yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bindirme bağlantılarının düşey düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. LS-DYNA® sonlu elemanlar yazılımını kullanarak sayısal analizlerini gerçekleştirdikleri çalışmada, kompozit plakaların elastik ve yapıştırıcının elasto-plastik davranış gösterdiğini kabul etmişlerdir. Yapıştırıcıya uygun hasar modeli uygulayarak, hasarın başlaması ve ilerlemesini incelemişlerdir. Yapıştırıcıda hasarın başlaması ile tepki kuvvetinin ani düştüğünü, hasarın ilk olarak yapıştırıcı serbest kenarlarında oluştuğunu tespit etmişlerdir. Steeves ve Fleck [10], cam-epoksiden üretilmiş basit mesnetli sandviç kirişlerin statik üç nokta eğmeye karşı cevaplarını incelemişlerdir. Seramik yüzeylerin elastik kaldığı, metalik köpük özün plastik kabul edildiği analitik bir model geliştirip literatürdeki diğer modeller ile farkları irdelemişlerdir. Xu ve Rosakis [11], yaptıkları çalışmada kompozit sandviç kirişlerin $10 - 30$ m/s darbe hızlarında delaminasyon davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca düşük hızlı darbe altında sandviç yapıların hasar modlarını çalışmışlardır [12]. Sandviç yapıyı polimer bir öze sahip metal plakalara tutturmuşlardır. Hasar modlarının doğası ve oluşumunu yüksek hızlı fotoğraflama ve dinamik fotoelastisite yöntemleri yardımıyla değerlendirmiş ve kompleks hasar tiplerini gözlemlemişlerdir. Hasarın ilk olarak arayüzde ortaya çıktığını ifade etmişlerdir. Abrate bu alanda en kapsamlı çalışmaları bir kitapta toplamıştır [13].

Fuoss ve diğerleri tabaka dizilimlerinin kompozit plakaların darbe davranışı üzerine etkilerini ve de hasar tiplerinin tahminini çalışmışlardır [14, 15]. Boeing mboxBSS 7260 [16] standardına göre 152.4×101.6 mm (6.0 in×4.0 in) boyutlarındaki numuneler, 127×76.2 mm (5.0 in×3.0 in) toplam darbe alanı olacak şekilde dört kenarı basit mesnet görevi gören kauçuk kaplı sabitleyiciler ile tutturulmuştur. Deneysel çalışmanın yanısıra sonlu elemanlar analizlerinide NISA II FE yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir [17]. Sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla yaptıkları analizleri $15, 30, 45, 60, 75, 90^o$ fiber açılarında ve 5.4, 15.6, 19.2 J enerji seviyelerinde gerçekleştirmişlerdir. Farklı tabaka dizilimlerinin hasar modları üzerine etkileri

ve tabaka gruplarının darbe davranışını nasıl etkilediği konusunda önemli bilgiler sunmuşlardır. Choi ve Chang [18], kendileri tarafından öne sürülen ve Eşitlik 1'de verilen delaminasyon hasar kriteri ve Eşitlik 2'de verilen matris hasar kriterinin kullanıldığı sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla hasarları değerlendirmişlerdir. Sonlu elemanlar yönteminin hasar tahmininde uygun bir yöntem olduğunu, iç hasarların gerilme haline doğrudan bağlı olduğunu, ancak hasar başlamadan önce hasar ilerlemesinin gerilme halinden tahmin edilemediğini öne sürmüşlerdir.

$$D_a\left[\left(\frac{{}^{n}\bar{\tau}_{23}}{{}^{n}S_T}\right)^2+\left(\frac{{}^{n+1}\bar{\tau}_{13}}{{}^{n+1}S_L}\right)^2+\left(\frac{{}^{n+1}\bar{\sigma}_{13}}{{}^{n+1}Y}\right)^2\right]=e_D^2 \tag{1}$$

$$\begin{array}{lll} \text{eğer} & e_D \geq 1 & \text{hasar var} \\ \text{eğer} & \bar{\sigma}_{22} \geq 0 & {}^{n+1}Y = {}^{n+1}Y_T \\ \text{eğer} & \bar{\sigma}_{22} < 0 & {}^{n+1}Y = {}^{n+1}Y_c \end{array}$$

Burada D_a deneysel olarak tespit edilen bir sabit, n ve $n+1$ ilgili n inci arayüzeye komşu üst ve alt tabakaları temsil etmektedir.

$$\left(\frac{{}^{n}\bar{\sigma}_{22}}{{}^{n}Y}\right)^2+\left(\frac{{}^{n}\bar{\tau}_{23}}{{}^{n}S_T}\right)^2=e_M^2 \tag{2}$$

$$\begin{array}{llll} \text{Eğer} & e_M \geq 1 & \text{ise} & \text{hasar var} \\ \text{Eğer} & \bar{\sigma}_{22} \geq 0 & \text{ise} & {}^{n}Y = {}^{n}Y_T \\ \text{Eğer} & \bar{\sigma}_{22} < 0 & \text{ise} & {}^{n}Y = {}^{n}Y_C \end{array}$$

Burada Y_T ve Y_C sırasıyla tabakanın düşey çekme ve basma mukavemet değerleri, $\bar{\tau}_{23}$ ve $\bar{\sigma}_{22}$ sırasıyla tabakanın ortalama düşey kayma ve normal gerilmeleridir.

Tiberkak ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemi ile düşük hızlı darbe altında kompozit plakaların hasar tahmini üzerine bir çalışma yapmışlardır [19]. Mindlin plaka teorisine dayanan dokuz düğümlü Lagrangian elemanı ile farklı plaka sınır şartlarının, tabaka dizilimlerinin, boyutlarının, vurucu kütlesinin, vurucu hızının temas kuvveti ve merkezi çökmede tesirlerini incelemişlerdir. Sınır şartları olarak basit ve tamamen ankastre mesnet, tabaka dizilimi olarak $[0/90_n/0]$ ve $(n = 2, 3, 4)$, plaka boyutları olarak 150×150, 150×100 ve 150×50 mm, darbe hızı olarak 0.85, 1.6 ve 2.92 m/s son olarak vurucu kütlesi 1M, 2M ve 4M (M=0.157 kg) değerlerini

kullanmışlardır. Hasar tahmininde Choi ve Chang [18] tarafından önerilen delaminasyon (Eşitlik 1) ve matris kırılması (Eşitlik 2) kriterlerini kullanmışlardır.

Tiberkak ve diğerleri yaptıkları parametrik çalışmadan düşük boyutlara sahip plakada (150×50 mm) darbe hızından ve kütlesinden bağımsız olarak yüksek temas kuvvetlerinin oluştuğu, temas kuvvetlerinin ve merkezi çökmenin darbe hızı ve kütlesinin artması ile arttığı, fiber açısının 90^o olması ile laminanın rijitliğinin düştüğü, matris hasarının kayma gerilmesinin etkisi ile üst tabakada, kayma ve normal gerilmelerinin etkisi ile alt tabakada ortaya çıktığı ve dolayısı ile eğmeden ve kaymadan kaynaklanan iki tip matris hasarının oluştuğunu belirlemişlerdir [19]. Ayrıca, dinamik gerilme analizleri hasarın temas noktasından uzakta ortaya çıktığına işaret etmiştir.

Pang ve diğerleri [20] kompozit bindirme bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarını basit kütle-yay modeli ile incelemişlerdir. Kullandıkları sanki-statik model darbe davranışını zamana bağlı kuvvet ve bindirme bağlantısını eşdeğer direngenlikli bir eşdeğer kütle ile temsil eder. Ayrıca, bindirme bağlantısının eşdeğer direngenliği ve kütlesi için analitik bir model ortaya koymuşlardır. Yapıştırılmış iki plakanın temel denklemlerini oluştururken anizotropik tabakalı plaka teorisini kullanmışlardır. En büyük temas kuvvetinin yapıştırıcı kalınlığı ve darbe hızı ile etkilendiğini, darbe hızının doğrudan temas kuvvetine etki ettiğini tespit etmişlerdir. İnceledikleri yapıştırıcı kalınlıklarının da temas kuvvetinin en büyük değeri üzerinde kayda değer bir etkisi olduğunu göstermişlerdir. Ancak bindirme boyunun en büyük temas kuvveti üzerindeki önemsiz olduğunu belirtmişlerdir. Kütle-yay modelinin darbe sonrası oluşan gerilme dalgalarının hasar oluşturma ihtimalini tespitte yeterince zaman geçtikten sonra başarılı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Aslan ve diğerleri [21], düşük hızlı darbe altındaki $[0/90/0/90]_s$ yönlendirilmiş fiber takviyeli E-camı/epoksi kompozitlerin düzlem-içi boyutsal etkilerini incelemişlerdir. Kompozit malzemeler üretilmiş ve tüm mekanik özellikleri deneysel olarak tespit edilmiştir. 150×150, 150×100, 150×50 mm boyutlarındaki plakalar iki karşı kenarından ankastre olup diğer iki kenarı serbesttir. Deneylerde kullandıkları vurucu 135g ve 2600 g kütleye ve 3 m/s hıza sahiptir. Kütle değişiminin temas

kuvveti üzerinde önemli etkisi olduğunu ve azalan plaka genişliğinin temas süresini arttırdığını tespit etmişlerdir. En büyük temas kuvveti 150×100 mm'de tespit edilmiştir. Diğer iki modele göre 150×100 mm de en geniş delaminasyon alanı oluşmuştur.

Aktaş ve diğerleri [22], fiber takviyeli plastik esaslı tabakalı kompozit plakaların iki farklı tabaka dizilimi $[0/90/0/90]_s$ ve $[0/90/+45/\text{-}45]_s$ için farklı enerji seviyelerinde hasar tiplerini deneysel olarak incelemişlerdir. 509 g/m^2 E-glass takviye elemanı, CY225 epoksi ve HY225 sertleştirici kullanarak 15 MPa basınç ve 120 ^{o}C sıcaklıkta 2 saat bekleterek kompozit plakaları üretmişlerdir. Üretilen plakaların kalınlıkları 3 mm ve fiber hacim oranı %65 dir. 5.02 kg kütleli 22.4 kN kapasiteli Instron-Dynatup 9250 HV düşük hızlı darbe test cihazında D = 12.7 mm çapa sahip bir vurucu kullanmışlardır. Enerji-zaman değişim diyagramlarını ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerini farklı enerji seviyeleri için sunmuşlardır. Nüfuziyet eşiğinin belirlenmesinde artık enerjinin (E_e) darbe enerjisine (E_i) göre değişimi kullanılmış ve $[0/90/+45/\text{-}45]_s$ diziliminin nüfüziyet eşiğinin $[0/90/0/90]_s$ diziliminin nüfüziyet eşiğinden daha düşük olduğunu deneyler ile tespit etmişlerdir.

İçten ve diğerleri [23], düşük sıcaklığın tabakalı kompozit plakaların darbe davranışları üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyleri 5.02 kg darbe kütlesi, 12.7 mm'lik bir vurucu ve 5 ile 70 J arasında değişen darbe enerjileri altında 76.2 mm çaplı bir darbe alanı olan tamamen ankastre numuneler üzerinde 20, -20 ve -60 ^{o}C sıcaklıklarda gerçekleştirmişlerdir. Kalınlığı 3 mm ve tabaka dizilimleri $[0/90/+45/\text{-}45]_s$ olan kompozit plakaların darbe sonrası oluşan hasar alanlarını, farklı sıcaklıklarda ve farklı enerjiler için hesaplamışlardır. 20 J darbe enerjisine kadar tüm sıcaklıklarda darbe davranışı tüm plakalar için benzer çıkmıştır. Bu enerji seviyesine kadar oluşan hasar mekanizması matris kırılması, delaminasyon ve arka yüzey delaminasyonu olarak ortaya çıkmıştır. 20 J enerji seviyesinden sonra sıcaklığın etkisi darbe davranışında belirginleşmiştir ve ilk olarak fiber hasarı ortaya çıkmıştır. Sıcaklığın düşmesi ile delinme eşiği artmıştır.

Park ve Kim [24] kompozit bindirmelerin özellikle yüksek hız (83 m/s) darbe davranışları üzerine yaptıkları çalışmada, darbe enerjisini referans kabul edip, 200 J

ile 350 J arasında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Darbe bindirme bağlantısının üstüne fırlatılan buz küresi ile oluşturulmuştur. Darbe sonrası hasarın başladığı enerji eşiğinin tespiti ve hasar tiplerinin belirlenmesi amacıyla hasara uğramış bindirmelerin darbe sonrası hasar alanları ultrasonik tarama yöntemi ile incelenerek hasar alanları ölçülmüştür. Ayrıca darbe sonrası numunelerin kesitleri alınarak hasar bölgesi yeri mikroskop altında incelenerek belirlenmiştir. Yaptıkları deneylerde hasar eşiğinin üstünde gerçekleşen darbelerde hasar alanının darbe kinetik enerjisine göre değişiminin aniden arttığını ve kompozit plakalardaki delaminasyonların darbe temasının olduğu bölgeden uzak bindirme bölgesinin bitiminde başladığını tespit etmişlerdir. Hasarın özellikle belirli tabakalarda görüldüğünü ve delaminasyon gelişiminin tabakaların belirli bölgelerinde oluştuğunu kaydetmişlerdir. ABAQUS® ve LS-DYNA® sonlu elemanlar yazılımları ile yapılan sayısal çalışmalar tabakalarda oluşan delaminasyonların yüksek soyulma ve kayma gerilmelerinden kaynaklandığını göstermiştir.

Bir çok araştırmacı kompozit bindirmelerin farklı parametrelerinin daha önceden çalışılmış hasar davranışları üzerine etkilerini deneysel yöntemlerle araştırmışlardır [25–34]. Bu çalışmalarda dikkate alınan tipik parametreler kirlilik, abrezif aşınma gibi yüzey koşulları, birleşme yeri, bindirme kalınlığı, kompozitin yüzey tabaka açısı, tabakaların dizilimi, ortam etkileri v.b. gibidir. Bunanla birlikte, bindirme kompozitlerin hasar tahminleri üzerine gerçekleştirilen bir çok araştırma literatürde mevcuttur. Tek bindirme kompozitlerin hasar tahminleri üzerine yaptıkları çalışmada Kim ve diğerleri [34], yapıştırıcı için geliştirdikleri elastik-mükemmel plastik modeli ve delaminasyon hasar kriterini ihtiva eden bir yöntem ile tek bindirmeli kompozit plakaların hem kompozit plakalarında hem de yapışma arayüzeyinde hasar tahmini yapmışlardır. Hasar tahmini sonlu elemanlar analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcılar için en büyük gerilme değerlerini sayısal ve deneysel hesaplamış, kompozit plakaların en büyük gerilme değerlerini ise test numunelerinden tespit etmişlerdir. Hesapladıkları etkin en büyük gerilme değerinin yapıştırıcının en büyük gerilme değerinden %30 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Sonlu elemanlar metodu ile uyguladıkları

$$\sqrt{\frac{\sigma_{yy}^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{xy}^2}{S_{xy}^2}} \tag{3}$$

delaminasyon hasar kriterinden başarı elde etmişlerdir.

Qin ve Dzenis, çatlak ya da delaminasyon oluşmuş yapıştırıcı ile birleştirilmiş polimer kompozit bindirmelerin şekil değiştirme enerjisini geri verme oranını analiz etmek üzere bir model ortaya koymuşlardır [32]. Modellerini tek yönlü ve çapraz tabakalı kompozitler üzerinde uygulamışlar ve ortaya koydukları sayısal modeli yaptıkları deney sonuçları ile doğrulamışladır. Tüm analizlerde çatlak boyunun uzaması ile şekil değiştirme enerjisini geri verme oranının düştüğünü tespit etmişlerdir. Tek yönlü kompozit bindirme bağlantısına ait şekil değiştirme enerjisini geri verme oranının çapraz dizilimli bağlantılarınkinden daha düşük olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca tek yönlü ve de çapraz dizilimli kompozitlerde çatlak derinliğinin artması ile şekil değiştirme enerjisini geri verme oranı azalmıştır. Sayısal analizlere dayanan teorik tahminleri deneysel sonuçlar ile desteklemişlerdir.

Vurucu şeklinin kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları üzerine etkileri Mitrevski ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalarda incelenmiştir [35, 36]. Çalışmalarında 12 mm çapa sahip yarı küre, oval ve konik çelik darbe uçları kullanmışlardır. 215×215 mm boyutlarında ve ortalama 1.9 mm kalınlığa sahip 200 g/m^2 alansal yoğunluklu karbon fiber kullanmışlardır. Numunelerin efektif darbe alanı 140×140 mm ve dört kenarından ankastredir. Kullanılan numunelerin tabaka dizilimleri $[45/0/45/0]_s$ ve $[0/45/0/45]_s$ şeklindedir. I.tip numuneler 6 J, II.tip numuneler 4 J ve 6 J enerji altında toplam 42 düşük hızlı darbe testine tabii tutulmuştur. Şu sonuçlara erişmişlerdir:

a) Yerel deformasyondan dolayı en fazla enerji yutulması konik uç kullanılan darbe testlerinde, en büyük batma/nüfuziyet yine konik uç altında, b) en büyük temas kuvveti ve en kısa temas süresi yarıküre uç altında, c) hasar eşik yükünün darbe uçlarına göre büyükten küçüğe doğru sıralanırsa yarıküre, oval ve konik uç olarak gerçekleşmiştir. d) 6 J enerji seviyesinde arka yüzeylerde oluşan yüzey hasar mekanizması benzer iken, 4 J enerji seviyesinde değişkendir. Ancak ön yüzeyde oluşan yüzey hasarı tamamen farklıdır. e) 6 J enerji seviyesinde $[45/0/45/0]_s$ ve

$[0/45/0/45]_s$ dizilimlerin darbe davranışlarında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir.

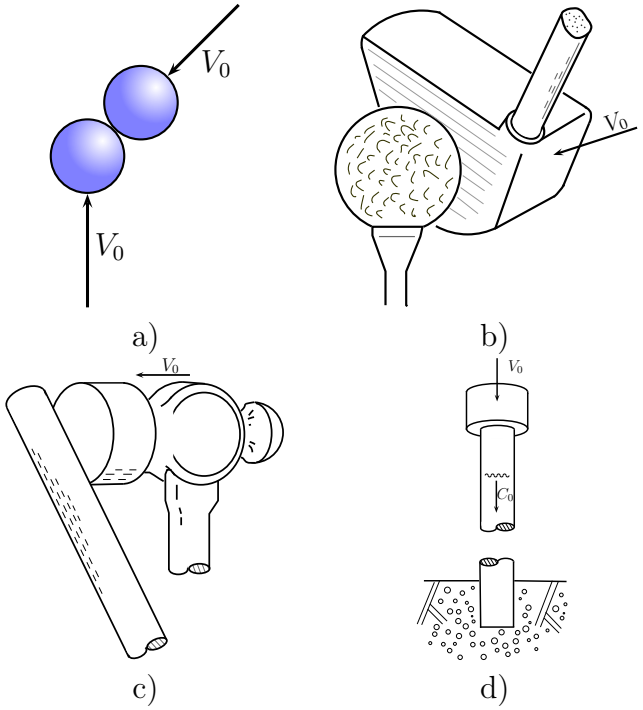
Düşük Hızlı Darbe

Çekiç çiviye vurduğunda ya da golf sopası topa çarptığında, iki cismin yüzeyleri bağıl bir hızla bir araya gelirler ve oluşan olay ilk çarpışma (*initial instant*) olarak adlandırılır. Daha sonra yüzeyler arasında girişim (*interference*) ya da nüfuziyet (*interpenetration*) meydana gelir. İki yüzey arasında meydana gelen küçük temas alanından dolayı oluşan arayüzey basıncının (*interface pressure*) sebebi girişim ya da nüfuziyet değil, temas süresince meydana gelen bölgesel deformasyon ve takip eden batmadır (*indentation*). Eğer temas eden cisimler deformasyona uğramıyor ise batma, yüzeyler arasındaki girişime eşittir.

Deformasyona neden olan ya da olmayan her iki tip darbe süresince temas basıncı, arayüzey bileşke kuvvetine ya da bileşke tepki kuvvetine sahiptir. Bu kuvvetler çarpışan cisimler üzerinde zıt yönde oluşurlar ve nüfuziyete karşı direnç gösterirler. Batmanın artması ile kuvvet artar ve cisimlerin birbirine girişim hızı azalır. Bazı darbe olaylarında temas kuvvetleri tarafından yapılan iş cisimlerin girişim hızlarını sıfırlamaya yeter ve oluşan sıkışmalar sonucu depolanan enerji temas sonrası cisimlerin birbirlerinden ayrılmasına ve belirli bir hıza ulaşmalarına sebep olur.

Darbe sırasında oluşan bölgesel deformasyonlar cisimlerin sertliklerine bağlı olduğu kadar temas sırasındaki hızlarına ve kütlelerine de bağlıdır. Hızları, kütleleri ve sertlikleri arttıkça oluşan bölgesel deformasyonlar artar. Düşük hızlı çarpışmalar sadece küçük deformasyonların oluşmasına sebep olur ve oluşan deformasyonlar temas yüzeyleri yanında ihmal edilebilir seviyededir. Yüksek hızlı çarpışmalarda oluşan deformasyonlar büyüktür ve rahatlıkla tespit edilebilirler. Bölgesel deformasyon, merminin hedef üzerinde yaptığı tahribat gibi temas yüzeyinden çok büyük olabilir.

Herbir darbe tipinin kendine özel analiz yöntemi ve çözüm adımları vardır. Dolayısıyla darbe analizlerinin yapılabilmesi için darbe tipinin sınıflandırılması gerekmektedir. Bu sınıflandırma yapılırken, çarpışma sırasında gelişen deformasyon, bu deformasyonun çarpışan cisimler üzerindeki dağılımı ve darbe süreci üzerine



Şekil G.2. Darbe tipleri: a) Parçacık darbesi, b) Rijit cisim darbesi (golf sopasının golf topuna vurması), c) Deforme olabilir cisimler üzerinde düşey deformasyon (çekiç ile uzun bir çubuğa yandan vurmak), d) Deforme olabilir cisimler üzerinde eksenel deformasyon (eksenel bir çubuğun ankastre bir çubuğa çarpması).

etkilerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Bu kapsamda darbe tipleri genel olarak dört ana başlık altında toplanabilir [37]:

1. Parçacık (partikül) darbesi.

2. Rijit cisim darbesi.

3. Esnek cisimler üzerine düşey darbe (düşey dalga yayılımı veya titreşim).

4. Esnek cisimler üzerine eksenel darbe (boyuna dalga yayılımı).

Parçacık darbesi küçük boyutlu parçacıkların özellikle Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD-Chemical Vapor Deposition)/Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD-Physical Vapor Deposition) gibi yöntemlerle kaplanmış yüzeylere yüksek hızlarda çarpması ile gerçekleşen darbe tipidir (Şekil G.2-a). Parçacık darbesine verilebilecek diğer bir örnek ise kumlamadır. Kumlama, döküm yoluyla üretilmiş parçaların yüzeylerindeki döküm artıklarını ve çapaklarını almak, yüzeyini temizlemek ve

yüzeyinde toklaştırılmış bir tabaka oluşturmak amacı ile aşındırıcı olarak kum tanelerinin dökülmüş parçaların üzerine yüksek hızlarda çarptırılmasıdır.

Golf sopası ve golf topunun oldukça rijit yapıldığını ve darbe sonrası deformasyona uğramadığını kabul ederek "rijit cisim darbesine" örnek olarak verebiliriz (Şekil G.2-b). Rijit cisim darbesine vuruntulu çalışan bir bilyalı rulman da örnek olarak verilebilir. Rulman malzemesi ve bilyasının oldukça yüksek sertliklere sahip oldukları düşünüldüğünde rijit olarak kabul edilebilir ve darbe sonrasında deformasyona uğramadıkları varsayılabilir. Kalınlığı boyunca darbe kuvvetine maruz kalan yeterince uzun bir esnek malzeme ise üçüncü darbe tipi olan "esnek cisimler üzerine düşey darbe" tipine örnek olarak verilebilir. Araba kaportası üzerine sert bir cismin düşmesi (çekiç, somun, tornavida, v.b.), uzun bir çubuk ya da plakaya çekiç ile vurulması verilebilecek örneklerdendir (Şekil G.2-c). Dördüncü darbe tipi olan "esnek cisimler üzerine eksenel darbeye" çekiç ile çiviye vurmak, ya da inşaat temeli atılmadan önce zeminin mukavemetini ve yere tutunmasını artırmak için çakılan fore kazıklar örnek verilebilir (Şekil G.2-d).

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli olan en uygun davranışı göstermesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşılık darbeye karşı olan davranış da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda malzemenin darbeye karşı davranışı, elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez. Çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı büyük miktarda enerjiyi yutabilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapısı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler. Bu nedenle oluşacak kopmalar ani veya beklenmedik değildir. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arası ayrılma) şeklinde başlayabilir. Bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme

sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik tiplerde hasara uğrayabilirler ve bu hasar tiplerinde parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik esaslı kompozit malzemeler genel olarak kırılgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması, v.b.) sayesinde yutabilirler, diğer bir değişle enerjiyi depolamada plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder. Tabakalı kompozit malzemede, kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı en doğrultusunda oluşacaktır. Bunun en önemli nedeni birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nisbeten zayıftır. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar tiplerini belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir [38].

Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat aralarında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bir kısım çalışma düşük hızlı darbeyi, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [39, 40]. Düşük hızlı darbeye en basit örnek kompozit malzeme üzerine imalat veya bakım esnasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi verilebilir. Düşük hızlı darbeler genelde çarpma anında malzeme iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da isimlendirilir. Düşük hızlı darbede, malzemenin iç yapısının darbeye cevap verebilmesi için gerekli olan temas süresi yeterince uzundur ve daha fazla enerji elastik olarak depolanır. Bu nedenle hedefin dinamik yapısal cevabı büyük bir anlam kazanır. Yüksek hızlı darbe cevabı malzeme boyunca yayılan gerilme dalgasına teslim olur ki, malzeme darbeye karşı cevap verebilecek yeterli zamana

sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur [38]. Cantwell ve Morton, kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek icin Charpy ve Izod gibi bilinen darbe deneylerini kullanmışlar ve düşük hızı 10 m/s'ye kadar olan hızlar olarak sınıflandırmışlardır [41]. Bununla birlikte Abrate, tabakalı kompozit malzemelerde darbe ile ilgili yapmış olduğu çalışmalarda düşük hızlı darbeleri 100 m/s'den düşük hızlarda oluşan darbeler olarak belirlemiştir [42]. Darbe türünün, darbe hız sınırını belirleyerek tespit edilmeye çaba gösterildiği bu çalışmaların yanı sıra sınıflandırmanın darbe sonucunda meydana gelen hasara göre yapılması gerektiği görüşü de savunulmaktadır. Bu nedenle yüksek hız, delinme şeklinde meydana gelmiş fiber kopması, düşük hız ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve matris kırılması ile belirlenir. Davies ve Robinson düşük hızlı darbeyi kalınlık boyunca gerilme dalgasının gerilme dağılımında önemli bir rolü olmadığı bir darbe türü olduğunu belirtmekte ve yüksek hıza geçişi veren bir model önermektedir [43].

Radice ve Vinson [44] yaptıkları bir çalışmada asimetrik alt tabaka, anizotropi, kalınlık değişimi, enine kayma deformasyonu, hidrotermal büyüme gibi yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar için çok önemli olan parametrelerin sanki-dinamik modeline çözüm yöntemi sunmuşlardır. Yapıştırılmış plakaların kayma direngenliğinin düşmesi ile yapıştırıcı tabakasında en büyük gerilme değerinin düştüğünü ve asimetrik yapıştırılmış plakaların, yapıştırıcının soyulma gerilmesinde düşüşe sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Kihara ve diğerleri [45], darbe yükü altındaki yapıştırıcı tabakasının kayma mukavemetini ölçmüşlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların çatlak davranışlarının ani gerilme dalgasının şiddetine bağlı olduğunu dolayısı ile ani yüksek gerilmede kayma ve basma gerilmelerinin birleşik etkisi ile yapıştırıcı tabakanın çatladığı, ani düşük gerilmede ise çekme gerilmesi etkisi ile çatlak oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca ani düşük gerilme etkisinin birleştirme bağlantısında da çatlak oluşumuna sebep olduğu ifade edilmektedir.

Sarkaç testi, düşen kütle testi (darbe testi) ve Split Hopkinson Bar testi yapıştırıcı ile birleştirmenin darbe altında mekanik özelliklerini tespit etmede sıklıkla kullanılan test yöntemleridir [46–48]. Harris ve Adams [48], çentik darbe testi kullanarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirme bağlantısının darbe mukavemetini öçlmüşlerdir. Ayrıca, Adams ve Harris [49], darbenin oluşturduğu

çekiç ile blok arasında temas yüzeyindeki belirsizliklerin karmaşık dinamik etkileri ve gerilme durumunda belirsizliklere sebebiyet verdiğini göstermişlerdir. Goglio ve Rossetto [50], darbe altında farklı bindirme boylarında ve yapıştırıcı kalınlıklarında çelik bindirme bağlantılarının kayma davranışlarını yapıştırıcının farklı soyulma ve kayma kombinasyonları için incelemişlerdir. Dinamik yükleme ve statik yükleme durumlarında yapıştırıcı mukavemetini kıyasladıklarında, dinamik yüklemede yapıştırıcı mukavemetinin daha yüksek olduğu ve ince yapıştırıcı tabakasının daha yüksek mukavemet sağladığını gözlemlemişlerdir.

1. BÖLÜM

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ METAL BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

1.1. Motivasyon

Bu bölümde yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı ya da farklı malzemelerden üretilmiş plakaların düşük hızlı darbe davranışları üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar modeli kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan alt ve üst plaka malzemeleri alüminyum (Al), çelik (St) olmak üzere, Al-Al, St-Al, Al-St ve St-St olarak seçilmiştir. Darbe süresince oluşan temas kuvvetleri, kinetik enerji değişimleri ve plastik kayıp enerjisi değişimleri farklı vurucu kütlesi, yarıçapı ve hızı için incelenmiştir.

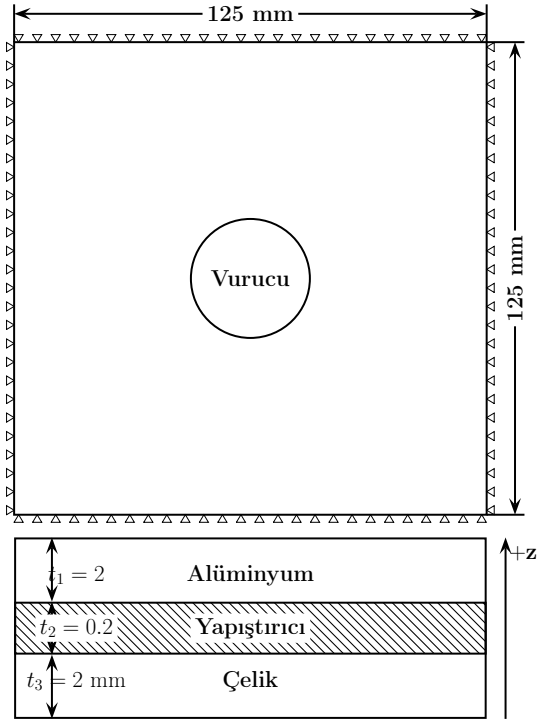
Yapıştırıcı ile birleştirme tekniği aynı ve farklı malzemelerden üretilmiş plakaların birleştirilmesinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Literatürde yapıştırma mekanizmaları ve farklı bindirme tiplerinin mekanik davranışları ayrıntılı incelenmiştir. Yapıştırıcı bağlantılarının statik yükler altında gerilme ve deformasyon davranışları bir çok çalışmada incelenmiştir. Günümüz yapıştırıcı teknolojisi dinamik yükler altında yüksek mukavemet gösteren yapıştırıcıların tasarımlarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Kullanılan yapıştırıcılar ile kısa süreli darbe ve harmonik yükler altında bağlantılar güvenli bir şekilde yükü taşımaktadır. Mühendislikte kullanılan malzemelerin kısa zaman aralığında etki eden dinamik yükler altında davranışları farklılıklar göstermektedir. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinden en iyi dinamik mukavemeti elde edebilmek için darbe sonrası oluşan ve dinamik yüklerden kaynaklanan gerilme dalgalarının yapıştırıcı ve plaka kalınlıkları boyunca yayılımı, dinamik yük altında yapıştırıcı yorulması ve dinamik oluşan yapıştırıcı hasarının tespiti büyük önem kazanmaktadır.

Tabakalı yapılar genellikle özdeş iki plakadan oluşurlar. Her biri düzlem içi ve yanal yükleri taşıyabilecek şekilde tasarlanırlar. Özel durum olarak plakaların kalınlıkları, malzemesi ya da her ikisi farklılık gösterebilir. Örneğin plakanın biri ısı yalıtımına uygun malzemeden tercih edilirken diğeri yanal yükleri taşıması için daha mukavemetli malzemeden seçilmiş olabilir. Sistemin ağırlığını azaltmak için plakanın birinin kalınlığı düşürülürken, diğerinin korozyon gibi dış etkenlere karşı dirençli olması istenebilir [51].

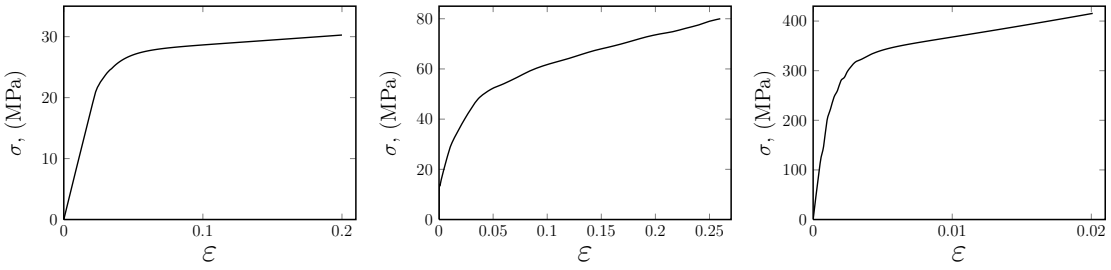
Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, ses izolasyonu, ısı yalıtımı ve kolay montaj gibi avantajlarından dolayı tabakalı yapılar uzay, havacılık, otomotiv ve inşaat sanayiinde bir çok uygulama alanı bulmuştur. Son yıllarda farklı metal plakaların birleştirilmesi ile elde edilen tabakalı yapılar farklı malzemelerin avantajlarını bir arada barındırdığı için önem kazanmaktadır. Metal plakaların birbirlerine birleştirilmesinde kullanılan kaynak, punta, perçin, civata-somun, yapıştırma gibi bir çok yöntem mevcuttur. Metal plakaların farklı malzemelerden oluşması kaynak gibi birleştirme yöntemlerinin kullanımını kısıtlamaktadır. Kullanılan metal plakaların birleştirilmesi sırasında mekanik ve ısıl deformasyonlara uğramaması (delme, kaynak, vb.), farklı malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcı ile birleştirme daha etkin olmaktadır. Yapısal yapıştırıcılar günümüz klasik bağlantı elemanları (somun, perçin v.b.) yerine tercih edilmektedir. Çünkü çok daha hafiftirler ve gerilmenin bindirme boyunca daha düzenli dağılmasını sağlarmaktadır [52].

1.2. Teorik Model

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı ya da farklı malzemelerden üretilmiş plakaların düşük hızlı darbe davranışları üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak incelenmiştir. Alüminyum ve çelik malzemelerden üretilmiş kare 125×125 mm boyutlarındaki plakalar Araldite 2015 yapıştırıcı ile birleştirilmişlerdir. Analizleri gerçekleştirilen aynı malzemeden (Al-Al, St-St) üretilmiş plakaların ve farklı malzemeden (Al-St, St-Al) üretilmiş plakaların kalınlıkları ve de yapıştırıcı kalınlıkları sırasıyla $t_1 = t_3 = 2$ mm ve $t_2 = 0.2$ mm dir. Teorik modelin geometrik boyutları Şekil-1.1'de verilmiştir. Bağlantılarda ilk malzeme alt ikinci malzeme üst plakayı ifade etmektedir.

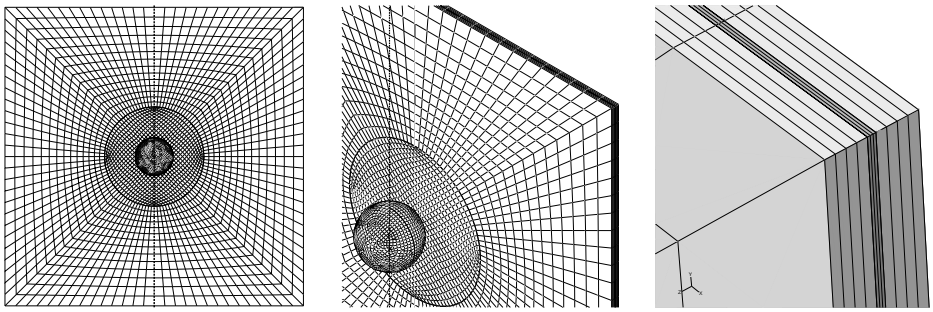


Şekil 1.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik-alüminyum (St-Al) plakalar için teorik model geometrisi.



a) Yapıştırıcı (Araldite-2015) b) Alüminyum 2024-T0 c) Çelik - 304

Şekil 1.2. Metal bindirmeleri oluşturan metallerin ve yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrileri.



Şekil 1.3. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı ya da farklı malzemelerden üretilmiş plakaların ABAQUS® sonlu elemanlar programı kullanılarak hazırlanmış modeli.

ABAQUS® Explicit (6.8) sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı ve plakaların elasto-plastik malzeme davranışları çekme deneylerinden elde edilen veriler ile modellenmiştir (Şekil-1.2). Yapıştırıcı ve plakaların modellenmesinde üç boyutlu ve üç serbestlik dereceli sonlu eleman malzeme tipi (C3D8R) kullanılmıştır. Plakalar ve yapıştırıcı kalınlıkları, yüksek geometri bozulmasının sayısal analizlerde hatalara neden olması nedeniyle ençok üç elemana bölünmüştür. Vurucunun temas ettiği orta bölge yüksek doğrusal olmayan temas şartlarından dolayı ortaya çıkabilecek sayısal hataları en aza indirmek için yapıştırıcı ve plakalarda temas bölgesinde daha sık bir eleman ağı kullanılmıştır (Şekil-1.3).

Yapıştırıcı kalınlığının plaka kalınlıklarına göre oldukça küçük olduğu göz önünde bulundurulursa, yapıştırıcı tabakasında meydana gelebilecek sayısal hataları ve tesirlerini önlemek için yapıştırıcı ve plakalarda ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımında mevcut bulunan adaptif ağ (*mesh*) tekniği ve de Arbitrary Lagrangian and Eulerian Algorithm kullanılmıştır. Bu algoritma plakalarda veya yapıştırıcıda yüksek deformasyonlar tespit edilidiğinde eleman sayısı ve düğüm sayısı değiştirilmeden yeni düzenli eleman ağ yapısını, sayısal hatalar kabul edilebilir bir seviyeye düşürülünceye kadar yapıştırıcı ve plakalarda düzenler. Başarılı olunca yeni bir yük arttırımına (iterasyona) geçilir. Adaptif eleman ağ tekniği hesaplamalara ek yük getirmektedir, ancak sayısal analizlerde daha doğruluk ve güvenirlik kazandırmaktadır. Adaptif eleman ağ tekniği kullanılmadığı zaman yüksek deformasyonlardan dolayı sayısal hatalar belirğinleşmektedir. Şöyle ki, bazı problem şartlarında yazılım çözüme ulaşamamaktadır. Vurucu sayısal modelde Analitik Rijit olarak eleman kütüphanesinden S4R8 kabuk eleman kullanılarak modellenmiştir. Vurucunun kütlesi ve hızı, vurucu modelinin merkezine yerleştirilen bir yapay referans noktası üzerine tatbik edilmiştir.

Vurucu ile plakalar arasında sürtünmesiz genel temas (General Contact) tariflenmiştir. Plakalar ve yapıştırıcı tabakası dört kenarından ankastre sınır şartına zorlanmıştır. Vurucu düzlem içi x ve y koordinatlarında hareket edemez iken, z yönünde hareket edebilmektedir ve x,y,z eksenleri etrafında dönme serbestliği engellenmiştir. Yapılan ön analizlerde düşük hızlı darbenin toplam temas süresi

Tablo 1.1. Farklı vurucu yarıçapı, kütlesi ve hızı için düşük hızlı darbe test parametreleri.

	Vurucu			Darbe enerjisi E, J
	hız v, m/s	kütle m, kg	yarıçap r, mm	
1a	3.3	4.5	8.0	25
1b	3.3	4.5	12.5	25
2a	3.3	7.35	8.0	40
2b	3.3	7.35	12.5	40
1	2.0	3.0	12.5	6
2	3.3	3.0	12.5	16
3	3.3	4.5	12.5	25
4	3.3	7.35	12.5	40

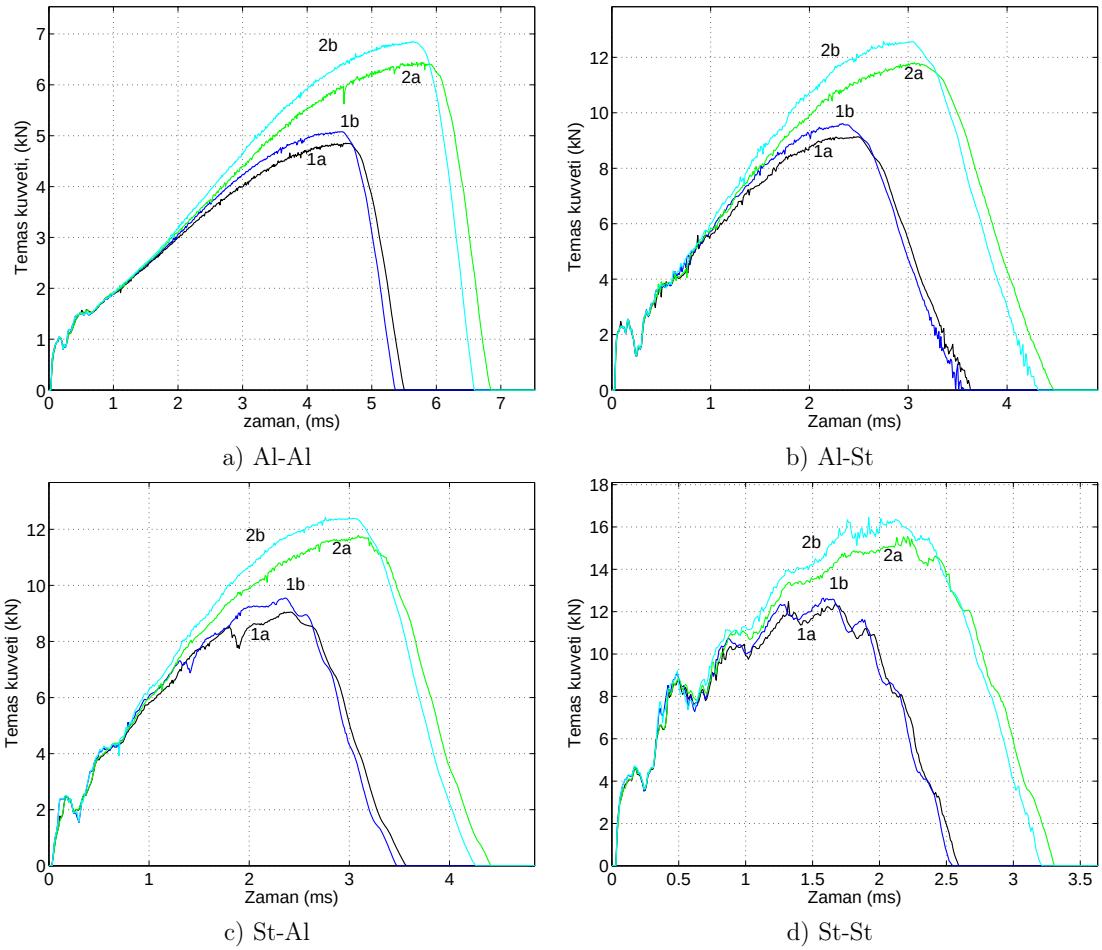
10 ms değerini geçmediği görülmüştür ve takip eden analiz toplam süresi 10 ms olarak dikkate alınmıştır.

1.3. Düşük Hızlı Darbe Analizi ve Sonuçlar

Bu bölüm yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı ya da farklı malzemelerden üretilmiş metal plakaların düşük hızlı darbe davranışının üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile analizini kapsar. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı tip malzemeden (Al-Al, St-St) üretilmiş plaka ile farklı tip malzemeden (Al-St, St-Al) üretilmiş plakalar farklı vurucu kütlesi, yarıçapı ve hızı değerleri için düşük hızlı darbe testi sonrası ve sürecinde temas kuvveti, plastik kayıp enerji ve kinetik enerjinin değişimi incelenmiştir. Kullanılan vurucu yarıçapları r=8 ve 12.5 mm, vurucu kütleleri $m = 3$, 4.5 ve 7.35 kg, vurucu hızları ise 2 ve 3.3 m/s şeklinde olup, ilgili kütle ve hızlar için darbe enerjileri sırasıyla $E = 6$, 16, 25 ve 40 J dür.

ABAQUS® yazılımı ile darbe analizleri gerçekleştirilen yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların tabi olduğu farklı şartlar, yani vurucu yarıçapı, kütlesi ve hızı ile ilgili değerler Tablo-1.1'de verilmiştir.

İlk olarak vurucu yarıçapının düşük hızlı darbe sonrası davranışlara etkisi incelenmiştir. Seçilen vurucu yarıçaplarının $r = 8$ ve 12.5 mm, darbe davranışlarına etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.4). Bu nedenle sabit vurucu yarıçapı $r = 12.5$ mm kullanılarak diğer parametrelerin darbe



Şekil 1.4. Vurucu yarıçapının r yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların darbe davranışları üzerine etkileri, a) Al-Al, b) Al-St, c) St-Al ve d) St-St, ((1a) $\rightarrow E = 25$ J, $r = 8$ mm, (1b) $\rightarrow E = 25$ J, $r = 12.5$ mm, (2a) $\rightarrow E = 40$ J, $r = 8$ mm, (2b) $\rightarrow E = 40$ J, $r = 12.5$ mm, değerler için Tablo 1.1)

davranışları üzerine etkileri incelenmiştir.

Vurucu yarıçapının r yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların temas kuvveti üzerine etkileri dört farklı metal (Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St) bağlantıda, iki farklı enerji seviyesinde ($E = 25$ ve $E = 40$ J) Şekil 1.4'te görülmektedir. Al-Al bağlantıda her iki enerji seviyesinde ve her iki vurucu yarıçapı için temas kuvveti düzenli olarak zirveye ulaşmakta ve vurucu bağlantıdan ayrıldıktan sonra ani bir şekilde düşmektedir (Şekil 1.4-a). $E = 25$ J için tepe noktası olan en büyük temas kuvveti değeri 4.8 kN'a 4.6 ms süresinde ulaşılmış, $1 - 1.2$ ms gibi kısa bir sürede vurucu plakalar ile temasını kesmiştir. Vurucu yarıçapının $r = 8$ mm'den (Şekil 1.4-a, (1a))

12.5 mm'ye (Şekil 1.4-a, (1b)) çıkması en yüksek temas kuvveti değerini ihmal edilecek kadar artırarak 4.8 kN'dan 5.05 kN'a çıkartmıştır ve toplam temas süresini aynı şekilde ihmal edilecek kadar kısaltmıştır. Yüksek enerji seviyesi $E = 40$ J'e maruz Al-Al bağlantı için vurucu temas kuvvetinin zamana göre değişimine etkisi Şekil 1.4-a'da (2a) ve (2b) ile temsil edilmektedir. Temas kuvveti en büyük değeri $r = 8$ mm için 6.4 kN ve $r = 12.5$ mm için 6.8 kN değerine düzenli olarak sırasıyla 6 ms ve 5.7 ms'de ulaşmıştır. Darbe enerjisinin 1.6 kat artması oluşan temas kuvvetlerinin en büyük değerlerinde %36 artışa sebep olmuştur. Yine yüksek enerji seviyesinde vurucu yarıçapının artması temas kuvvetlerinde ihmal edilebilir etkiye sahiptir.

Şekil 1.4-b'de üst St plaka alt Al plakanın olduğu yapıştırıcı ile birleştirildiği metal bağlantıda ortaya çıkan temas kuvveti üzerinde darbe enerjisinin ve vurucu yarıçapının etkileri görülmektedir. Vurucu yarıçapının $r = 8$ mm'den $r = 12.5$ mm'ye artması ihmal edilebilir etkiye sahiptir. Enerjinin artması temas kuvvetlerinde belirgin artışlara neden olmuştur. Temas kuvveti, düşük enerji seviyesinde en yüksek değerine 2.5 ms zaman zarfında ulaşırken, yüksek enerji seviyesinde en yüksek değerine ulaşması 3 ms sürmüştür. Düşük enerji seviyesinde en büyük temas kuvveti 9 kN olarak gerçekleşirken, $E = 40$ J enerji seviyesinde 12.1 kN olarak ortaya çıkmaktadır. Temas kuvveti zirveden sonra vurucu Al-Al bağlantısına göre daha uzun zamanda teması kesmiştir. Teması kesme süreleri yaklaşık $1.5 - 2$ ms arasında gerçekleşmiştir. St-Al bağlantıda temas kuvveti zaman değişiminde nüfuziyet sürecinde Al-Al bağlantısına göre nispi düzensizlikler ortaya çıkmaktadır. Bağlantıda çelik plakanın olması rijitliği artırmış, elastik olarak depolanan enerjinin artmasına sebep olmuştur. Elastik olarak depolanan enerji bağlantının ilk haline dönme eğilimini artırmış ve vurucuya doğru bağlantı tarafından gösterilen tepkiyi artırmıştır. Vurucu tarafından deforme olmaya zorlanan bağlantı buna karşın elastik olarak depoladığı enerji vasıtasıyla ilk halini alma eğilimi temas kuvvetleri üzerinde düzensizliklerin nedeni olmuştur.

Üst plakanın çelik, alt plakanın alüminyum olduğu Al-St bağlantı St-Al bağlantı ile temas kuvvetleri bakımından benzer karakteristik gösterdiği Şekil 1.4-c'de görülmektedir. Oluşan en büyük temas kuvvetleri, toplam temas süreleri, zirveye

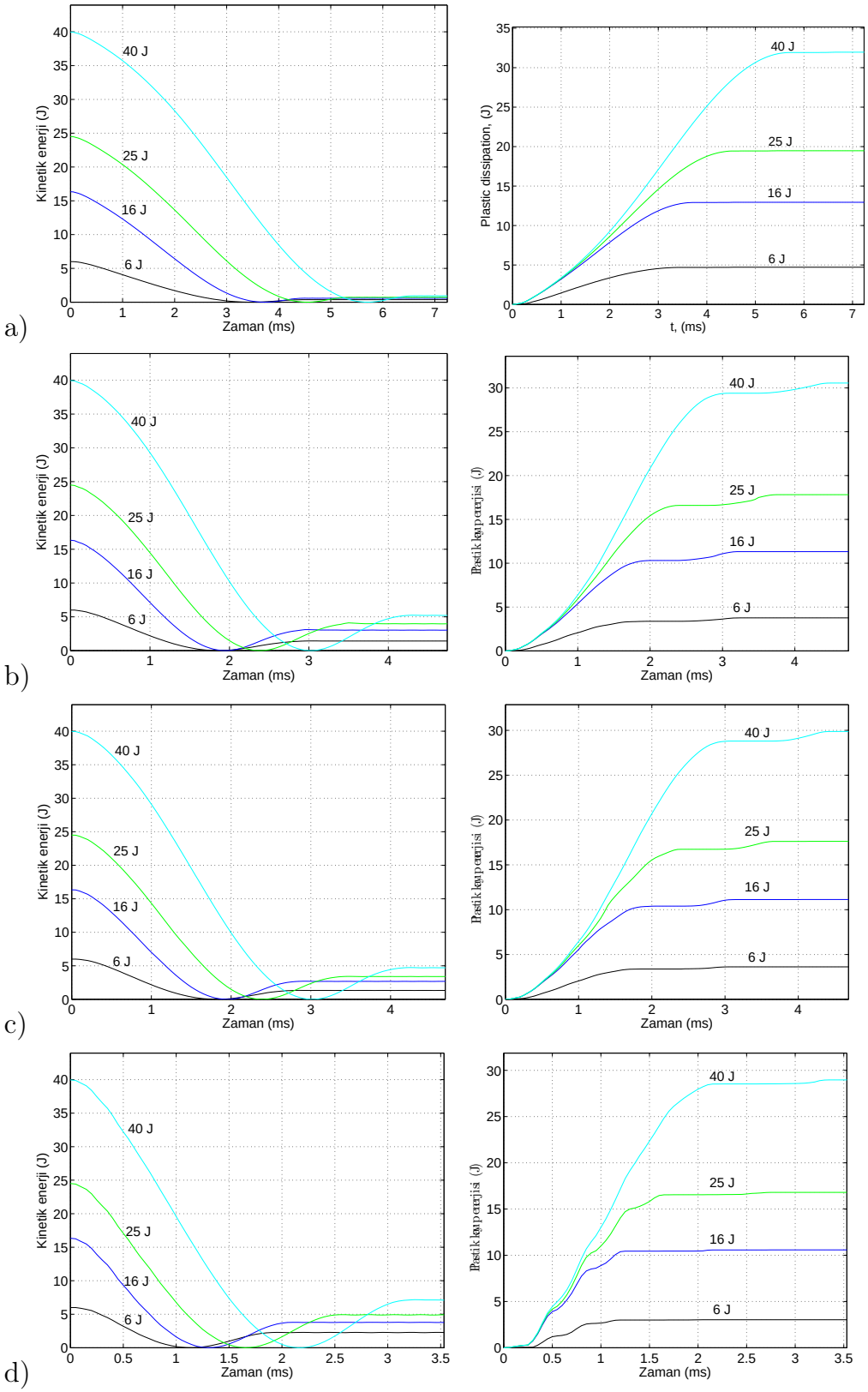
ulaşma süresi ve vurucunun plakalar ile teması kesme süreci değerlendirildiğinde her iki bağlantı davranışı biribirine oldukça benzemektedir.

St-St bağlantı, en büyük temas kuvvetlerine neden olan bağlantı tipidir (Şekil 1.4-d). $E = 25$ J düşük enerji seviyesinde oluşan en büyük temas kuvveti 12 kN, $E = 40$ J yüksek enerji seviyesinde oluşan en büyük temas kuvveti ise %33 artarak 16 kN olmuştur. Toplam darbe süresi diğer üç bağlantıya göre daha düşüktür ve düşük ve yüksek enerji seviyeleri için sırasıyla 2.5 ms, 3.2 ms olarak gerçekleşmiştir. Temas kuvvetinin zamana göre değişimleri diğer üç bağlantı ile karşılaştırıldığında, St-St bağlantı temas kuvvetinde en düzensiz değişimlere neden olmaktadır.

Şekil 1.4 vurucu yarıçapının temas kuvveti üzerine etkilerini ifade eder. Vurucu yarıçapının $r = 8$ mm'den 12.5 mm'ye büyümesinin darbe davranışları üzerinde ihmal edilebilecek etkiye sahiptir. Bu nedenle takip eden analizlerde vurucu yarıçapı 12.5 mm olarak sabit tutulmuştur.

Dört farklı enerji seviyesi $E = 6$, $E = 16$, $E = 25$ ve $E = 40$ J için yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St plakalardan oluşan bağlantıların düşük hızlı darbe sonrası davranışları analiz edilmiştir. Şekil 1.5'de $E = 6$, $E = 16$, $E = 25$ ve $E = 40$ J'lük dört farklı darbe enerji seviyesinde Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St bağlantılarının düşük hızlı darbe sürecinde kinetik enerji ve plastik kayıp enerji-zaman değişimlerini göstermektedir.

Al-Al bağlantıda (Şekil 1.5-a) kinetik enerjinin zamana göre değişimi artan darbe enerjisi ile kinetik enerjinin sönümlenmesi için gerekli sürenin, ya da en büyük nüfuziyete ulaşma zamanının arttığını göstermektedir. Düşükten yükseğe $(6 - 40J)$ enerji seviyeleri için sırasıyla en büyük çökmeye ulaşma zamanı 3.3, 3.6, 4.5 ve 5.6 ms olarak gerçekleşmiştir. Kinetik enerji özellikle kalıcı deformasyonlara harcanmıştır. Al-Al plakaların kullanıldığı bağlantıda darbe enerjisi $E = 6$ J için 4.9 J, $E = 16$ J için 13 J, $E = 25$ J için 19.4 J ve $E = 40$ J için 32.5 J enerjinin kalıcı deformasyonlara harcandığı Şekil 1.5-a'da plastik kayıp enerjisinin zamana göre değişimi grafiğinden görülmektedir. Kalıcı deformasyonlara harcanan enerji değişimleri vurucunun geri dönüşü yani plakalardan ayrılması ile düz sabit kalmaktadır. Farklı enerji seviyelerinde düşükten yüksek enerji seviyesine doğru



Şekil 1.5. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş a) Al-Al, b) Al-St, c) St-Al ve d) St-St bağlantılar için farklı enerji seviyelerinde $E = 6$, 16, 25 ve 40 J kinetik enerji ve plastik kayıp enerjisinin zamana göre değişimleri.

darbe enerjisinin kalıcı deformasyonlara harcanma oranları sırasıyla, %81.5, %81.3, %79.2 ve %81.3 olarak gerçekleşmiştir. Farklı enerji seviyelerinde Al-Al bağlantıda meydan gelen plastik enerji kayıpları yaklaşık %80 civarındadır.

Al-St bağlantılarında darbe süresince kinetik enerji ve plastik kayıp enerjisi değişimleri Şekil 1.5-b'de görülmektedir. Farklı enerji seviyelerine ait kinetik enerjilerin yutulma süreleri, Al-Al bağlantısına göre daha kısadır. Darbe enerjisinin artması ile vurucunun nüfuziyet zamanı artmış, plakaların darbe enerjisini kalıcı deformasyonlara dönüştürme süresi uzamıştır. Şekil 1.5-b kinetik enerji-zaman grafiklerinden düşük enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine doğru vurucunun en büyük nüfuziyete ulaşma süresi sırasıyla 1.8, 2.0, 2.4 ve 3.0 ms olarak gerçekleştiği görülmektedir. Üst plakanın St olması ve St plakanın üzerine daha fazla elastik enerji depolayabilmesinden dolayı Al-St bağlantıda kalıcı deformasyonlara harcanan enerji değerlerinde Al-Al plakaların bağlantılarına göre azalma olmuştur. Kalıcı deformasyon vurucunun geri dönüşünde az bir enerji harcanarak devam etmiştir. Darbe süresince temas kuvvetlerinin zamana göre değişimleri, Al-Al bağlantıda vurucunun geri dönüşünde plakalar ile teması aniden kestiğini, plakalardan en az birinin St olduğu diğer üç bağlantıda (Al-St, St-Al ve St-St) plakalar ile teması aniden kesmediğini, dönüş sırasında plakalar ile temas halinde olduğuna işaret etmektedir (Şekil 1.6). Dolayısı ile Al-Al bağlantıda vurucunun geri dönüşü sırasında kalıcı deformasyonlara enerji harcanmaz iken Al-St bağlantıda azda olsa harcanmıştır. Darbe enerjileri 6, 16, 25 ve 40 J için darbe enerjisinin sırasıyla %66, %70, %72.5 ve %77.5'lik kısmı plaka ve yapıştırıcı tabakasında kalıcı deformasyona dönüştürülmüştür. Enerji seviyesinin artması ile kalıcı deformasyona harcanan enerji oranlarında artış olduğu görülmektedir.

Alt plakanın St, üst plakanın Al olduğu St-Al bağlantıda Al-St bağlantısına göre kinetik enerji ve plastik kayıp enerjsinin, darbe süresince zamana karşı değişimleri benzerdir (Şekil 1.5-c). Değişim karakteristiği, enerjinin harcanması ve sistemden geri kazanılan enerjiler oldukça benzerlik göstermektedir. Enerji seviyesi arttıkça vurucunun en büyük nüfuziyete ulaşma süresi gecikmekte, düşük enerjiden yüksek enerjiye sırasıyla 1.8, 2.0, 2.4 ve 3.0 ms'de gerçeklemektedir. Kalıcı deformasyonlara harcanan darbe enerji oranları $E = 6$ J için %66, 16 J için %69, 25 J için %72

ve 40 J için %77'dir ve Al-St bağlantıdaki değerlere çok yakındır. Vurucu en büyük çökmeden sonra dönüşe başladığı andan itibaren plakalar ile teması aniden kesmemiş, aksine dönüş sırasında kalıcı deformasyonlar devam etmiştir. Dönüş sırasında deformasyonların devam etmesinin sebebi, alt plaka çeliğin elastik olarak depoladığı enerjiyi ilk haline dönmek için kullanmasıdır. Üst plaka alüminyum, alt plaka çeliğin elastik enerjiyi geri verme isteği karşısında üstten vurucu alttan çelik plaka arasında kalıcı deformasyona uğramıştır.

Yapıştırıcı tabakasının en çok zorlandığı, temas kuvvetlerinin en yüksek olduğu, alt ve üst plakalar için aynı malzemenin kullanıldığı St-St bağlantının kinetik enerji ve plastik kayıp enerjisi değişimleri Şekil 1.5-d'de verilmiştir. Plakaların rijitliği arttıkça toplam darbe süresi azalmış, vurucunun en büyük nüfuziyete ulaşma süresi kısalmıştır. St-St bağlantısında $E = 6$ J için 1.15 ms, $E = 16$ J için 1.35 ms, $E = 25$ J için 1.65 ms ve $E = 40$ J için 2.2 ms en büyük çökmenin gerçekleştiği, vurucunun geri dönüşünün başladığı sürelerdir. Plakalar tarafından kalıcı deformasyonlara harcanan enerjiler, diğer bağlantılara göre en düşük değerlerde gerçekleşmiştir. Düşük darbe enerjisi seviyesinden yüksek darbe enerjisi seviyesine kalıcı deformasyonlara harcanan enerji miktarları sırasıyla 3.6, 10.5, 16.5 ve 28.5 J'dür. Takabül eden kalıcı deformasyonlara harcanan enerji oranları sırasıyla, %60, %64.3, %67.4 ve %71.3 dir. Plakalardan en az birinin St olduğu bağlantılarda olduğu gibi darbe enerjisinin artması ile kalıcı deformasyonlara harcanan enerji oranlarında atış olduğu görülmektedir. St-St plakalar vurucu nüfuziyeti sırasında plastik kayıp enerjisi değişimi bakımından en düzensiz artış gösteren bağlantıdır.

Farklı enerji seviyelerinin (Tablo 1.1) Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St bağlantılarında darbe süresince ortaya çıkan temas kuvvetleri üzerinde etkileri Şekil 1.6'da görülmektedir. Tüm bağlantılarda darbe enerjisinin artması ile temas kuvvetlerinde artışların olduğu görülmektedir. Al-Al bağlantıda dört farklı enerji seviyesinin temas kuvvetleri üzerine etkileri Şekil 1.6-a'da verilmiştir. $E = 6$ J enerji seviyesinde 2.2 kN olan en büyük temas kuvveti $E = 16$ J için 4 kN, $E = 25$ J için 5.1 kN ve $E = 40$ J için 6.9 kN olarak gerçekleşmiştir. Darbe enerjisinin 6.67 kat artması ile en büyük temas kuvveti 3.13 kat artmıştır. $E = 6$ ve 16 J'lük enerji seviyelerinde toplam temas süresi 4.5 ms olarak gerçekleşmiş, $E = 25$ J için 5.4 ms, $E = 40$ J

için 6.66 ms olmuştur. Temas kuvveti zirveye düzenli bir şekilde artmış, $E = 6$ J hariç diğer üç enerji seviyesinde aniden düşmüştür. Vurucunun plakalar ile temasını çok kısa sürede kesildiğine işaret etmektedir. Plakalarda kalıcı deformasyonlar çok belirgindir. Depoladıkları elastik şekil değiştirme enerjileri az olduğu için vurucunun geri dönüşünde elastik şekil değiştirmeyi geri vermeleride mümkün olmamıştır. Doyayısıyla vurucu geri dönüş sırasında plakalar ile teması aniden kesmiştir.

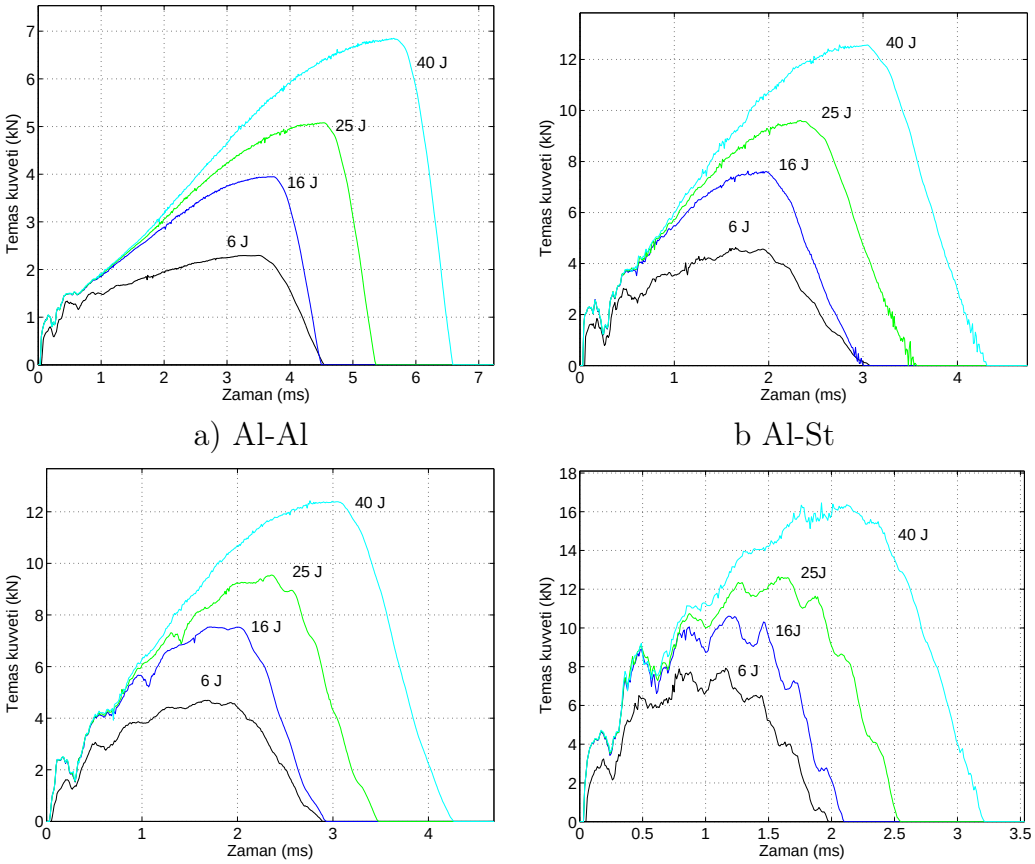
Al-St bağlantıda alt plaka alüminyum, üst plaka çeliktir. Vurucu ile temas halinde bulunan çelik plaka, üzerinde yeterince elastik enerji toplamıştır. Vurucunun geri dönüşü sırasında çelik plaka vurucu ile teması kesmemiş, hem plastik deformasyonların hem de temas kuvvetinin oluşmasına sebep olmuştur. Düşük enerji seviyeleri $E = 6$ ve 16 J'de toplam temas süresi aynıdır ve 3 ms olarak gerçekleşmiştir. Vurucu ile plakaların toplam temas süresi $E = 25$ J için 3.5 ms ve $E = 40$ J için 4.3 ms dir. Üst plaka St temas kuvvetinin zirveye erişme sürecinde vurucu ile tekrarlı teması kesme ve kurma tarzında davranış sergilemiştir. Temas kuvvetinin düzensizliğinin sebebi üst plakanın çelik olmasıdır (Şekil 1.6-b). Al-St bağlatının tam tersi yönde dizilime sahip olan ve alt plakanın çelik üst plakanın alüminyum olduğu St-Al bağlantının farklı enerji seviyeleri için temas kuvveti değişimleri Şekil 1.6-c'de görülmektedir. Toplam temas süresi, en büyük temas kuvveti bakımından St-Al bağlantının bir önceki Al-St bağlantısına çok benzemektedir. İki bağlatının kinetik enerji ve plastik kayıp enerjisi değişimleri oldukça benzerlik gösterdiği belirtilmişti. Temas kuvvetleri bakımından bu iki bağlantıyı bir birinden ayıran, zirveye ulaşma sürecinde St-Al bağlatısının daha düzenli temas kuvveti değişimine sahip olmasıdır. Alt plakanın çelik olması, üst plakanın Al olması, altta rijit bir plaka üstte vurucu arasında ezilen yapıştırıcı ve Al plaka vurucu ile temasında en büyük temas kuvvetine ulaşana kadar daha düzenli temas kuvveti değişimleri olmasına sebep olmuştur. Her iki bağlantıda da, darbe enerjisinin 6.67 kat artması rağmen en büyük temas kuvveti yaklaşık olarak 2.8 kat artarak 4.5 kN'dan 12.5 kN değerine çıkabilmiştir.

Temas kuvveti değişiminde düzensizlikler St-St bağlantılarında belirgindir (Şekil 1.6-d). En büyük temas kuvvetleri ve en kısa toplam temas süresi yine St-St bağlantıda görülmektedir. $E = 6$ J enerji seviyesi için 2 ms, 16 J için 2.1 ms, 25 J

için 2.5 ms ve en büyük darbe enerjisi $E = 40$ J için 3.2 ms toplam temas süresi gerçekleşmektedir. Enerji seviyesinin 6.67 kat artması en büyük temas kuvvetinin 2 kat artmasına, toplam temas süresinin 1.6 kat artmasına neden olabilimiştir.

Aynı ve farklı plakaların bindirme bağlantıları için temas kuvveti, kinetik enerji, plastik kayıp enerjisi ve temas süreleri üzerinde vurucu yarıçapının ve farklı darbe enerjilerinin etkileri incelendikten sonra, darbe sonrası bağlantılarda eş değer kalıcı (plastik) şekil değiştirme davranışları incelenmiştir. Darbe sonrası oluşan eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları a) tabakalı yapının kalınlığı boyunca, b) üst plakanın ön yüzeyinde (vurucu ile temas eden yüzey), c) alt plakanın arka yüzeyinde, d) yapıştırıcı-üst plaka arayüzeyinde ve e) yapıştırıcı-alt plaka arayüzeyinde değerlendirilmiştir. Şekil 1.7-1.10 söz konusu bölgelerde Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St tabakalı bağlantıları için düşük ve yüksek enerji seviyelerinde plastik şekil değiştirme dağılımları gösterilmektedir.

Her iki enerji seviyesi için Al-Al bağlantıda alt plakanın arka yüzeyinde oluşan plastik şekil değiştirmeler üst plakanın ön yüzeyinde oluşan plastik şekil değiştirmelere kıyasla oldukça fazladır (Şekil 1.7). Plastik deformasyona uğrayan bölge alt plakanın arka yüzeyinin orta bölgesinin yaklaşık %50'sine yayılmıştır ve kalınlık boyunca kayda değer bir nüfuziyet oluşmuştur. Darbe enerjisinin 6.7 kat artırılmasına rağmen en büyük plastik şekil değiştirme değeri 2.5 kat artmıştır. 40 J enerji seviyesinde deformasyona uğrayan bölge düzlem içi gelişerek artış göstermiştir. Vurucunun üst plaka ile temas etmesine rağmen alt plakada oluşan deformasyon daha belirgin ortaya çıkmaktadır. Al-Al bağlantıda darbe enerjisinin büyük kısmı alt plaka tarafından yutulmuştur. Yapıştırıcı kalınlığının ince olması nedeniyle alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan deformasyonların üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan deformasyonlara yaklaşık eşit olduğu görülmektedir. Buna rağmen alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan plastik şekil değiştirme değeri ($\varepsilon^p_{eqv} = 0.087$) üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde oluşan plastik şekil değiştirme değerlerinden daha yüksektir. 6.7 kat artan darbe enerji seviyesine karşılık yapıştırıcı ara yüzeylerinde oluşan plastik şekil değiştirmelerin en büyük değerindeki artış 3.2 kattır. Bunlara ek olarak enerji seviyesinin artması ile alt plaka ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde düzlem içi deformasyonlar belirgin artmıştır.



Şekil 1.6. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş a) Al-Al, b) Al-St, c) St-Al ve d) St-St plakalar için farklı enerji seviyelerinde ($E = 6,\ 16,\ 25$ ve 40 J) temas kuvveti değişimleri.

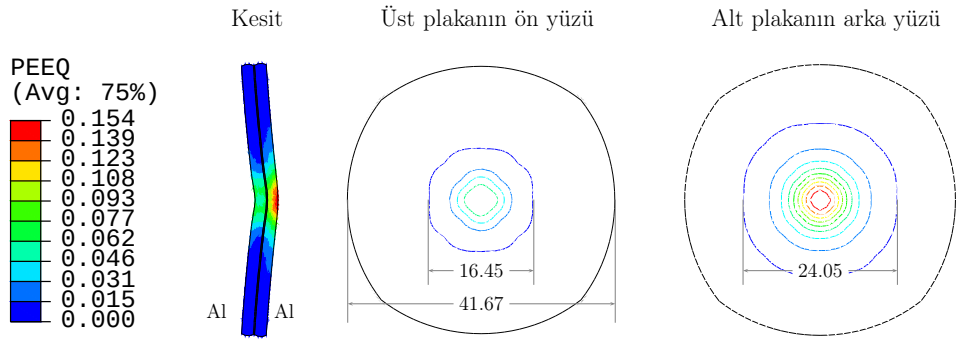
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum-çelik (Al-St) bağlantıda alt plaka alüminyum (Al), daha büyük plastik şekil değiştirmeye maruz kalmıştır (Şekil 1.8). Alt plakada (Al) oluşan plastik şekil değiştirmeler üst plaka (St)'de oluşan plastik şekil değiştirmelerin yaklaşık 4 katıdır. En büyük şekil değiştirme düşük enerji seviyesi ile yüksek enerji seviyesinde sırasıyla 0.103 ve 0.385 olarak yapıştırıcı tabakasında meydana gelmiştir. Enerji seviyesinin 6.7 kat artması plastik şekil değiştirme enerjisinde 3.7 kat artışa sebep olmuştur. Üst plakanın çelik olmasından dolayı darbe enerjisinin büyük kısmının çelik tarafından yutulmasına sebep olmuştur. Yapıştırıcı tabakasının her iki arayüzeyinde oluşan deformasyon seviyeleri yaklaşık aynıdır. Enerji seviyesinin artması ile yapıştırıcı arayüzeylerinde meydana gelen deformasyon alanı düşük enerji seviyesine göre yaklaşık 2.6 kat artmaktadır. Alt plakanın (Al) arka yüzeyinde meydana gelen kalıcı deformasyonların geneli

çekmeden kaynaklanmakta, oluşan değerler St-Al bağlantıya nazaran daha yüksek değerlerdedir.

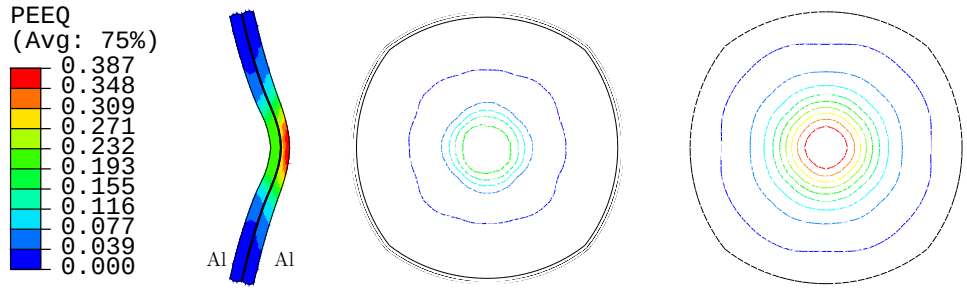
Farklı plakalardan oluşan alt plakanın St, üst plakanın Al olduğu yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantının (St-Al) düşük ve yüksek enerjili darbe sonrası, üst plakanın (Al) üst yüzeyi, alt plakanın (St) alt yüzeyi ve yapıştırıcının alt ve üst plaka arayüzeylerinde bölgesel kalıcı deformasyonların dağılımları Şekil 1.9'da görülmektedir. St-Al bağlantısında alt plakada St olması, üst plakayı (Al) ve yapıştırıcı tabakasını Al-St bağlantısına göre çok daha fazla zorlamıştır. Üst taraftan rijit vurucu, alt taraftan mukavemetli plaka ile sıkıştırılıp deformasyona zorlanan yapıştırıcı tabaka üzerinde oluşan kalıcı deformasyon değerleri Al-St bağlantısına göre her iki enerji seviyesinde de yaklaşık 2 kat olarak ortaya çıkmıştır. Al-St bağlantısında düşük enerji seviyesinde ($E = 6$ J) yapıştırıcı tabakasında meydana gelen $\varepsilon^p_{eqv} = 0.103$ olarak gerçekleşen en büyük kalıcı deformasyon değeri Şekil 1.9'da gösterilen St-Al bağlantısında 2 kattan fazla artarak $\varepsilon^p_{eqv} = 0.222$ olarak gerçekleşmiştir. Yüksek enerji seviyesi $E = 40$ J'de Al-St bağlantısında yapıştırıcı tabakasında $\varepsilon^p = 0.385$ olan en büyük kalıcı deformasyon değeri St-Al bağlantısında yaklaşık 1.82 kat artarak 0.702 olarak gerçekleşmiştir. Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'da görüldüğü üzere çelik plakanın alt tarafta olduğu, vurucu ile alüminyum plakanın temas ettiği St-Al bağlantının yapıştırıcı tabakası kayda değer kalıcı deformasyona zorlanmaktadır.

Üst plaka üzerinde meydana gelen kalıcı deformasyonların sebebi, özellikle vurucunun nüfuz ettiği bölgede, kalınlık boyunca plakanın incelmesi ve sıkıştırılmasıdır. Alt çelik plaka, üst alüminyum plakanın ve yapıştırıcının kalınlık boyunca aşağı doğru hareketini engellemiştir. Dolayısıyla arada kalan yapıştırıcı tabakası mümkün oldukça sıkışmıştır ve geriye kalan darbe enerjisi de, üst plaka alüminyumun vurucu ile temas eden orta bölgesinin çevresinde yanlara doğru yığılma ve kalınlık boyunca daralma şeklinde gerçekleşen kalıcı deformasyonlara harcamıştır.

Yapıştırıcı tabakasının en çok zorlandığı ve kalıcı deformasyonların en büyük değerlere sahip olduğu bağlantı alt ve üst plakanın aynı malzemeden, çelikten üretildiği bağlantıdır. St-St bağlantıda alt ve üst plaka ile yapıştırıcı arayüzeylerinde



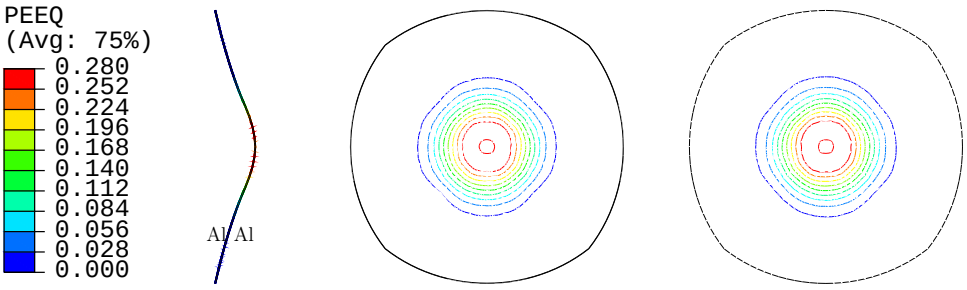
(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J



(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

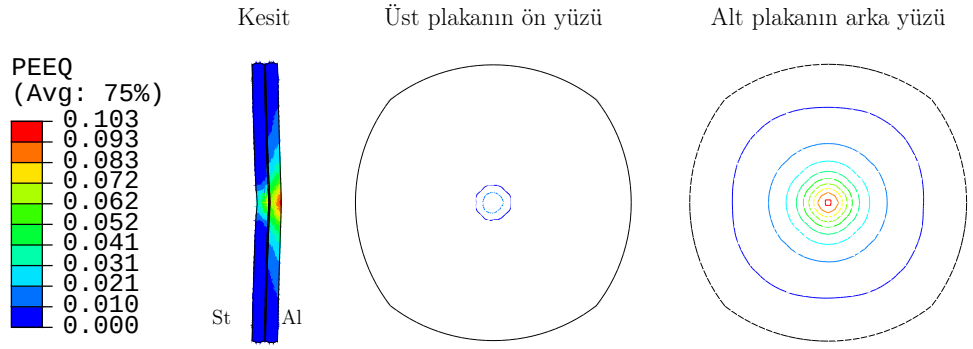


(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J

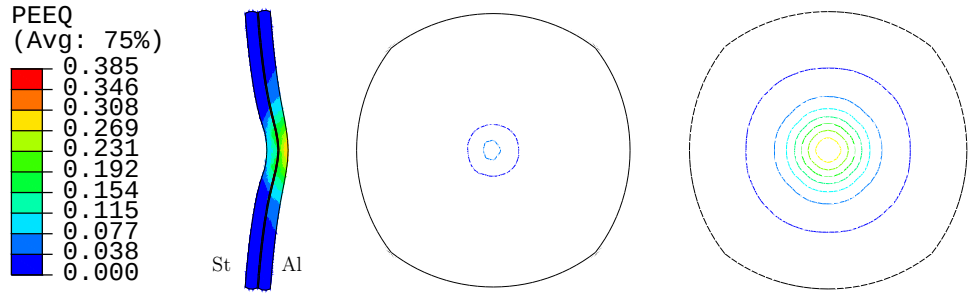


(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

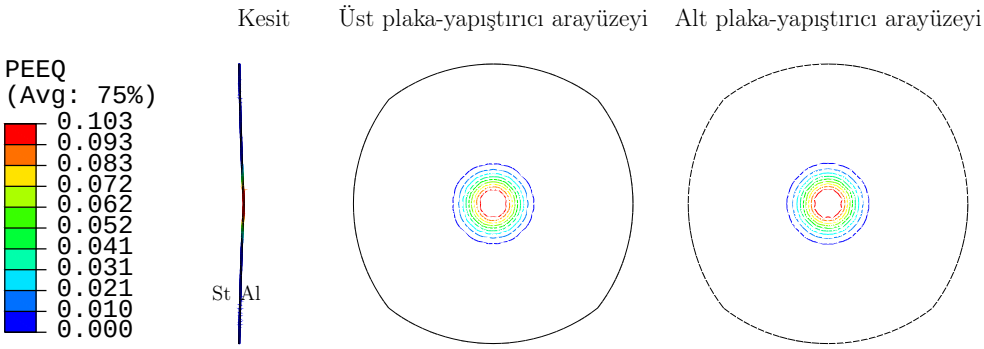
Şekil 1.7. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm).



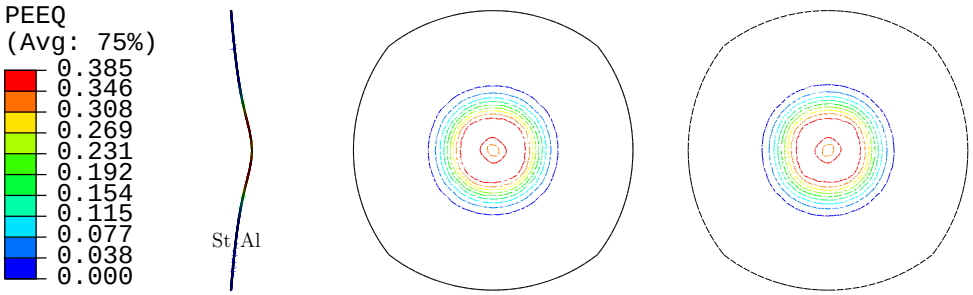
(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J



(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

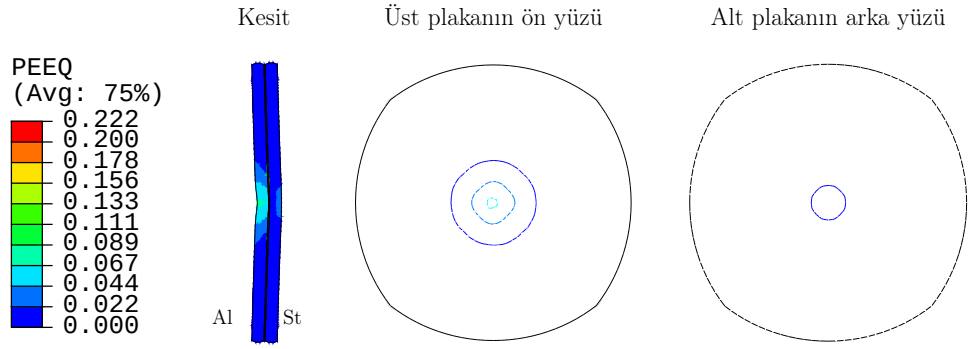


(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J

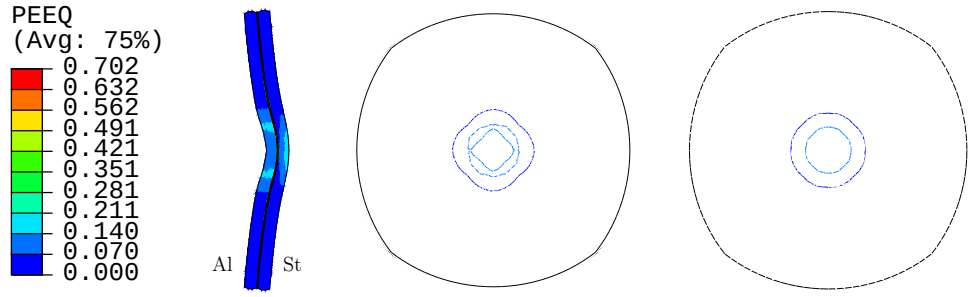


(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

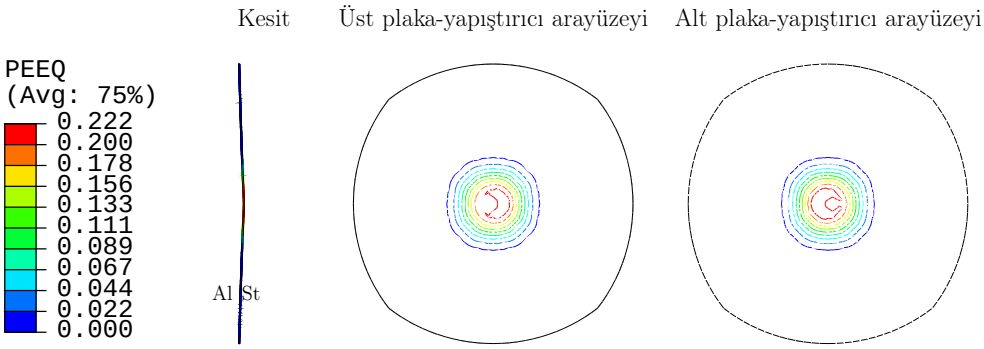
Şekil 1.8. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-St bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm).



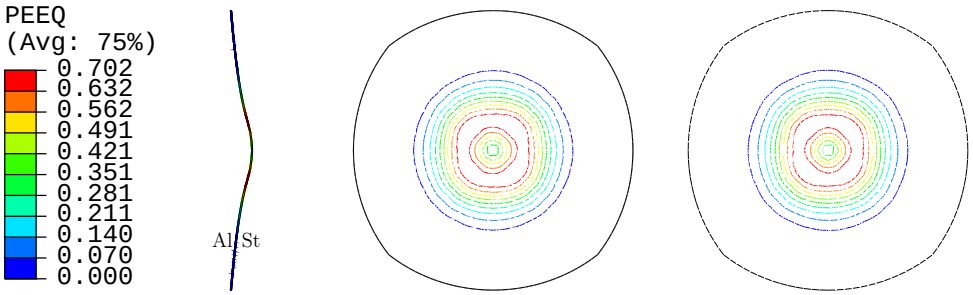
(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J



(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

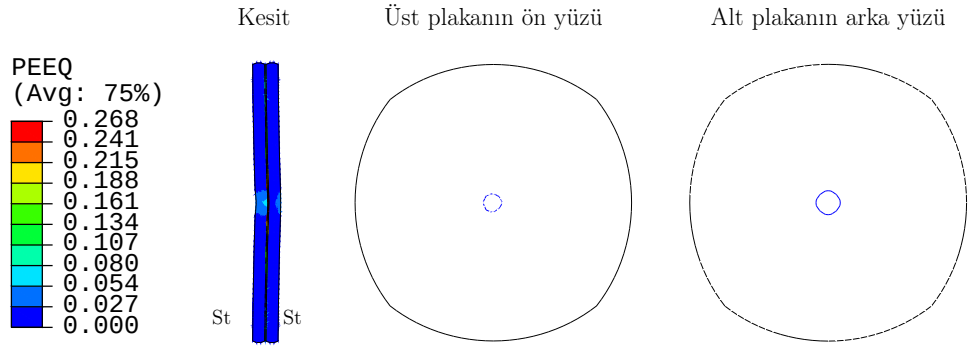


(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J

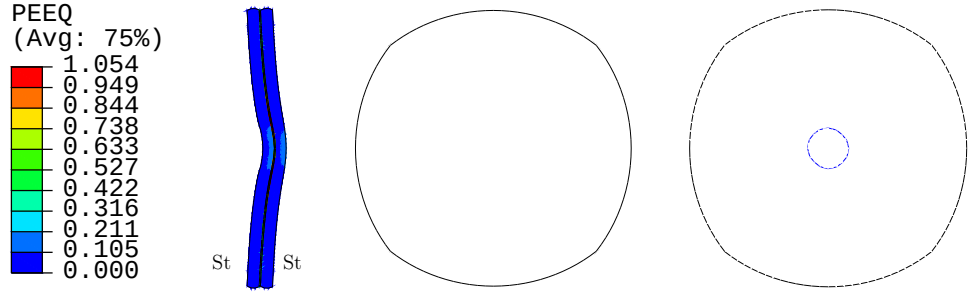


(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

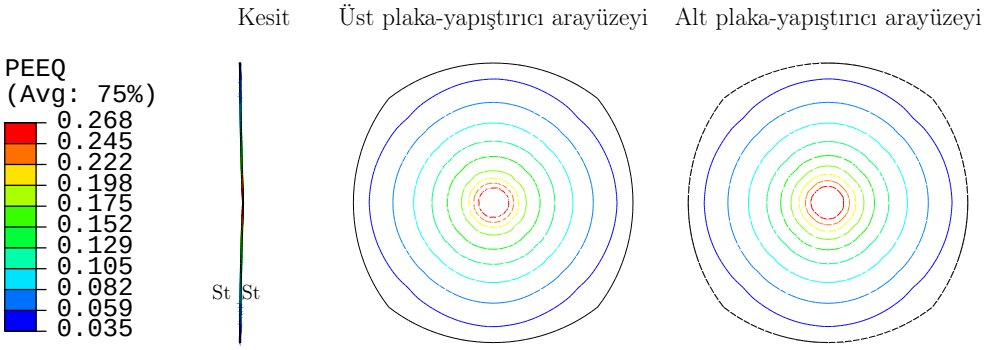
Şekil 1.9. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-Al bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm).



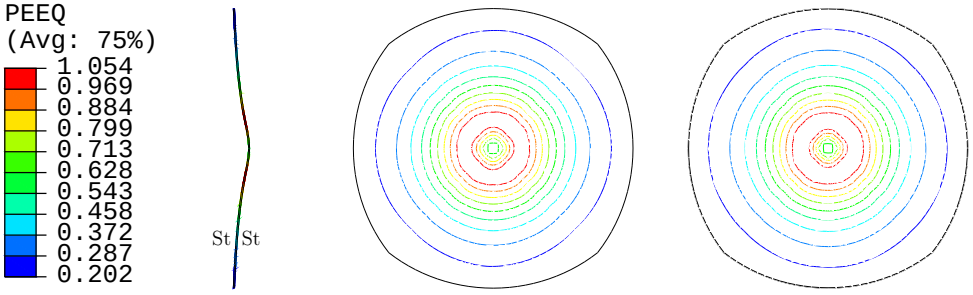
(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J



(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J



(a) $v = 2$ m/s, $m = 3$ kg, Darbe Enerjisi $E = 6$ J



(a) $v = 3.3$ m/s, $m = 7.35$ kg, Darbe Enerjisi $E = 40$ J

Şekil 1.10. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-St bağlantıda üst plakanın ön yüzünde (darbe yüzü), alt plakanın alt yüzünde, üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımı (darbe enerjileri $E_1 = 6$ J, $E_2 = 40$ J, $t_1 = t_3 = 2$ mm, $t_2 = 0.2$ mm, $r = 12.5$ mm).

meydana gelen kalıcı deformasyonların bölgesel dağılımları Şekil 1.10'da verilmiştir. Yapıştırıcıya göre daha elastik sayılabilecek iki çelik plaka arasında kalan yapıştırıcı en büyük kalıcı deformasyonlara St-St bağlantısında maruz olmuştur. Şekil 1.10'da görülen kalıcı deformasyon dağılımları bağlantının yaklaşık 42 mm çapa sahip orta bölgesidir. Düşük ve yüksek her iki enerji seviyesinde, üst ve alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde bu bölgenin tamamı kalıcı deformasyona uğramıştır. Yapıştırıcı tabakasının en çok zorlandığı bağlantı St-St bağlantısı olduğu apaçık görülmektedir.

2. BÖLÜM

YAPIŞTIRICI KALINLIĞININ METAL BAĞLANTILARIN DARBE DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

2.1. Motivasyon

Bölüm-1'de yapıştırıcıyla birleştirilmiş metal (Al-St) plakaların darbe davranışları üzerinde plaka kalınlığı, vurucu kütlesi ve vurucu hızının etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir. Sonuçlar ışığında belirlenen temel bir model yardımıyla bu bölümde yapıştırıcı kalınlığının metal bağlantıların darbe davranışı üzerine etkileri incelenmiştir.

Yapıştırıcı kalınlığının metal bağlantıların darbe davranışları üzerine etkileri 6, 9 ve 15 J olmak üzere üç farklı darbe enerjisi seviyesinde, üç farklı yapıştırıcı kalınlığında (0.2, 0.5 ve 1.0 mm), dört farklı metal bindirme bağlantısı (Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St) için sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının temas kuvveti, plastik kayıp enerjisi, kinetik enerji değişimleri ve üst plaka, alt plaka, yapıştırıcı tabakasında meydana gelen hasar alanları üzerine tesiri incelenmiştir.

2.2. Al-Al Bağlantı

Yapıştırıcı kalınlığının Al-Al bağlantısının darbe davranışı üzerinde etkilerinin belirlenmesi amacıyla kinetik enerji ve plastik kayıp enerjisinin zamana göre değişimleri incelendiğinde, yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcı tabakasında kalıcı deformasyonlara harcanan enerji artmakta, vurucu tarafından bağlantıya kinetik enerjinin aktarılma süresi kısalmaktadır (Şekil 2.1). Her üç enerji seviyesi için, kalıcı deformasyona harcanan enerji düşükten yükseğe doğru sırasıyla 0.2, 0.5

ve 1.0 mm yapıştırıcı kalınlıklarında gerçekleşmektedir.

Al-Al bağlantıda yapıştırıcı kalınlığının temas kuvvetlerinin zamana göre değişimleri üzerine etkileri incelendiğinde, yapıştırıcı kalınlığının artması ile bağlantının toplam kütlesi ve kalınlığı artmakta, oluşan temas kuvvetlerinde, düşük enerji (6 J) seviyesinde $\sim$ %25, yüksek enerji (15 J) seviyesinde %5 artış ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.2). Her üç enerji seviyesinde 1.0 mm'lik yapıştırıcı kalınlığı için vurucu uc bağlantıda temas yüzeyinden daha kısa süre içerisinde ayrılmıştır. Enerji seviyesinin artması ile yapıştırıcı kalınlığının toplam temas süresi üzerine etkisi azalmaktadır. Enerji seviyesi artışıyla yapıştırıcı tabakasının aşırı yük taşıyamadığı ve kalan enerjinin plakalar tarafından taşındığı gözlenmektedir.

Şekil 2.2 yapıştırıcı kalınlığının Al-Al bağlantıların alt plakası (Al) alt yüzünden üç farklı enerji seviyesi için tespit edilen düşey yer değiştirmelerin (U_3) temas kuvvetlerine göre değişimlerini göstermektedir. Her üç enerji seviyesinde yapıştırıcı kalınlığının artması ile temas kuvvetleri artmakta, oluşan en büyük yer değiştirme (U_3) değeri azalmaktadır. 6 J enerji seviyesi için ve 1.0 mm'lik yapıştırıcı kalınlığı için $U_3 = 3$ mm iken, 0.2 mm'lik yapıştırıcı kalınlığı için $U_3 = 3.7$ mm olmaktadır. 9 J'lük enerji seviyesinde 1.0 mm'lik yapıştırıcı kalınlığı için $U_3 = 4$ mm, 0.2 mm'lik yapıştırıcı kalınlığı için $U_3 = 4.8$ mm olmuştur. 15 J enerji seviyesinde 0.2, 0.5 ve 1.0 mm yapıştırıcı kalınlıkları için U_3 yer değiştirme değerleri sırasıyla 6.6, 6.2 ve 5.7 mm olarak gerçekleşmiştir.

2.3. Al-St Bağlantı

Alt plakanın Al üst plakanın St olduğu Al-St bağlantısında yapıştırıcı kalınlığının darbe davranışları üzerine etkileri Şekil 2.3 ve 2.4'de gösterilmiştir. Al-Al bağlantıda olduğu gibi Al-St bağlantısında yapıştırıcı kalınlığının artması ile plastik deformasyona harcanan enerji miktarı artmakta, vurucunun toplam temas süresi kısalmaktadır. Çelik plakanın sistemde yer alması daha elastik bir bağlantıya neden olmuş, enerjinin elastik olarak çelik plaka üzerinde toplanması ile plastik kayıp enerjilerinde Al-Al bağlantısına nazaran belirgin azalma ortaya çıkmıştır. Al-Al bağlantıda en yüksek enerji seviyesinde (15.68 J) plastik kayıp enerjisi 12 J

seviyesinde iken, Al-St sisteminde $\sim$ %20 düşüş ile 10 J seviyesine inmiştir.

Al-St bağlantıda temas kuvvetlerinin zamanla değişimi incelendiğinde çok belirgin olmamakla birlikte yapıştırıcı kalınlığının artması ile temas kuvvetlerinde bir artış, toplam temas süresinde bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 2.4). Al-St bağlantısının tüm farklı enerji seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme davranışları incelendiğinde, yapıştırıcı kalınlığının artması temas kuvvetinde artışa, en büyük çökme miktarında düşüşe sebep olmuştur.

2.4. St-Al Bağlantı

Alt plakanın çelik (St), vurucu ile temas eden üst plakanın alüminyum (Al) olduğu yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-Al bağlantıda, alt plakanın çelik olması nedeni ile, üst taraftan vurucu, alt taraftan daha elastik bir çelik plaka arasında kalan yapıştırıcı tabakası ve alüminyum plaka daha fazla plastik deformasyonlara zorlanmıştır (Şekil 2.7). Yapıştırıcı kalınlığının ince olması yapıştırıcının daha çok plastik deformasyona maruz kalmasına, 0.5 mm'lik yapıştırıcı kalınlığında plastik kayıp enerjisinin daha yüksek olmasına sebep olmuştur. 1.0 mm'lik yapıştırıcı kalınlığında yapıştırıcı tabakasının kalın olması sebebi ile kalınlık boyunca oluşan plastik deformasyonları yutma etme kabiliyeti kazanmıştır. Genel olarak kinetik enerji, plastik kayıp enerjisi ve temas kuvvetlerinin değişimi açısından St-Al bağlantı Al-St bağlantısı ile oldukça benzerlik göstermektedir (Şekil 2.7 ve 2.8).

2.5. St-St Bağlantı

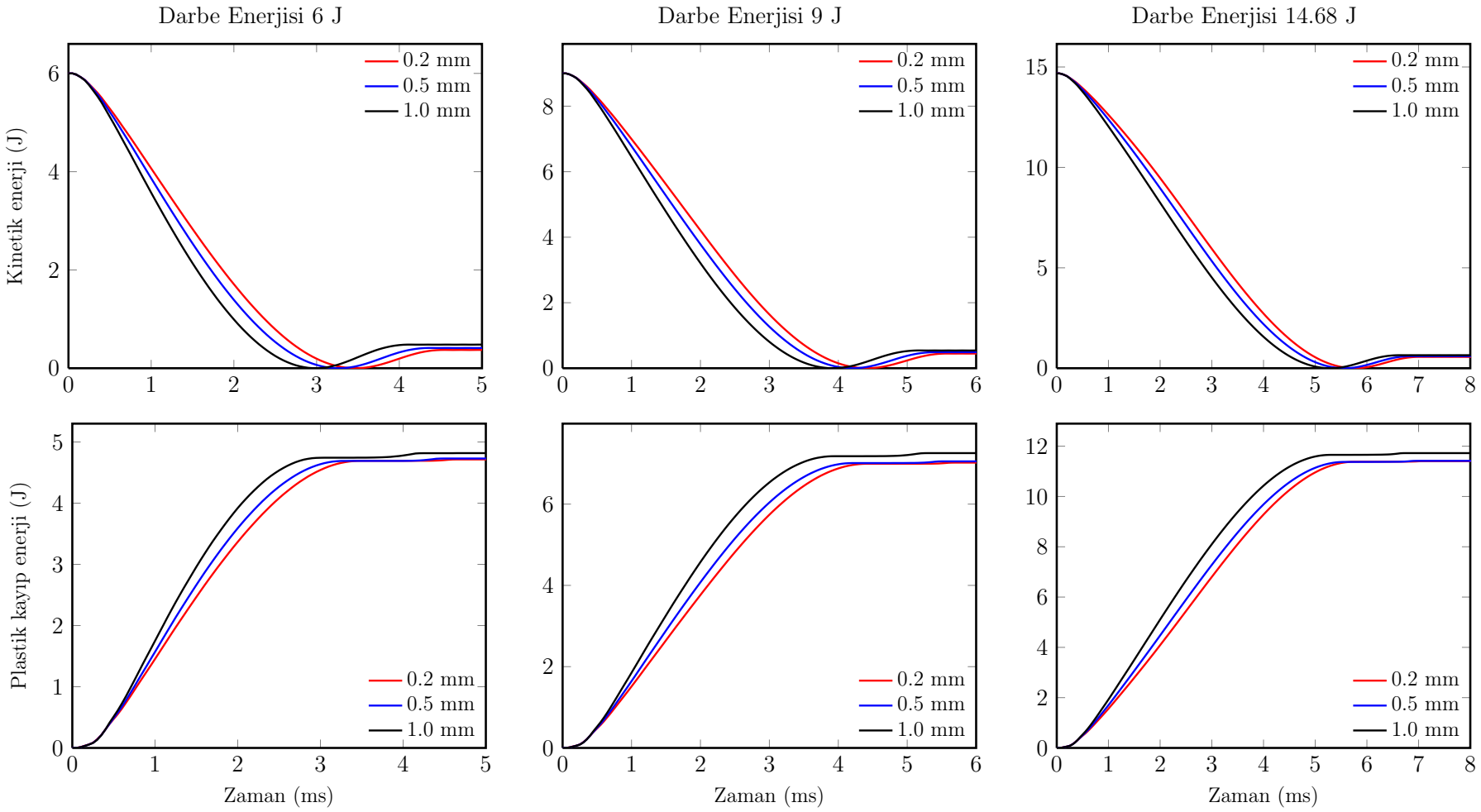
Üst ve alt plakanın çelik olduğu St-St bağlantısı yapıştırıcı kalınlığının tüm enerji seviyelerinde, plastik kayıp enerjisi ve kinetik enerji üzerinde etkisinin en belirgin olduğu bağlantıdır (Şekil 2.5). Yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcı tabakası tarafından harcanan plastik enerji azalmış, ince yapıştırıcı kalınlığına göre yapıştırıcı üzerinde darbe enerjisi elastik şekil değiştirme olarak daha fazla depolanmıştır. Yapıştırıcı kalınlığının incelmesi ile plastik kayıp enerjisi değerlerinde artış olmuştur. St-St bağlantıda yapıştırıcı kalınlığının kinetik enerji değişimi üzerinde etkisi vurucunun plakalardan ayrılmasından sonra ortaya çıkmıştır. 6 J enerji seviyesi

için yapıştırıcı kalınlığının 1.0 mm olduğu durumda sisteme aktarılan kinetik enerji değeri ~ 3 J iken, yapıştırıcı kalınlığının 0.2 mm olduğu durum için ~ 2 J'dür. Bu durum diğer iki enerji seviyesi için de gerçekleşmiştir. Plakaların çelik olması sebebi yapıştırıcı kalınlığı değişiminin temas kuvvetlerindeki etkisini azaltmıştır (Şekil 2.6).

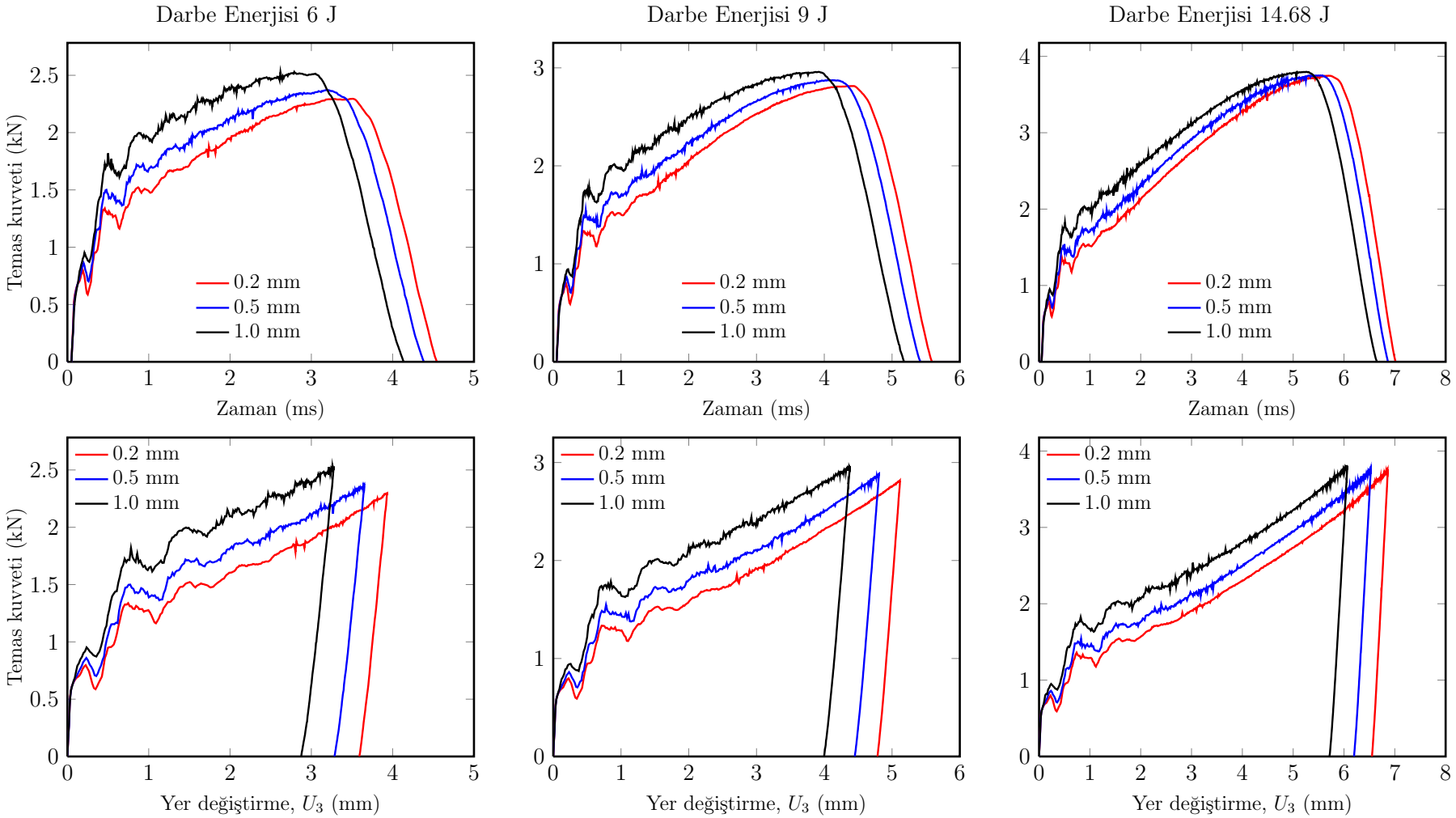
2.6. Kalıcı Deformasyonlara Tesiri

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantılarda (Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St), yapıştırıcı kalınlığının düşük hızlı darbe sonrası plastik şekil değiştirme dağılımı üzerine etkileri sırasıyla Şekil 2.9-2.12 de gösterilmiştir. Kalıcı deformasyon dağılımları vurucunun temas ettiği üst plakanın üst yüzeyinde, bağlantının en alt yüzeyi olan arka plakanın alt yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka ile arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka ile arayüzeyinde olmak üzere üç farklı yapıştırıcı kalınlığında (0.2, 0.5 ve 1.0 mm) dört farklı metal bağlantı için, 6 J darbe enerjisinde ($m = 2$ kg, $v = 3$ m/s) sunulmuştur.

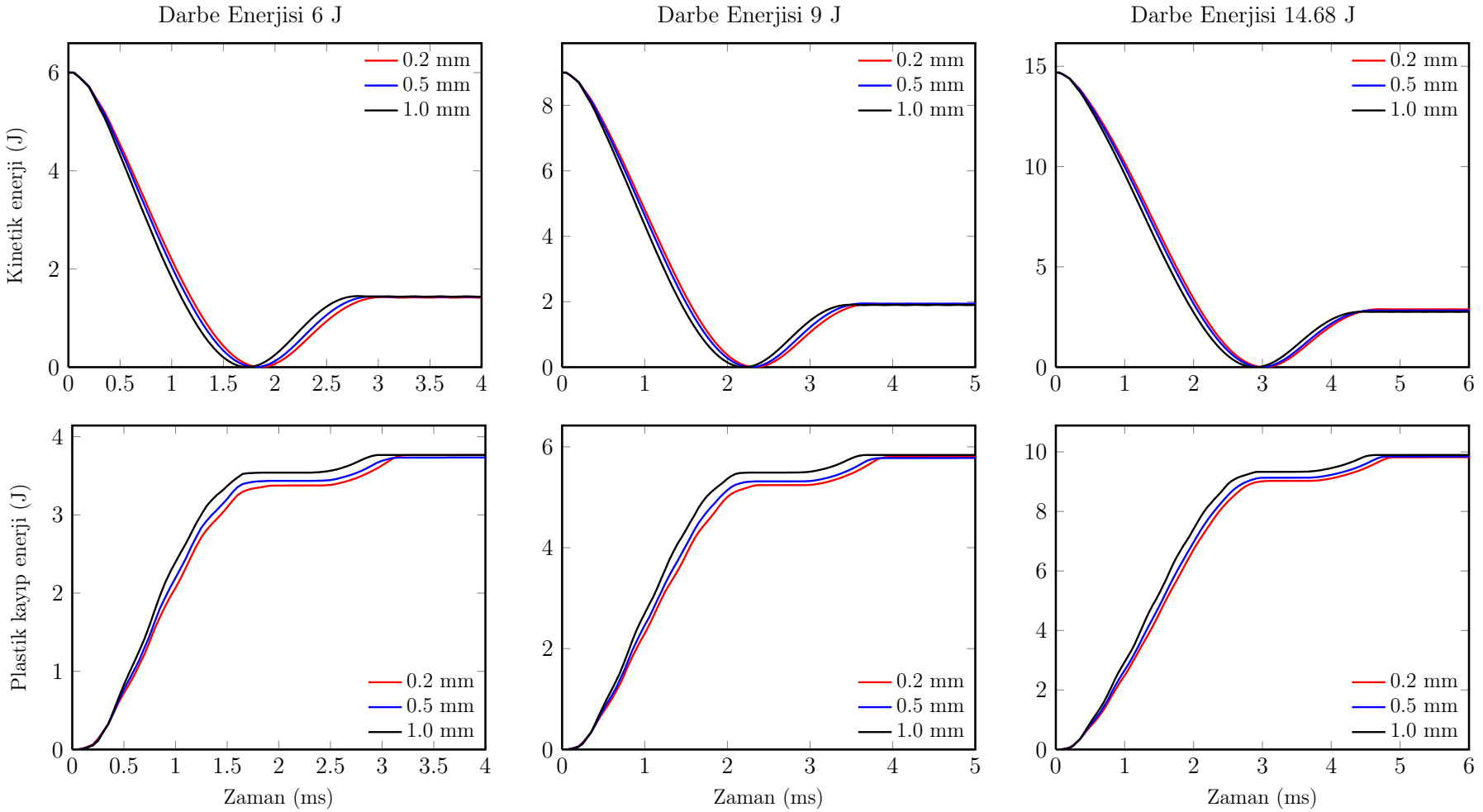
Al-Al bağlantıda yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcı tabakasında, alt ve üst plakalarda oluşan plastik şekil değiştirme seviyelerinde düşüş görülmektedir. Alt plaka üst plakaya göre daha belirgin kalıcı deformasyona maruz kalmaktadır. Oluşan en büyük kalıcı deformasyon alt plakanın arka yüzeyindedir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.2 mm değeri için alt plakanın arka yüzeyinde $\varepsilon^p_{eqv} = 0.154$ olarak tespit edilen plastik deformasyon yapıştırıcı kalınlığının artması ile sırasıyla 0.148 ve 0.143 değerlerine düşmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.2 mm değerin için yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan kalıcı deformasyon değeri 0.087 iken, yapıştırıcı kalınlığının 1.0 mm değerine çıkması ile $\sim$ %25'lik bir düşüş ile 0.065 değerine inmektedir. Yapıştırıcı kalınlığını 0.5 mm değeri için yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan kalıcı deformasyon değeri 0.070 olarak tespit edilmiştir. Yapıştırıcı tabakasının arka yüzünde (alt plaka ile ara yüzeyinde) oluşan kalıcı deformasyonlar yapıştırıcı-üst plaka arayüzeyinde oluşan kalıcı deformasyonlara göre daha fazladır. Yapıştırıcı kalınlığının küçük olduğu durumlara göre ($t_2 = 0.2$ mm), yapıştırıcı tabakası üst ve alt arayüzeylerinde oluşan kalıcı deformasyon dağılımları arasındaki fark yapıştırıcı kalınlığının artması ile daha da belirginleşmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının artması, yapıştırıcı tabaka üzerinde oluşan kalıcı deformasyonlarda düşüşe sebep olmaktadır.



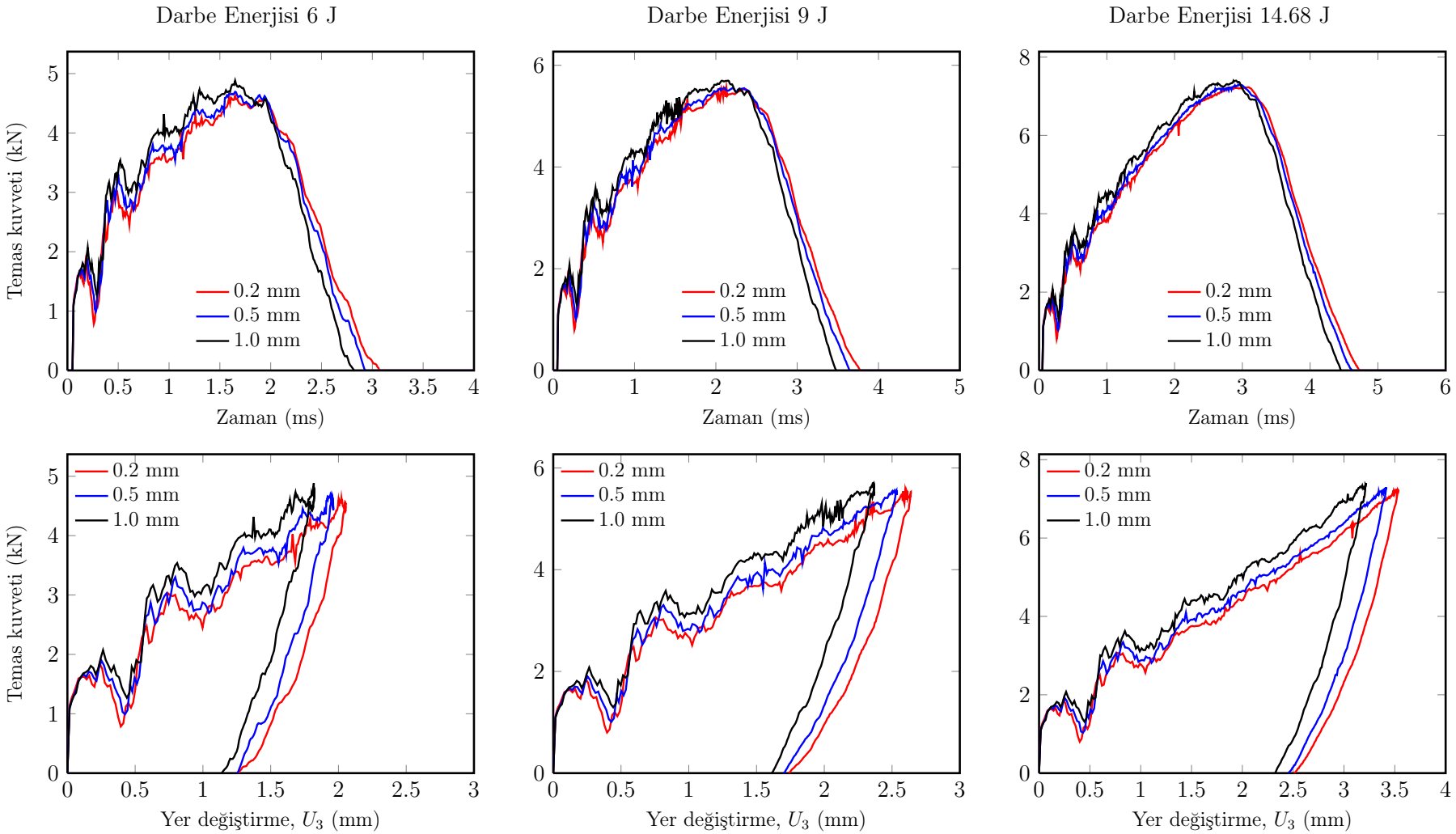
Şekil 2.1. Yapıştırıcı kalınlığının Al-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri.



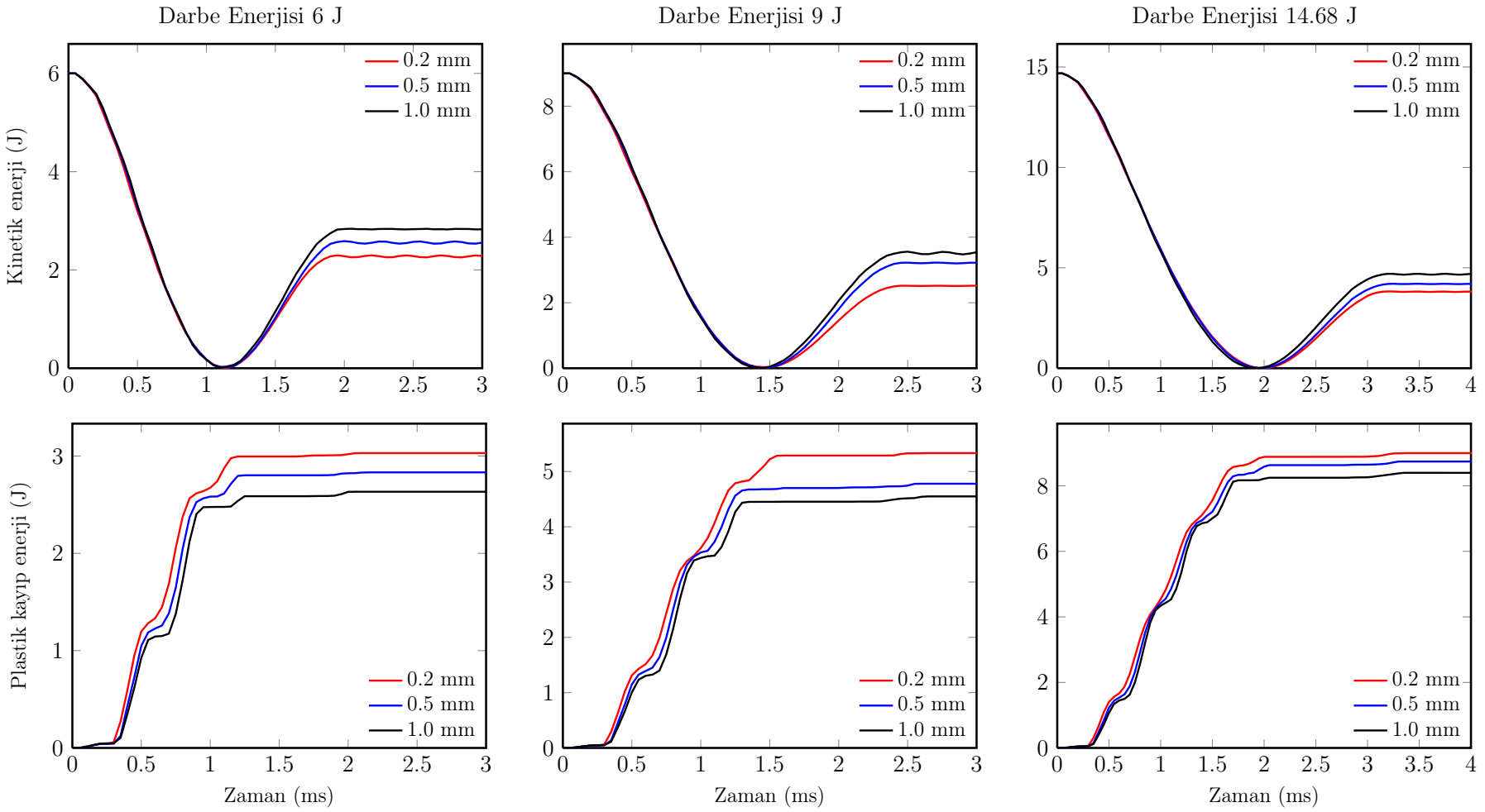
Şekil 2.2. Yapıştırıcı kalınlığının Al-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri.



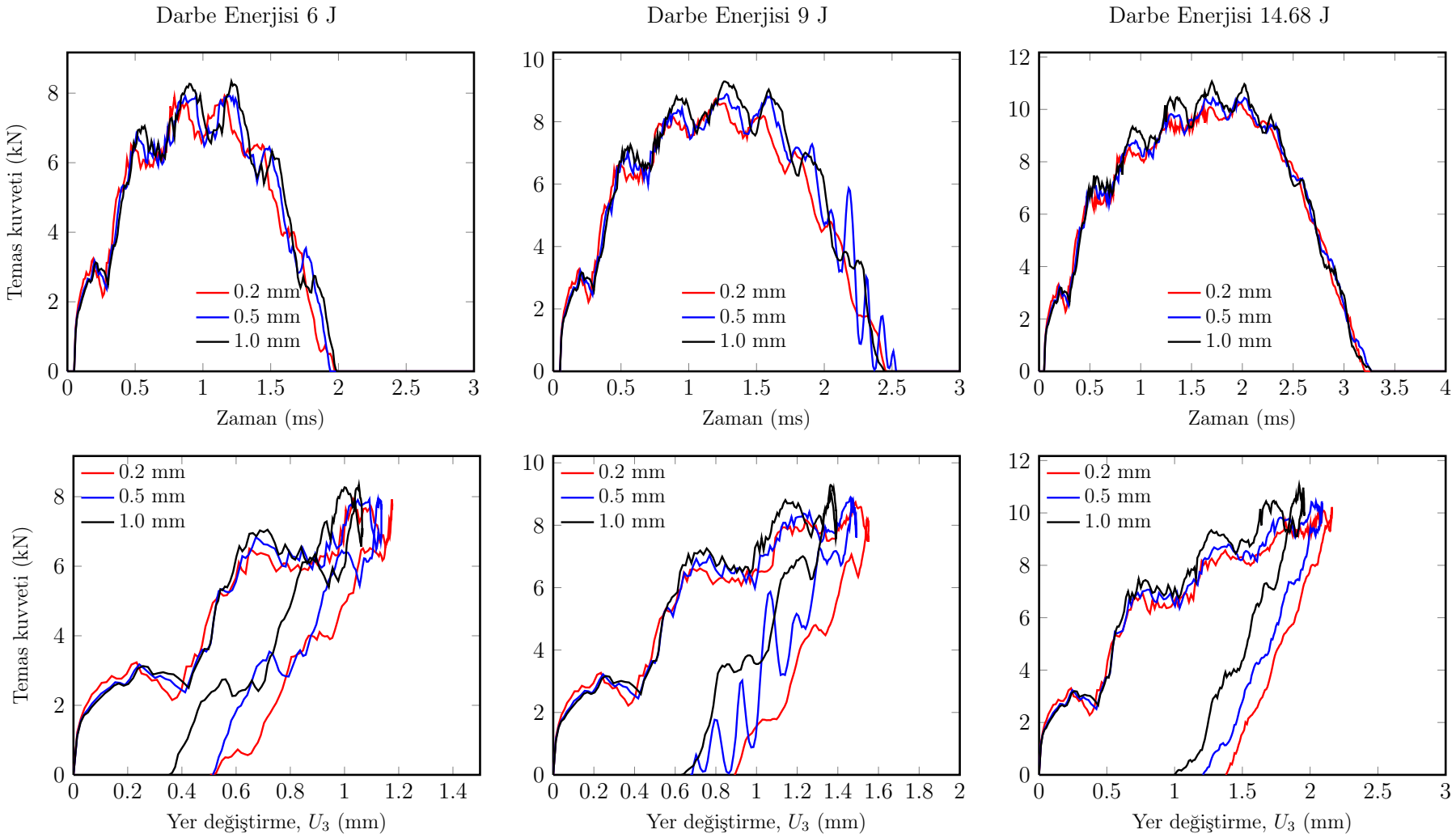
Şekil 2.3. Yapıştırıcı kalınlığının Al-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri.



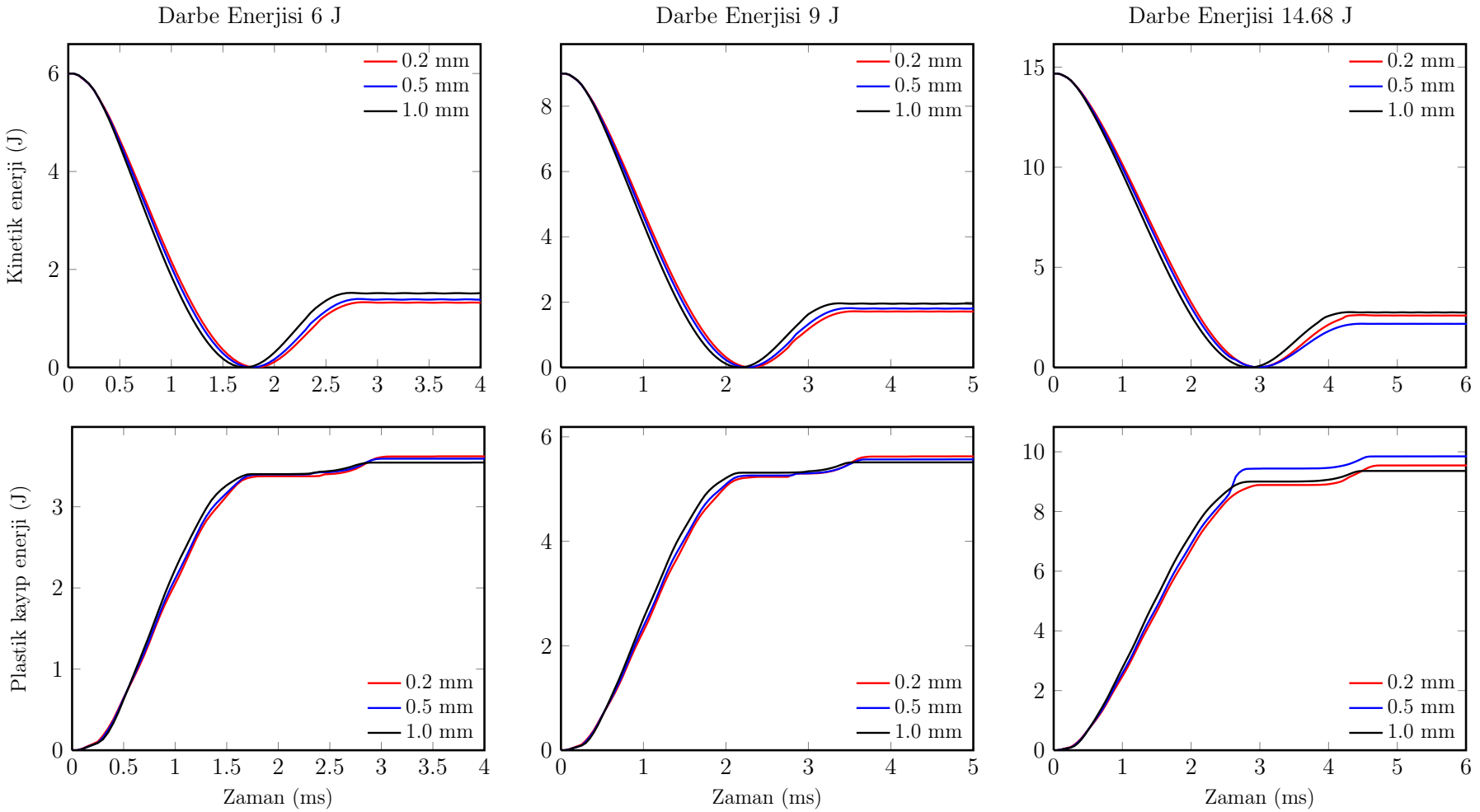
Şekil 2.4. Yapıştırıcı kalınlığının Al-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri.



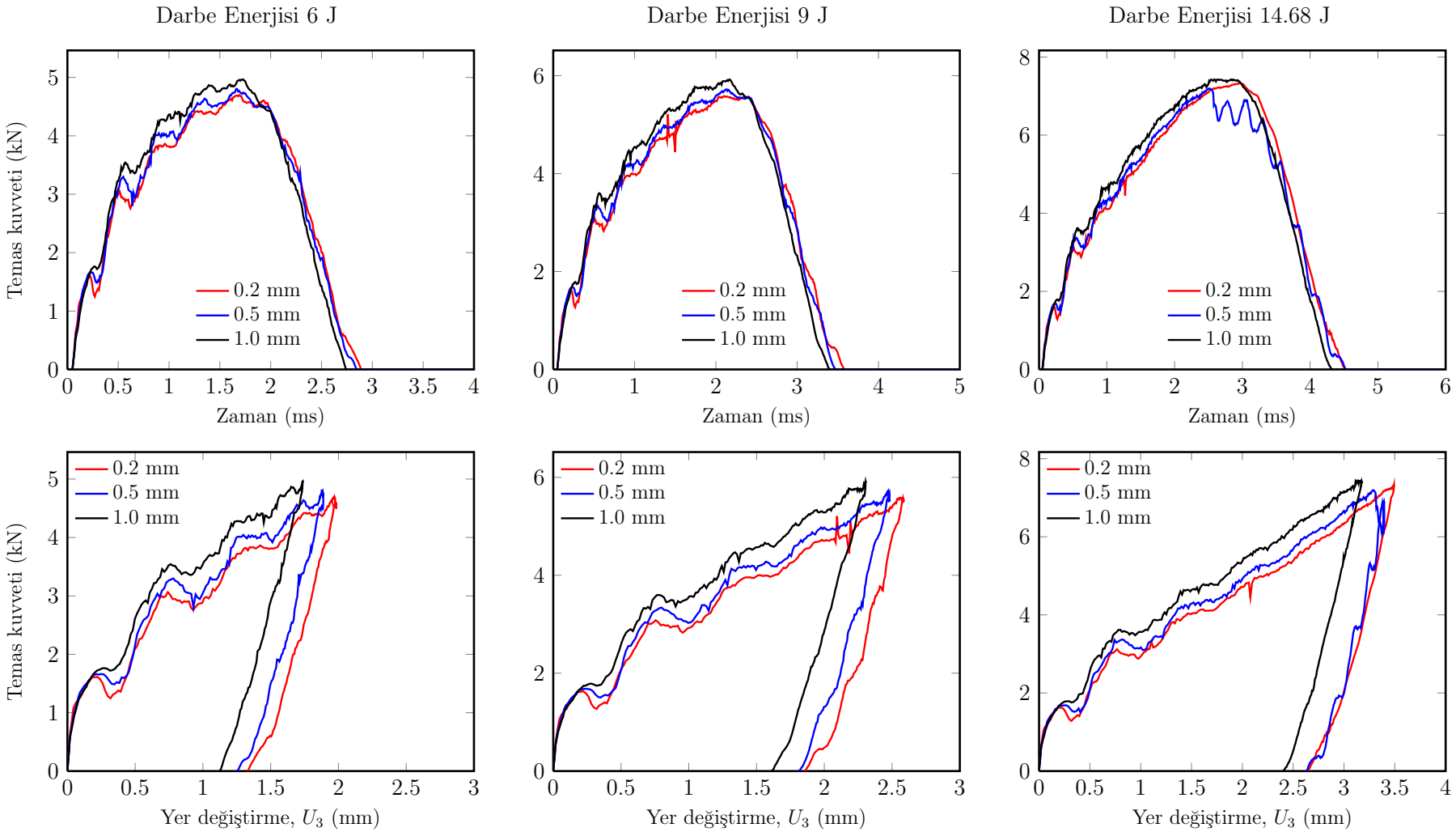
Şekil 2.5. Yapıştırıcı kalınlığının St-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri.



Şekil 2.6. Yapıştırıcı kalınlığının St-St bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri.



Şekil 2.7. Yapıştırıcı kalınlığının St-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları üzerine kinetik enerji ve plastik kayıp enerji bakımından etkileri.



Şekil 2.8. Yapıştırıcı kalınlığının St-Al bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarında temas kuvvetinin zamana ve yer değiştirmeye göre değişimi üzerine etkileri.

Al-Al sisteminde en büyük kalıcı deformasyon (0.154) alt plakada (Al) görülmektedir (Şekil 2.9).

Farklı plakalardan (Al alt plaka, St üst plaka) oluşan Al-St bağlantıda vurucu ile temas eden plaka St'dir. Çelik üst plaka daha yüksek elastikliğe sahip olduğu için darbe enerjisinin büyük kısmını elastik olarak kendi üstünde toplamıştır. Al-St bağlantıda düşük hızlı darbe sonrası oluşan plastik şekil değiştirme dağılımları Şekil 2.10'de görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.2 mm değerinde oluşan en büyük plastik şekil değiştirme değeri $\varepsilon^p_{eqv} = 0.103$ yapıştırıcı tabakasındadır. Yapıştırıcı kalınlığının 0.5 mm değerinde $\varepsilon^p_{eqv} = 0.088$ olarak alüminyum alt plakada ortaya çıkmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının 0.5 mm değerinde yapıştırıcı tabakasında oluşan kalıcı deformasyon değeri 0.083 dür. Yapıştırıcı kalınlığının 1.0 mm değerinde alt plaka alüminyumda oluşan kalıcı deformasyon $\varepsilon^p = 0.082$ ve yapıştırıcı tabakasında oluşan kalıcı deformasyon $\varepsilon^p = 0.060$ dır. Yapıştırıcı tabakasının ince kalınlığa sahip olması, yapıştırıcının daha fazla plastik deformasyona zorlanmasına, hatta yapıştırıcı tabakasını en yüksek plastik deformasyonlara maruz bağlantı elemanı yapmaktadır. Yapıştırıcı tabakası kalınlığının artması ile yapıştırıcı, üzerine gelen yükleri daha iyi dağıtmakta ve alt plakaya aktarmaktadır. Böylelikle yapıştırıcı tabakasında oluşan kalıcı deformasyonların dağılımları değer olarak düşmektedir. Üst plakanın çelik olmasından dolayı yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcı-üst plaka arayüzeyinde oluşan plastik deformasyonlar alt plaka arayüzeyinde oluşan plastik deformasyonlara göre daha fazladır. Daha elastik bir üst plaka, yapıştırıcı-üst plaka arayüzeyinde daha fazla plastik deformasyona uğramasına sebep olmaktadır.

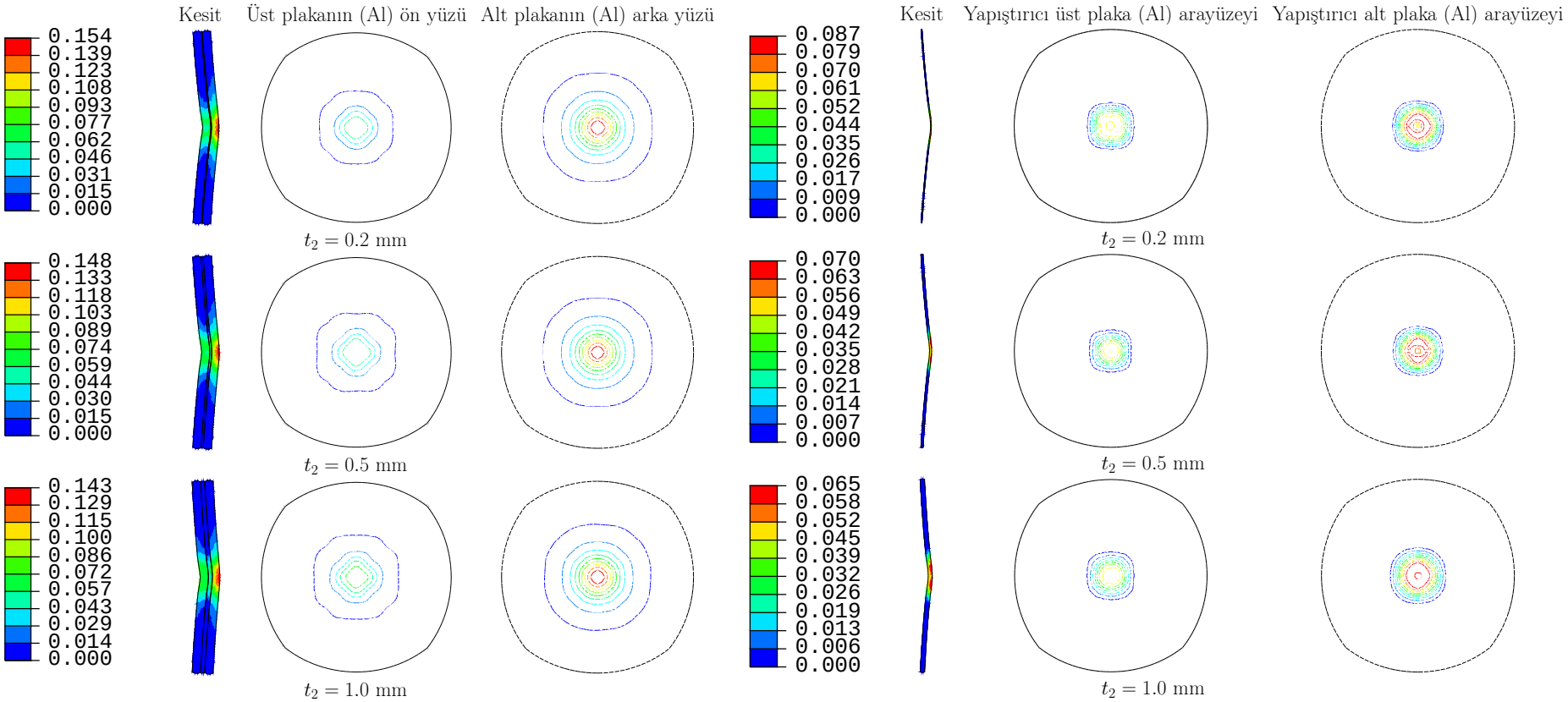
Vurucunun temas ettiği üst plakanın alüminyum alt plakanın çelik olduğu bağlantının düşük hızlı darbe sonrası plastik şekil değiştirme dağılımları Şekil 2.11'de sunulmuştur. Üst plakaya (Al) çarpan vurucu ile elastikliği yüksek alt plaka arasında yapıştırıcı tabakası vede üst plaka ezilmeye zorlanmaktadır. Alt plaka (St) arka tarafta duvar görevi görmekte, yapıştırıcı ve üst plakanın aşağıya doğru hareketine izin vermemektedir. St-Al bağlantısının tüm yapıştırıcı kalınlıkları için en büyük kalıcı şekil değiştirme değerleri yapıştırıcı tabakasında tespit edilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.2, 0.5 ve 1.0 mm değerleri için yapıştırıcı tabakasında oluşan en büyük kalıcı deformasyon değerleri sırasıyla 0.222, 0.134 ve 0.127 dir. Yapıştırıcı

kalınlığının 5 kat artması ile yapıştırıcı tabakasında oluşan kalıcı deformasyon $\sim$ %43 düşmüştür. St-Al bağlantıda yapıştırıcı kalınlığının artması ile oluşan kalıcı deformasyon belirgin azalmaktadır. Yapıştırıcı tabakasında oluşan en büyük kalıcı deformasyonlar yapıştırıcı-alt plaka arayüzünde meydana gelmektedir.

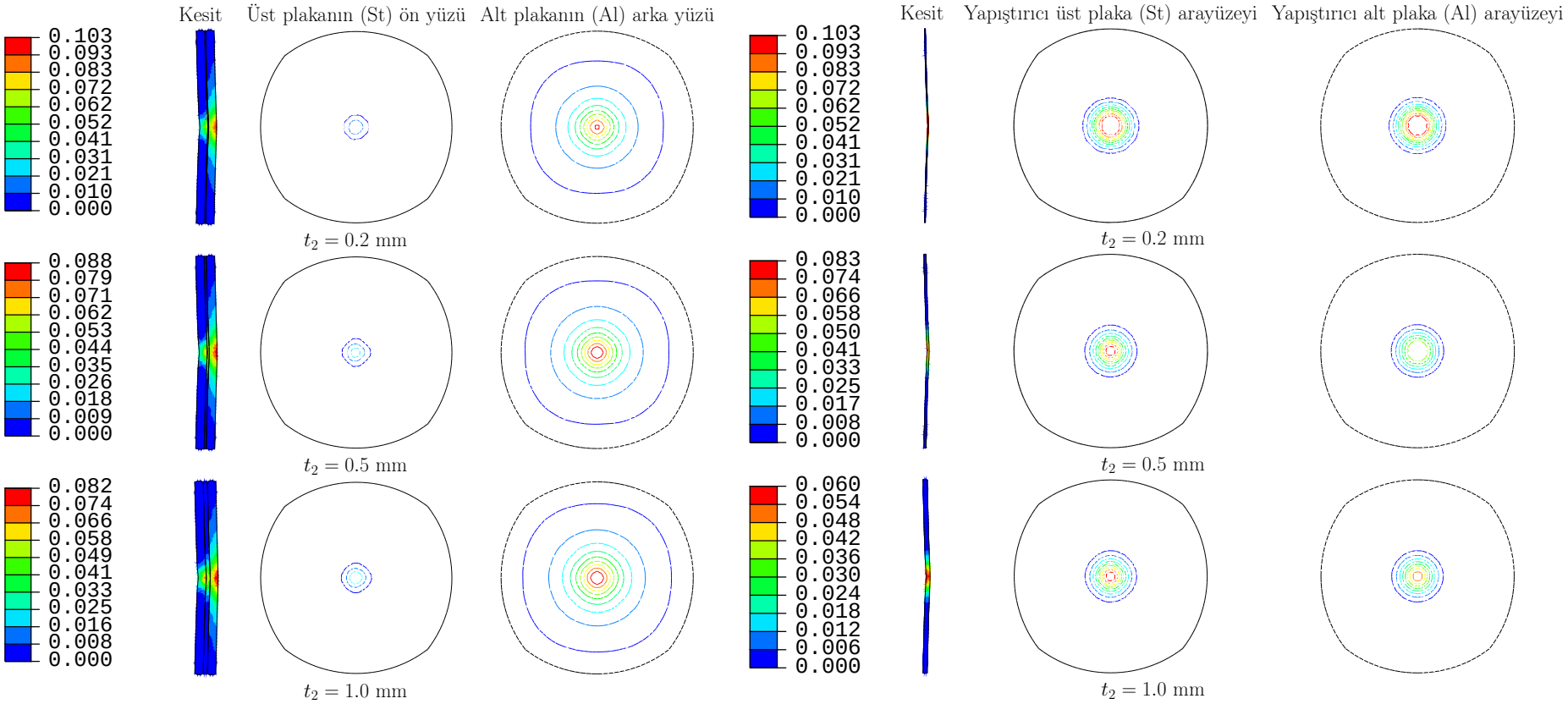
Dört farklı metal bağlantının St-St olanı için düşük hızlı darbe sonrası plakalarda ve yapıştırıcı tabakasında oluşan kalıcı deformasyon dağılımları Şekil 2.11'de görülmektedir. İki daha elastik plaka arasında kalan yapıştırıcı tabakası diğer üç bağlantıya nazaran çok daha fazla zorlanmaktadır. Üç farklı yapıştırıcı kalınlığı $t_2 = 0.2$, 0.5 ve 1 mm için yapıştırıcı tabakasında oluşan en büyük kalıcı deformasyonlar sırasıyla $\varepsilon^p_{eqv} = 0.268$, 0.199 ve 0.156'dir. Artan yapıştırıcı kalınlığı ile kalıcı deformasyon değerlerinde düşüş görülmektedir. Şöyle ki, yapıştırıcı kalınlığının beş kat arması ile çıkması kalıcı deformasyonlarda $\sim$ %42 düşüş gözlenmektedir. Yapıştırıcı tabakasında oluşan en büyük plastik deformasyon yapıştırıcı arka yüzü olan alt plaka arayüzeyinde meydana gelmektedir. St-St bağlantısında üst plakada alt plakadan daha yüksek kalıcı deformasyonlar ortaya çıkmaktadır.

2.7. Hasar Alanlarına Tesiri

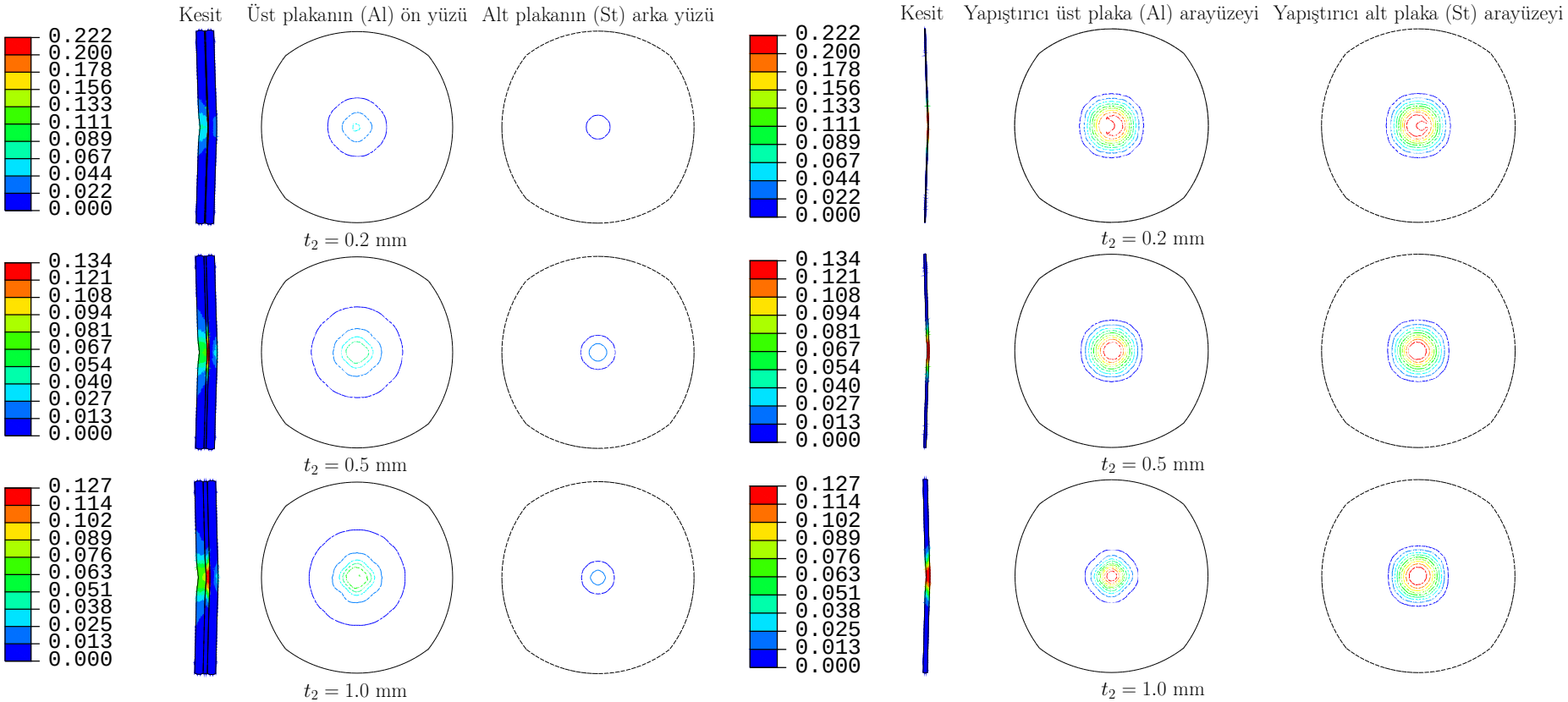
Tablo 2.1 oluşturulurken ABAQUS® yazılımı ile çözümleri elde edilen modellerden her bir elemanın şekil değiştirme değerleri, elemanın kütle merkezinin x, y, z koordinatları ile birlikte bir metin dosyasına yazılmıştır. Elde edilen metin dosyalardan bağlantıyı oluşturan her bir tabakanın (alt plaka, yapıştırıcı, üst plaka) alt ve üst yüzeyindeki elemanlar ayrı ayrı sorgulanmış ve başka bir listede tutulmuştur. Bu koordinatlar yüzey uydurma teknikleri kullanılarak 100×100 boyutlarında yeni bir matrise aktarılmıştır. Yeni matrisin (i, j) indisleri tabakanın ilgili yüzeyinin (alt, üst) (x, y) koordinatlarını, matrisin değerleri ise şekil değiştirme değerlerini ihtiva etmektedir. İlgilenilen her bir yüzey için elde edilen bu matrislerden ilgili malzemenin şekil değiştirme hasar değeri (*rupture strain*) ile kıyaslama yapılarak toplam hasar alanları mm^2 olarak elde edilmiştir. Bağlatılarda kullanılan alüminyum, çelik ve yapıştırıcı için şekil değiştirme hasar değerleri sırayla $\varepsilon^{hasar}_{Al} = 0.253$,$\varepsilon^{hasar}_{St} = 0.01596$, $\varepsilon^{hasar}_{Adh} = 0.1656$. Elde edilen hasar alanı



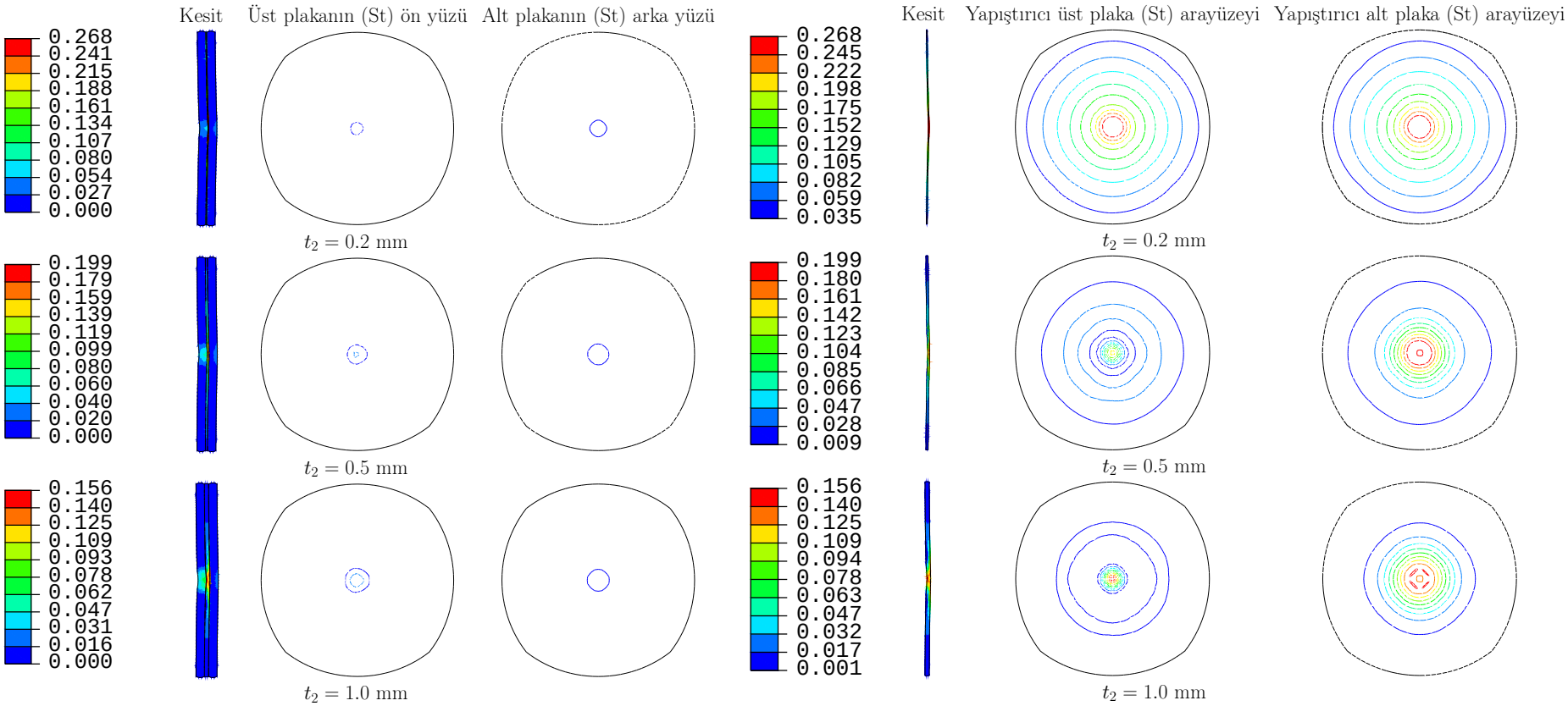
Şekil 2.9. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al bağlantıda üst plaka (Al) ön yüzeyinde, alt plaka (Al) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s).



Şekil 2.10. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-St bağlantıda üst plaka (St) ön yüzeyinde, alt plaka (Al) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s).



Şekil 2.11. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-Al bağlantıda üst plaka (Al) ön yüzeyinde, alt plaka (St) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s).



Şekil 2.12. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş St-St bağlantıda üst plaka (St) ön yüzeyinde, alt plaka (St) arka yüzeyinde, yapıştırıcının üst plaka arayüzeyinde ve yapıştırıcının alt plaka arayüzeyinde plastik şekil değiştirme ε^p_{eqv} dağılımları (Darbe enerjisi = 6 J, $m = 2$ kg, $v = 3$ m/s).

değerleri üç farklı enerji seviyesinde (6, 9, 15 J), üç farklı yapıştırıcı kalınlığında (0.2, 0.5, 1.0 mm), dört farklı metal bağlatının (Al-Al, Al-St, St-Al, St-St) üst plaka, yapıştırıcı tabakası ve alt plakası için ön ve arka yüzeylerinde düzenlenerek sunulmuştur (Tablo 2.1).

Al-Al sisteminde alt plaka, üst plaka ve yapıştırıcı tabakasında üç enerji seviyesi için üç farklı yapıştırıcı kalınlığında hasara uğramış bölge oluşmamıştır (Tablo 2.1). Alt plaka alüminyum, üst plaka çelik Al-St bağlantıda vurucu ile temas yaşayan üst çelik plaka üzerinde oluşan hasar alanları, 6 J enerji seviyesinde, tüm yapıştırıcı kalınlıklarında çelik plakanın ön yüzünde 18.8 mm^2, arka yüzeyinde ise ön yüzeyinin 2 katı 35.5 mm^2 olarak tespit edilmiştir. Enerji seviyesinin 9 J olması ile çelik plakanın ön yüzünde oluşan hasar alanı 21 mm^2, arka yüzünde ise 68 mm^2 olarak gerçekleşmiştir. Enerji seviyesinin artması ile yapıştırıcı kalınlığının hasar alanları üzerine etkisi az da olsa görülmektedir. 9 J enerji seviyesinde 0.2 mm ve 0.5 mm yapıştırıcı kalınlıklarında çelik plakanın arka yüzünde oluşan hasar alanı 68.8 mm^2 iken, 1.0 mm yapıştırıcı kalınlığında hasar alanı azalarak 62 mm^2'ye düşmüştür. Hasar alanındaki aynı azalma 15 J enerji seviyesinde 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığından 0.5 ve 1.0 mm yapıştırıcı kalınlığına geçildiğinde görülmektedir. 120.3 mm^2 olan hasar alanı 118.8 mm^2'ye düşmüştür. 9 ve 15 J enerji seviyelerinde Al-St bağlantıda 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığında yapıştırıcı tabakası üzerinde hasar bölgesi oluştuğu tespit edilmiştir. 9 J enerji seviyesi için yapıştırıcı tabakasının ön yüzünde 1.6 mm^2 olan hasar alanı arka yüzünde 4.7 mm^2 olarak ortaya çıkmaktadır. Enerji seviyesinin 15 J yükselmesi ile 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığında hasar alanları ortalama ~ 80 mm^2'ye erişmiştir.

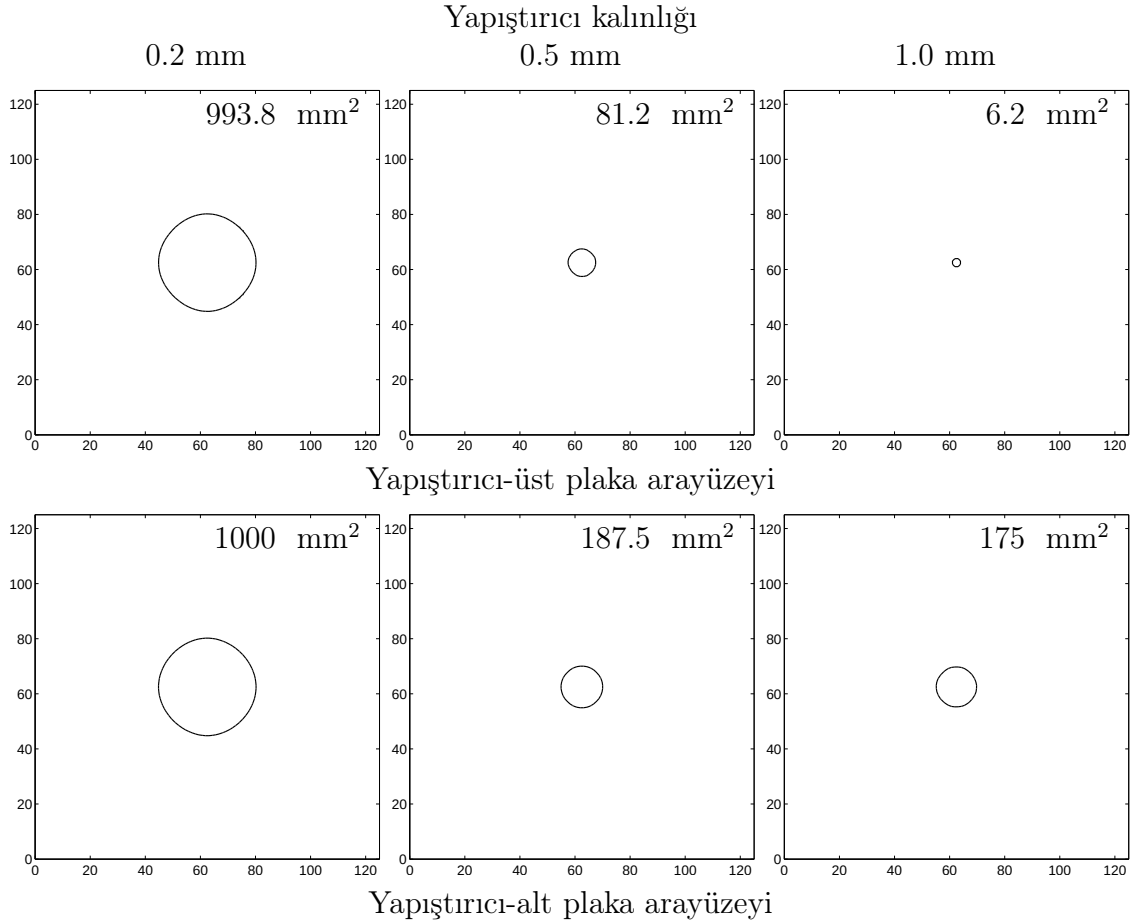
St-Al bağlantıda alt plakanın çelik olması nedeni ile yapıştırıcı tabakasının arkasında daha elastik bir plaka görevi görmüş, yapıştırıcının üst plaka alüminyum ile alt plaka çelik arasında ezilmesine sebep olmuştur. Temas kuvvetleri açısından oldukça çok benzerlikler gösteren Al-St ile St-Al bağlantıları yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan hasar alanları bakımından birbirinden oldukça farklıdır. Al-St bağlantıda 9 ve 15 J enerji seviyelerinde 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığında hasar alanı oluşmasına rağmen, St-Al bağlantıda en düşük enerji seviyesi dahil tüm enerji seviyelerinde yapıştırıcı tabakası üzerinde hasar bölgesi görülmektedir. En düşük

Tablo 2.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St sistemleri için üç farklı enerji seviyesinde, üç farklı yapıştırıcı kalınlığında hasar alanları (mm^2), $\varepsilon_{Al}^{hasar} = 0.253$, $\varepsilon_{St}^{hasar} = 0.01596$, $\varepsilon_{Adh}^{hasar} = 0.1656$

			Darbe enerjisi								
			6 J			9 J			14.68 J		
			Yapıştırıcı kalınlığı, t_2 (mm)			Yapıştırıcı kalınlığı, t_2 (mm)			Yapıştırıcı kalınlığı, t_2 (mm)		
			0.2	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0
Al-Al	Üst plaka (Al)	F$^\alpha$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B$^\beta$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Yapıştırıcı	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alt plaka (Al)	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al-St	Üst plaka (St)	F	18.8	18.8	18.8	20.3	21.9	21.9	25.0	25.0	25.0
		B	37.5	37.5	37.5	68.8	68.8	62.5	120.3	118.8	118.8
	Yapıştırıcı	F	-	-	-	1.6	-	-	79.7	-	-
		B	-	-	-	4.7	-	-	81.2	-	-
	Alt plaka (Al)	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
St-Al	Üst plaka (Al)	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Yapıştırıcı	F	50.0	-	-	87.5	14.1	-	175.0	81.2	3.1
		B	50.0	-	-	87.5	15.6	-	175.0	93.8	31.2
	Alt plaka (St)	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	50.0	37.5	37.5	81.2	81.2	81.2	167.2	171.9	137.5
St-St	Üst plaka (St)	F	21.9	21.9	25.0	25.0	25.0	28.1	45.3	42.2	46.9
		B	20.3	25.0	25.0	37.5	37.5	46.9	62.5	62.5	68.8
	Yapıştırıcı	F	121.9	-	-	481.2	25.0	6.2	993.8	81.2	6.2
		B	143.8	50.0	-	479.7	50.0	62.5	1000.0	187.5	175.0
	Alt plaka (St)	F	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	37.5	26.6	18.8	68.8	51.6	50.0	118.8	118.8	106.2

$^\alpha$ Plakanın ön yüzü
$^\beta$ Plakanın arka yüzü

enerji seviyesinde yapıştırıcı kalınlığının 0.2 mm değeri için 50 mm^2 hasar alanı oluşurken, 9 J enerji seviyesi için 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığında 87.5 mm^2, 0.5 mm yapıştırıcı kalınlığında 15 mm^2 hasar alanı oluşmaktadır. En yüksek enerji seviyesi 15 J için, 0.2 ve 0.5 mm yapıştırıcı kalınlıkları için yapıştırıcı tabakasında oluşan hasar alanları ön ve arka yüzde yaklaşık olarak birbirlerine eşit olup sırasıyla $t_2 = 0.2$ mm için 175 mm^2 ve $t_2 = 0.5$ mm için ~ 85 mm^2 değerindedir. 1.0 mm yapıştırıcı kalınlığında yapıştırıcı tabakasının ön yüzünde 3.1 mm^2 olan hasar alanı, yapıştırıcının arka yüzünde yaklaşık 10 kat artarak 31.2 mm^2 olarak gerçekleşmiştir. St-Al bağlantıda üst plakada ve alt plakanın ön yüzünde hasar bölgesi görülmemiştir. Alt plakanın alt yüzünde tüm enerji seviyelerinde tüm yapıştırıcı kalınlıkları için



Şekil 2.13. St-St sandviç bindirme bağlantısında 14.68 J enerji seviyesi için üç farklı yapıştırıcı kalınlığında yapıştırıcı tabakasında oluşan hasar bölgeleri (Plaka boyutları mm, yapıştırıcı şekil değiştirme hasar değeri $\varepsilon_{Adh}^{hasar} = 0.1656$).

hasar görülmüştür. Metal bağlantıların darbeyi alan yüzeyinde değil, vurucu ile temas etmeyen arka yüzeyinde oluşan hasarların daha önem arz ettiği St-Al ve St-St bağlantılarında belirgin ortaya çıkmıştır.

En büyük hasarlar St-St bağlantıda görülmüştür. İki çelik plaka arasında sıkışan 0.2 mm kalınlığındaki yapıştırıcı tabaka üzerinde oluşan hasar alanı 1000 mm^2'dir. Bu değer yaklaşık olarak yarı çapı 18 mm olan dairesel bölgeye eşittir. Vurucu yarıçapının 10 mm olduğu düşünülürse yapıştırıcı tabakasında oldukça büyük bir plastik deformasyon olduğu aşikardır.

Yapıştırıcı tabaka üzerinde vurucu çapının yaklaşık 3.6 katı çapa sahip bir bölgede plastik şekil değiştirme değerleri $\varepsilon_{Adh}^{hasar} = 0.1656$ değerinin üzerine çıkmış ve hasara uğramıştır. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcının elastik

olarak depolayabileceği enerji değerleri artmakta, plastik deformasyona uğrayan bölgelerin şekil değiştirme seviyeleri düşmektedir ve hasar alanları genel olarak daralmaktadır. Örneğin, 15 J enerji seviyesinde St-St bağlantıda 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığı için oluşan hasar alanı 1000 mm^2, 0.5 mm için 187.5 mm^2 ve 1.0 mm için 175 mm^2 hasar alanı görülmektedir. Oluşan hasar alanlarının yapıştırıcı tabakası üzerindeki konumu ve hasar alanının geometrisi Şekil 2.13'da verilmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile hasar alanlarında oluşan belirgin düşüşe bir örnek ise, St-Al bağlantısında çelik alt plakada, en yüksek enerji seviyesi 15 J değerinde oluşan hasar alanlarıdır. St-Al bağlantıda $t_2 = 0.2$ mm için 175 mm^2 olan hasar alanı $t_2 = 0.5$ mm için 93.8 mm^2 ve $t_2 = 1.0$ mm için 31.2 mm^2 olarak gerçekleşmiştir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda plaka malzemelerinin elastikiyeti arttıkça, yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan plastik deformasyonlar artmaktadır. Plakaların daha elastik olması ile arada kalan yapıştırıcı tabaka, yükü taşıma konusunda zorlanmakta ve iki elastikiyeti yüksek plaka arasında ezilerek daha fazla plastik deformasyona uğramakta ve oluşan hasar alanları artmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcının kütlesi ve hacmi artmakta, darbeden dolayı birim hacimde enerji miktarı azalmaktadır ve dolayısı ile kalıcı deformasyona uğramış bölge alanları azalmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının tasarımda bir bir üst değere sahip olduğu unutulmamalıdır. Çok kalın yapıştırıcı tabakası yapıştırdığı plakaların birbiri üzerinde düzlem içi kayması ve yüksek düzlem içi kayma gerilmelerine neden olacağı tasarımcılar tarafından bilinen bir sonuçtur.

3. BÖLÜM

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ METAL BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI (DENEYSEL ÇALIŞMA)

3.1. Giriş

Bölüm 1 ve 2'de yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu bölümde ise yapıştırıcı ile birleştirilmiş aynı (Al-Al, St-St) ve farklı (Al-St, St-Al) metal bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarını deneysel olarak irdelenmiştir.

3.2. Yöntem

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarının deneysel değerlendirilmesinde şu adımlar takip edilmiştir:

» Plakaların temini ve uygun boyutlara getirilmesi,

» Yapıştırma ön işlemleri ve plakaların yapıştırılması,

» Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı (Şekil 3.1) ile deneylerin yapılması, işlenmemiş deneysel ham verilerin toplanması,

» Bilgisayar ortamında ham verilerin işlenmesi, görsel sunumların hazırlanması ve

» Darbe sonrası numunelerin hasar analizlerinin yapılması.



Şekil 3.1. Ceast marka Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı.

3.3. Numune Hazırlama

Plakaların temini ve uygun boyutlara getirilmesi ile yapıştırma işlemi için ön hazırlıkların yapılması ve plakaların yapıştırılması adımları bu konu başlığı altında izah edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak alüminyum (Al) ve çelik (St) metal plakalar 2 mm kalınlığında 2000×1000 mm boyutlarında piyasadan temin edilmiştir. Kullanılan alüminyum Al-2024-T0 ve çelik T-304'tür. Büyük boyutta sac olarak temin edilen plakalar giyotin tezgahı kullanılarak 150 × 150 mm boyutlarına doğranmıştır. Doğrama işleminden sonra yapıştırma öncesi 150 × 150 × 2 mm boyutlarında kesilmiş metal plakaların yapıştırıcı arayüzeyi olacak yüzeyleri hegzan

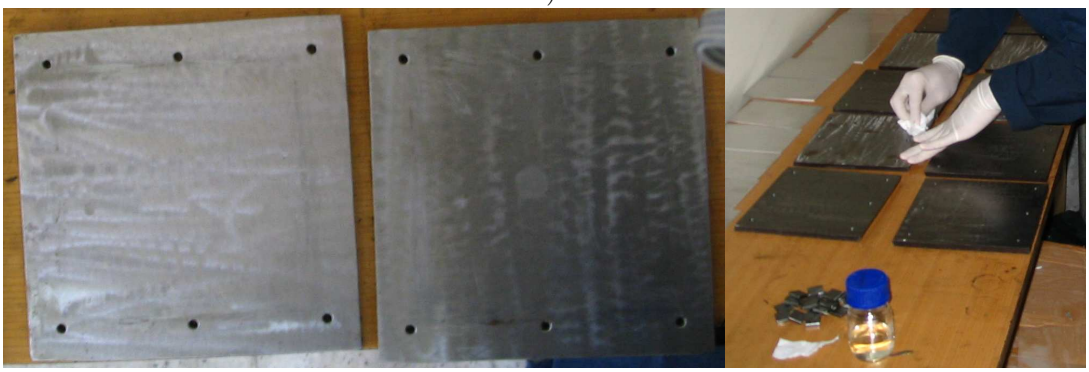
(C_2H_{14}) ile yeterince temizlenmiştir. Hegzan, plakalar üzerinde bulunan yapıştırma kalitesini olumsuz etkileyecek yağ artığı, kir ve toz kalıntılarının giderilmesinde oldukça başarılı sonuç vermiştir. Temizleme operasyonundan sonra plakalar yapıştırılmaya hazır hale gelmiştir.

Yapıştırılması düşünülen plakaların boyutlarının büyük olması nedeniyle plakaların yapıştırılmasında düzgün ve kontrollü bir yapıştırıcı tabakasının elde edilmesi fazladan özen gösterilmesi gereken bir adım olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapıştırma işleminin başarılı olması, kontrollü ve düzgün dağılmış bir yapıştırma tabakasının elde edilmesi amacı ile plakalara baskı uygulayacak, yapıştırıcı tabakasının kalınlığını kontrol altına almaya yarayacak yapıştırma aparatı tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Gerekli ön incelemeler ve çalışmalardan sonra yapıştırma aparatı imalatı yapılmıştır. Yapıştırma aparatı 10 mm kalınlığında alt ve üst olmak üzere iki çelik plakadan oluşan bir aparattır. Yapıştırılacak plakalar ile temas eden yüzeyler hassas bir şekilde talaşlı imalat ile işlenmiştir. Aparat plakalarını birbirine bağlayacak alt plakada iki sıra üçer adet M6 civata deliği, üst plakada ise yine iki sıra üçer adet ϕ6.5 mm'lik delik bulunmaktadır. Aparatın alt ve üst plakaları arasına yerleştirilecek yapıştırılması düşünülen plakalara civatalar sayesinde baskı uygulanması mümkün olmaktadır. Yapıştırma kalınlığını kontrol altına tutma görevini üçer adet civata delikleri arasında kalan boşluklara yerleştirilen 4.2 mm kalınlığında, 20×20 mm boyutlarında çelikten imal edilmiş dört adet kalınlık kontrol parçası yapmaktadır. Yapıştırma işleminde kullanılan aparattan beş takım imal edilmiştir. Bu sayade aynı anda beş adet numune yapıştırılabilmektedir.

Yapıştırılacak plakalar arasına sürülen Araldite 2015 çift fazlı endüstriyel yapıştırıcının oda sıcaklığında en iyi mukavemete sahip tabaka oluşturma süresi ortalama 48 ile 72 saat arasındadır. Yapıştırılan plakalar 72 saat süre zarfında aparat içinde baskı altında tutulmuştur. Plakaların hegzan ile temizlenmiş yapıştırıcı arayüzeylerine sürülen Araldite 2015, bir mala kullanılarak düzgün bir şekilde plaka yüzeyine dağıtılmaktadır. Mümkün olduğunca hava boşlukları ve kabarcıklar giderilmiştir. Fakat yapıştırıcı miktarı el ile ayarlandığı için kütle kontrolü hassas bir şekilde sağlanamamaktadır. Aparat plakaları arasında baskıya uğrayan yapıştırılmış plakaların arasından fazla gelen yapıştırıcı sızmaktadır. Sızma



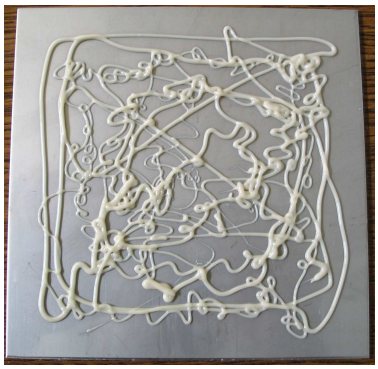
a)



b)



c)



d)

Şekil 3.2. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal plakaların hazırlanışı; a) Yapıştırılacak arayüzeyleri temizlenmiş 150×150×2 mm boyutlarında plakalar, b) Arayüzeyleri temizlenip sıvı parafin ile yağlanan baskı aparatı, c) Tabanca ve karıştırıcı ucu ile çift fazlı Araldite 2015 yapıştırıcının plakalar üzerine sıkılması, d) Yüzeye dağıtılacak yapıştırıcı.

yapan fazlalık yapıştırıcı numuneler açısından bir problem teşkil etmemesine rağmen, yapıştırılmış plakalar ile aparat arasında bağ oluşturmaktadır. Baskı aparatını yapıştırılmış plakalardan kolayca ayırmak ve artan yapıştırıcının aparat üzerinden temizlenmesini kolaylaştırmak amacıyla aparatın plakalar ile temas eden iç yüzeylerine her yapıştırma işleminden önce sıvı parafin sürülmüştür. Sıvı parafin sayesinde artan yapıştırıcı aparat üzerinde artık oluşturmamakta, baskı civataları

açıldıktan sonra yapıştırılmış plakalar kolayca aparat üzerinden alınmaktadır. Bununla birlikte, artan yapıştırıcı miktarı gereğinden fazla olması durumunda oluşan artık yapıştırıcı tabakasının yüzey alanı geniş olmaktadır. Bu durumda aparat üzerinde parafin olmasına rağmen artık yapıştırıcıyı ve yapıştırılmış plakaları aparat üzerinden ayırmak sıkıntılı olabilmektedir. 72 saat aparat arasında kalan yapıştırma işlemi bitmiş numuneler, aparatlardan ayrıldıktan sonra, yan yüzeylerindeki artık yapıştırıcılardan pense yardımı ile temizlenmiştir. Plakaların üzerinde kalan başka bir artık malzeme ise sıvı parafindir. Sıvı parafin havlu, kağıt peçete ve musluk suyu yardımı ile temizlenmiştir. Temizleme işlemi biten numuneler düşük hızlı darbe testi için hazırdırlar. Numune hazırlama adımlarının resimleri Şekil 3.2 'de sunulmuştur.

Al-Al, Al-St, St-Al, St-St bağlantıları için yapıştırma işlemleri yeteri miktarda numune üretilene kadar tekrarlanmıştır. Metal bağlantılar için toplam numune üretme süreci yaklaşık 3 ay sürmüştür. Numune üretimleri bittikten sonra düşük hızlı darbe testlerine geçilmiştir.

3.4. Düşük Hızlı Darbe Testi

Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazı ile deneylerin yapılması ve işlenmemiş deneysel ham verilerin toplanması adımı bu konu başlığı altında incelenecektir. Numunelerin hazırlanma işleminden sonra darbe testlerine geçilmiştir. Darbe testlerinin Fractovis Plus test cihazında gerçekleştirilebilmesi için yapıştırılmış numunelerin cihaza bağlanması gerekmektedir. Cihaz ile birlikte standartlara uygun bağlama aparatı (kare geometrili numunelere uygun) gelmediği için bağlama aparatına ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan araştırmalar sonucu bağlama aparatının nasıl bir yapıya sahip olacağına karar verilmiş ve aparat imalatı yapılmıştır.

Bağlama aparatı yardımıyla yapıştırılmış metal plakalar düşük hızlı darbe test cihazına bağlanmıştır. İstenilen kalitede yapıştırma işlemi gerçekleşmeyen numuneler ön testlerde kullanılmış, oluşan temas kuvvetleri ve tercih edilmesi gereken cihaz ayarları bu safhada gerçekleştirilmiştir. Ön denemeler yapılıp cihazın ayarları yapıldıktan sonra tek bir hamlede bütün bağlantılar Al-Al, Al-St, St-Al ve St-St için düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe testlerinde

Tablo 3.1. Al-Al, Al-St, St-Al, St-St bağlantılarının darbe testlerinde kullanılan darbe enerji seviyeleri.

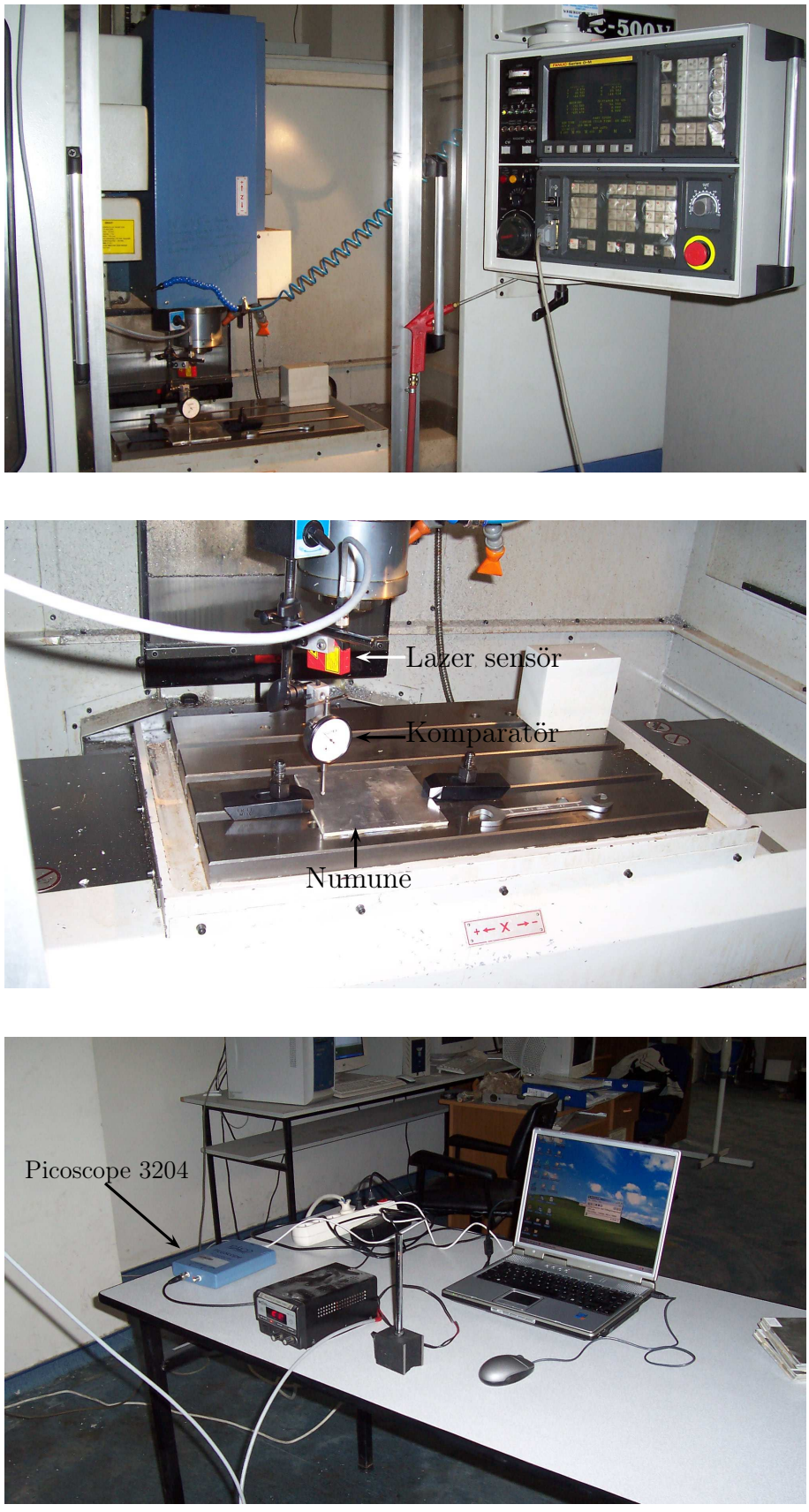
Enerji seviyesi (J)	kütle (kg)	hız (m/s)
28.6	5.045	3.37
40	7.045	3.37
60	7.045	4.13

Tablo 3.1'de verilen enerji seviyeleri kullanılmıştır. Herbir bağlantı tipi ve enerji seviyesi için testler en az iki defa tekrarlanmıştır. Ön iki testen elde edilen temas kuvveti grafikleri birbiri ile benzerlik gösterdikleri takdirde diğer teste geçilmiştir. Yapılan tekrarlı testlerden elde edilen sonuçların birbirine %99 oranında benzemesi hem yapıştırmanın hemde yapılan deneyin sağlıklı olduğunu göstermiştir.

Deneylerden sonra Fractovis Plus düşük hızlı darbe test cihazından elde edilen temas kuvvetinin ve çökmenin zamana göre değişim grafikleri bilgisayar ortamına taşınmıştır. Cihazdan elde edilen temas kuvveti grafikleri doğrudan sensörden (*strain-gauge*) elde edilen veriler olmasına rağmen, çökme miktarlarını cihazın sayısal olarak hesaplaması, çökme miktarlarında farklılıklar ortaya çıkartmıştır. Çökme miktarlarında cihazdan kaynaklanan farklılıklara ileride ayrıntılı bahsedilecektir.

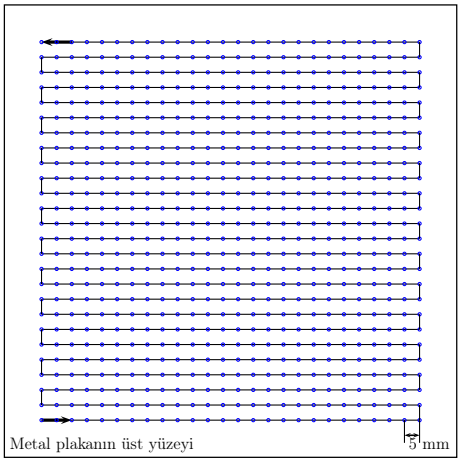
3.5. Bilgisayar Ortamında Verilerin Hazırlanması

Çökme miktarlarının doğru hesaplanabilmesi, deforme olmuş numunenin görsel olarak bilgisayar ortamına taşınabilmesi için numunenin deforme olmuş yüzeyinin koordinatlarının bulunması gerekmektedir. Üç boyutlu koordinatlarının tespiti için üç eksenli CNC tezgahından faydalanılmıştır (Şekil 3.3). Darbe sonrası numunenin arka yüzeyinin (vurucu ile temas etmeyen yüzey) CNC tezgahında yukarı bakacak şekilde ($z+$) sabitlenmesinden sonra tezgahın işmiline bağlanan $\pm$ 0.01 mm hassasiyetli, $0-25$ mm ölçüm aralığına sahip komparatör parçanın yüzeyinde gezdirilmiştir (Şekil 3.4). Gezdirme işlemi CNC ye yazılan zigzag biçiminde yüzeyi tarayacak şekilde tasarlanan bir program sayesinde sağlanmaktadır. Komparatör yüzey üzerinde dolaşırken komparatörün arka tarafındaki mile bağlanan ince bir metal levha üzerinden temassız ölçüm yapabilecek şekilde yine işmiline bağlanmış



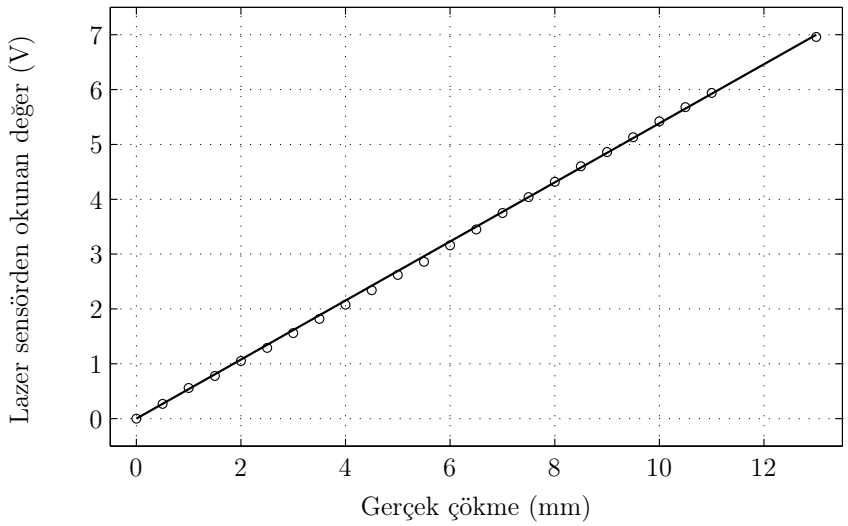
Şekil 3.3. Yapıştırılmış metal bağlantıların darbe sonrası deformasyon yüzeylerinin üç boyutlu olarak çıkartılması.

bir lazer sensör sayesinde komparatörün yer değiştirme değerleri V (volt) cinsinden analog veriye dönüştürülmüştür. Lazer sensörden elde edilen analog değerler Picoscope 3204 veri toplayıcı vasıtasıyla USB portundan bilgisayara dijital veri olarak aktarılmıştır. CNC, x ve y eksenlerinde yaptığı her 5 mm hareketten sonra 1 sn bekleme yapmakta, bu sırada Picoscope 3204 veri toplayıcı devreye girmekte, lazer sensörden gelen analog bilgiyi okumakta ve dijital olarak yine volt cinsinden bilgisayara aktarmaktadır. Daha sonra aynı düzenek kullanılarak kalibrasyon amacı ile doğrudan tabla üzerinde 0-13 mm arasında her 0.5 mm için komparatör üzerinden lazer sensör ile değerler alınmış ve bu veriler sayesinde numune üzerinden alınan gerilim (volt) verileri gerçek çökme değerlerine dönüştürülmüştür. Kalibrasyon için toplanan verilerin grafiği Şekil 3.5'te görülmektedir. Komparatör, lazer sensör ve veri toplayıcı oldukça başarılı, lineer bir eğri elde edilmesini sağlamıştır. Bu lineerlik komparatörün ve lazer sensörün iyi çalıştıklarını ve hassas olduklarını göstermektedir.



Şekil 3.4. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantılar üzerinden ölçüm yapılan noktalar kümesinin (ızgara) şematik gösterimi, toplam 676 nokta.

Numunelerden elde edilen deformasyon yüzeyleri bilgisayar ortamında Matlab yazılımı yardımıyla filtrelenmiş ve kesit alınabilecek, kontür çizilebilecek üç boyutlu matrise dönüştürülmüştür.



Şekil 3.5. Üç boyutlu deformasyon yüzeyi taranırken kullanılan lazer sensör ve komparatörden elde edilen kalibrasyon eğrisi.

3.6. Darbe Sonrası Analizler

Deformasyon eğrilerinin elde edilmesinin ardından darbe sonrası numunelerin yapıştırıcı tabakasında ve iç yüzeyde meydana gelen hasarları incelemek amacı ile kesitlerinin alınması ve mikroskop altında incelenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu amaçla numuneler tam vurucunun temas ettiği orta nokta referans alınacak şekilde iki parçaya bölünmüştür. Bölme işleminin sağlıklı olması ve elde edilen kesitin kesme taşından zarar görmemesi amacı ile parçalar epoksiyle kalıplanmıştır. Epoksi içine tamamen batan numunelerin epoksinin kurumasından yaklaşık 24 saat sürmüş ve kurumasından sonra kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. İnceleme yapılacak yarım parçanın üzerinde yaklaşık 1 mm kadar pay bırakılmış, daha sonra bu pay zımpara vasıtasıyla alınmıştır. Zımpara ile parlatma sırasında kaba zımparadan ince zımparaya doğru adım adım uygulama yapılmıştır. Kesit yüzeyin mikroskop altında kaliteli görüntü sunması sağlanana kadar parlatma işlemi hassas bir şekilde uygulanmıştır. Parlatma işleminin ardından makroskop ve mikroskop altında gerekli görüntüleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

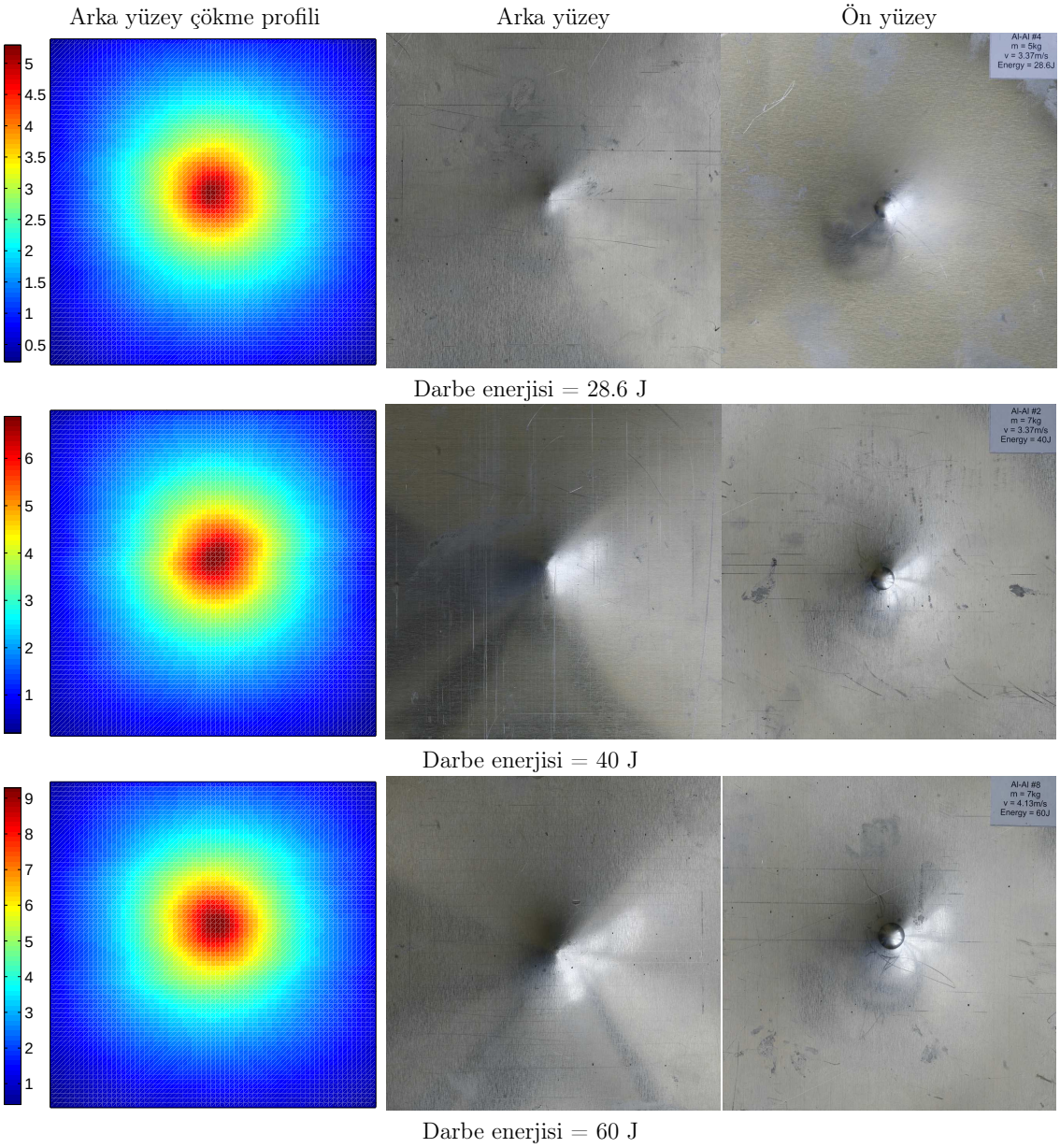
3.7. Sonuçlar

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal plakalardan (Al-Al, Al-St, St-Al, St-St) oluşan numunelerin hazırlanması, düşük hızlı darbe testlerinin yapılması ve elde edilen bilgilerin bilgisayar ortamına taşınmasından sonra yapılan değerlendirmelerin sunumu bu başlık altında yapılacaktır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal bağlantıların darbe sonrası deformasyon yüzeyleri CNC kullanılarak elde edilmiştir. Üç farklı enerji seviyesi için elde edilen deformasyon yüzeyleri Al-Al, Al-St, St-Al, St-St için sırasıyla Şekil 3.6-3.9'de verilmiştir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş Al-Al bağlantıların düşük hızlı darbe sonrası deformasyon yüzeyleri sırasıyla 28.6, 40 ve 60 J enerji seviyeleri için Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Al-Al bağlantıda düşük enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine doğru sırasıyla en büyük çökme miktarı 5.3, 6.9 ve 9.3 mm olarak gerçekleşmiştir. Darbe enerjisinin %109 artarak 28.6 J'den 60 J'e çıkması ile en büyük çökme değerinde %75 artış görülmüştür. Teorik çalışmalarda olduğu gibi en fazla çökme Al-Al bağlantıda 60 J enerji seviyesinde 9.3 mm olarak gerçekleşmiştir. Düşük enerjiden yüksek enerji seviyesine doğru vurucunun metal plaka üzerinde yaptığı iz belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. 60 J enerji seviyesinde ϕ20 mm çaplı vurucunun hemen hemen yarısı plakaya nüfuz etmiştir.

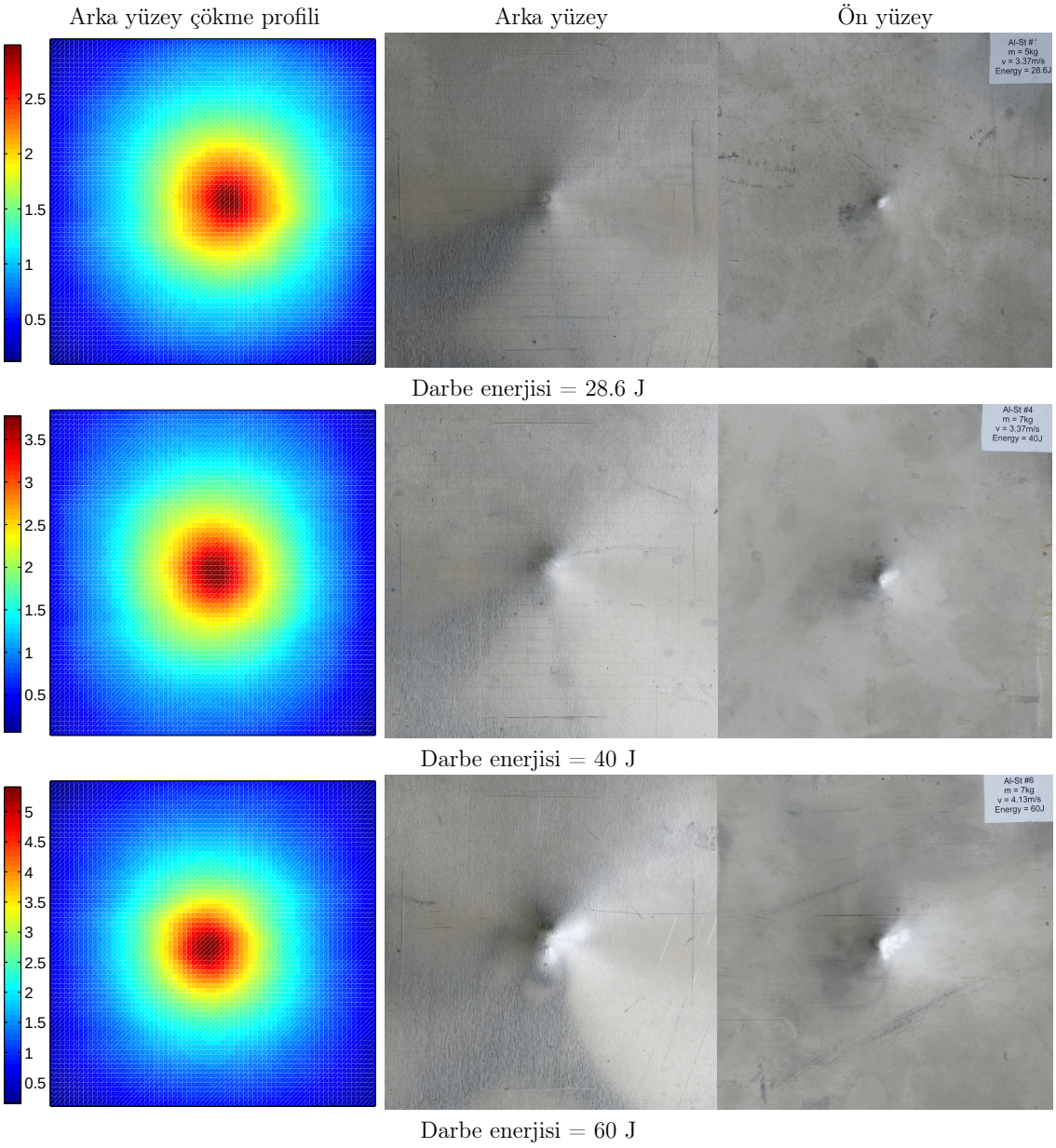
Al-St ve St-Al bağlantıların darbe testi sonrası en büyük çökme değerleri teorik analizlerde olduğu gibi birbirine yakın değerlere sahiptir (Şekil 3.7-3.8 ve 3.10). Her iki bağlantıda üç farklı enerji seviyesi için düşük enerjiden yüksek enerjiye doğru elde edilen büyük çökmenin yaklaşık değerleri sırasıyla 3, 3.9 ve 5.4 mm olarak gerçekleşmiştir. Al-St bağlantıda vurucu ile temas eden çelik plaka üzerinde vurucunun bıraktığı iz, plakanın çelik olması sebebiyle St-Al bağlantısına göre daha az belirgindir. Ancak Al-St bağlantıda alüminyum arka plakada meydana gelen şekil değiştirmiş yüzeyler daha yumuşak hatlara sahiptir (Şekil 3.7). St-Al bağlantıda üst plaka alüminyum olup vurucu ile temas halinde olan ilk plakadır. Alüminyum plaka



Şekil 3.6. Al-Al bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm).

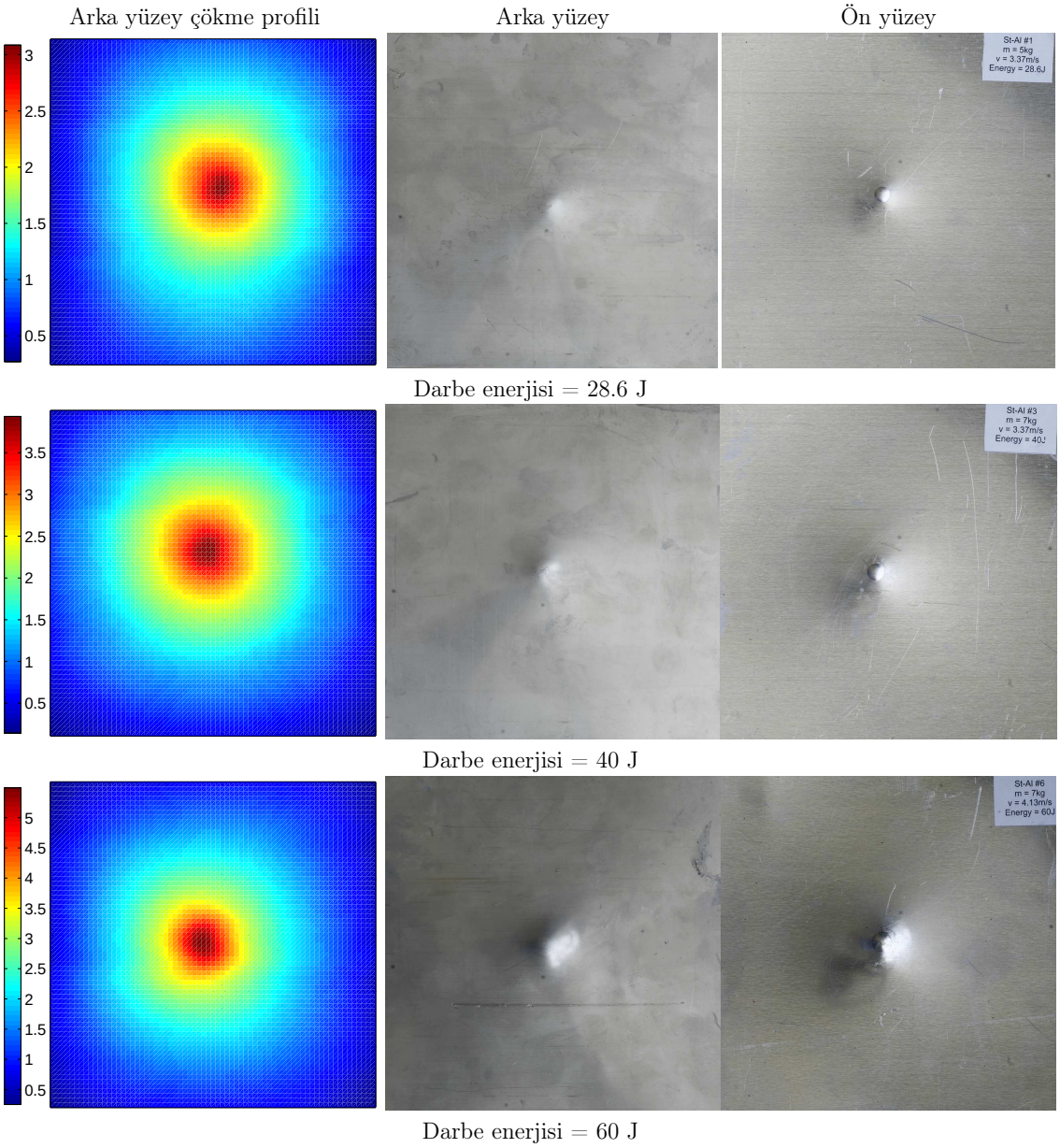
sünek özelliklere sahip olduğu için vurucunun plaka üzerindeki izleri daha belirgindir (Şekil 3.8). İki bağlantıda oluşan iz geometrileri arasında ner nekadar fark olsada; en büyük çökme değerlerinde fark yok denecek kadar azdır.

St-St bağlantıda meydana gelen çökme değerleri elde edilen en düşük çökme değerleridir. Tüm deneylerde en düşük çökme değeri St-St bağlantıda 28.6 J enerji seviyesinde 1.4 mm olarak tespit edilmiştir. En büyük enerji seviyesinde St-St bağlantıda oluşan en büyük çökme değeri ise 3.4 mm seviyesindedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.7. Al-St metal bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm).

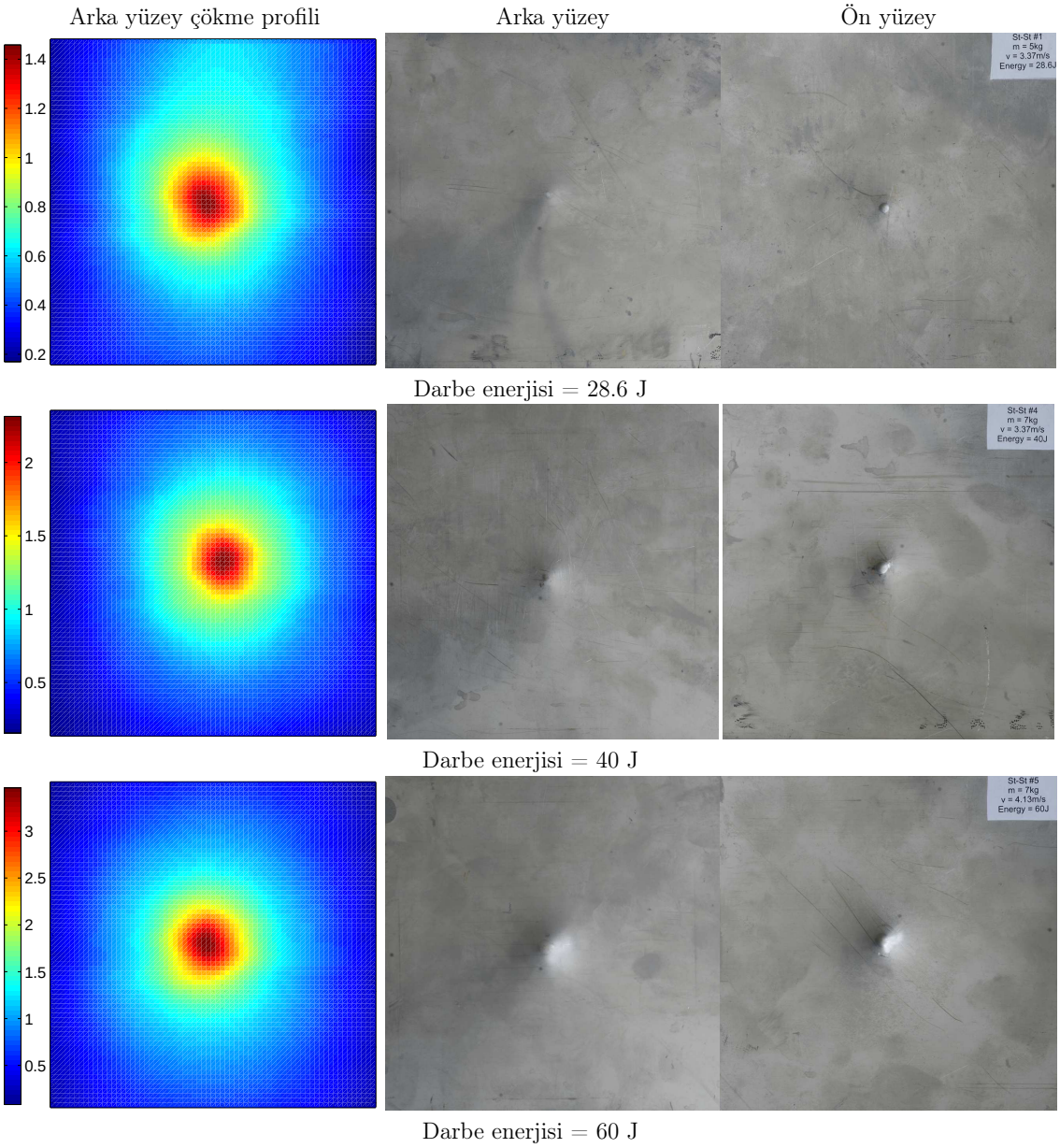
St-St bağlantıda en büyük enerji seviyesinde meydana gelen çökme değeri Al-Al bağlantının en düşük enerji seviyesinde meydana gelen çökme değerinin yaklaşık %65'i seviyesindedir. Diğer iki bağlantının ise en düşük enerji seviyesinde meydana gelen çökme değerlerinden çok az yüksektir. St-St bağlantının ön yüzünde 28.6 J'lük darbe enerjisinde oluşan vurucu izi oldukça küçüktür. Arka yüzeyde meydana gelen deformasyon fark edilmeyecek seviyededir. Enerjinin artması ile vurucunun izi belirginleşmekte, oluşan çökme değerleri artmaktadır.



Şekil 3.8. St-Al metal bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm).

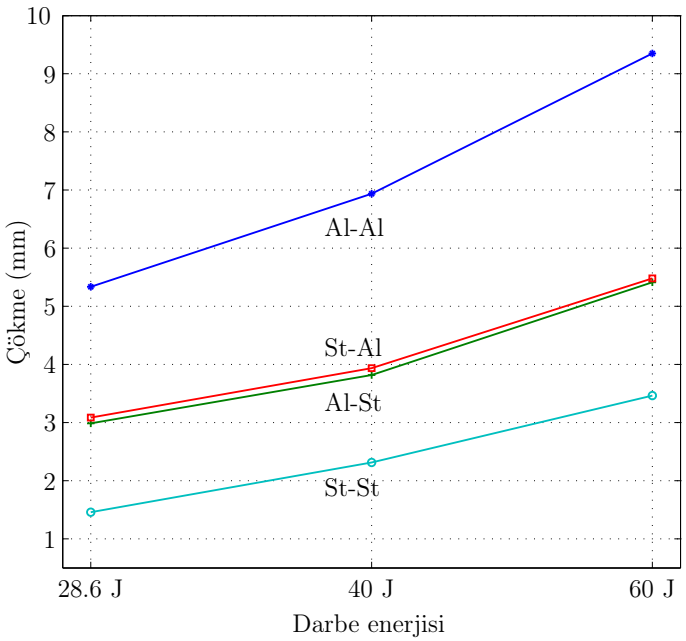
Metal sistemlerin Fractovis Plus darbe test cihazı ile yapılan düşük hızlı darbe testleri sonrasında cihazdan alınan temas kuvveti, yer değiştirme ve kinetik enerjinin zamana göre değişimleri ve deneysel temas kuvvetleri ile ABAQUS®'den elde edilen teorik temas kuvvetlerinin üç farklı enerji seviyesi için kıyaslama grafikleri Al-Al için Şekil 3.11-Şekil 3.12'de, Al-St için Şekil 3.13-Şekil 3.14'de, St-Al için Şekil 3.15-Şekil 3.16'de ve son olarak St-St için Şekil 3.17-Şekil 3.18'de verilmiştir.

Deneysel temas kuvvetleri Al-Al bağlantısında incelecek olur ise, düşük darbe



Şekil 3.9. St-St metal bağlantıların darbe sonrası CNC ile elde edilen deformasyon yüzeyleri (deformasyon seviyeleri mm).

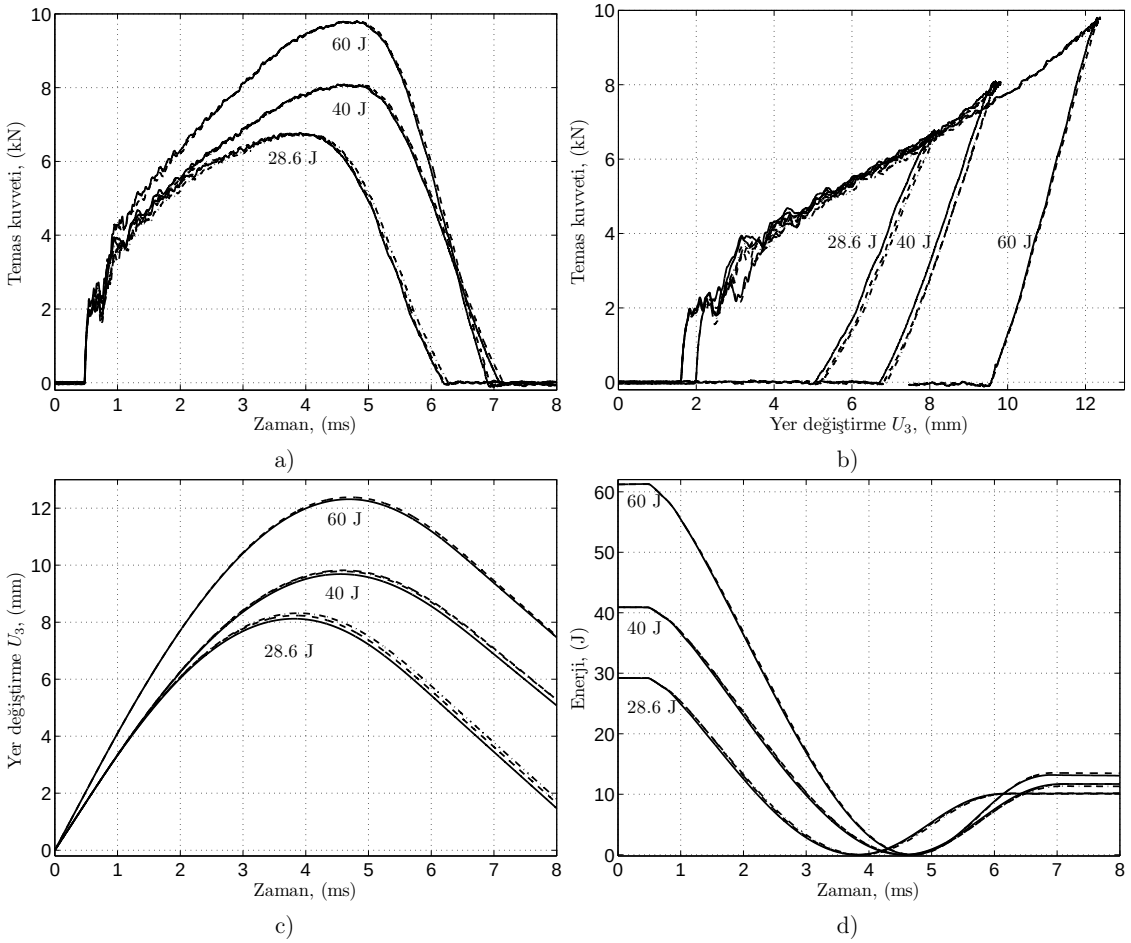
enerjisinden yüksek darbe enerjisine doğru sırasıyla en büyük temas kuvveti 6.5, 8 ve 9.8 kN olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3.11-a). 28.6 J enerji seviyesinde toplam temas süresi 5.7 ms olarak Al-Al sistemi için en düşük değerini almıştır. 40 ve 60 J enerji seviyelerinde toplam darbe süreleri bir birine yakın değerlerde olup (6.5 ms), beklenenin aksine 60 J enerji seviyesinde 40 J'a göre daha küçük değere sahiptir. Şekil 3.11-b 'de Al-Al bağlantı için temas kuvvetinin - yer değiştirmeye karşı değişimi görülmektedir. Belirtildiği üzere test cihazından alınan çökme miktarları gerçek değerleri yansıtmadığı, bu grafikten ve Şekil 3.11-c grafiğinden görülmektedir.



Şekil 3.10. Al-Al, Al-St, St-Al, St-St metal bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde elde edilen deneysel en büyük çökme miktarları.

Darbe sonrası numune üzerinden yapılan ölçümlerde yer değiştirme değerleri enerji seviyesine göre sırasıyla 5.3, 6.9 ve 9.3 mm tespit edilmişken, cihazdan alınan değerler sırasıyla 8.1, 9.8 ve 12.2 mm 'dir. Ama sunulan grafiklerden bağlantının genel karakteristiği ve çökme davranışı hakkında bilgi edinilmektedir. Şekil 3.11-d 'de görüldüğü üzere yine test cihazının doğrudan ölçüm yapmadığı fakat sayısal hesap ile elde edilen kinetik enerji değişimleri temas kuvvetine uyumlu davranmakta, düşük enerji seviyesinde geri verilen kinetik enerji düşük, yüksek enerji seviyesinde geri verilen kinetik enerji yüksek tespit edilmektedir.

Al-Al bağlatının üç farklı enerji seviyesi için elde edilen teorik ve deneysel temas kuvvetlerinin kıyaslanması Şekil 3.12'de görülmektedir. Test cihazından alınan verilerden sadece temas kuvveti doğrudan sensör üzerinden alındığı için deneysel-teorik kıyaslama sadece temas kuvvetleri açısından yapılmıştır. Üç enerji seviyesi içinde elde edilen teorik-deneysel temas kuvvetleri arasındaki farklar çok olmamakla birlikte, ABAQUS®'den elde edilen değerler en büyük temas kuvveti açısından deneysel değerlerden $\%5 - \%10$ fazla, toplam temas süresi açısından ise ortalama 1.5 ms azdır. Al-Al bağlantı için elde edilen teorik sonuç başarısı ortadadır.



Şekil 3.11. Al-Al bağlantılarının üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi.

ABAQUS®'de modelleme yapılırken kullanılan malzemelere ait tanımlama ve bilgilerin elde edilen teorik sonuçları gerçeğe oldukça yaklaştırdığı görülmektedir.

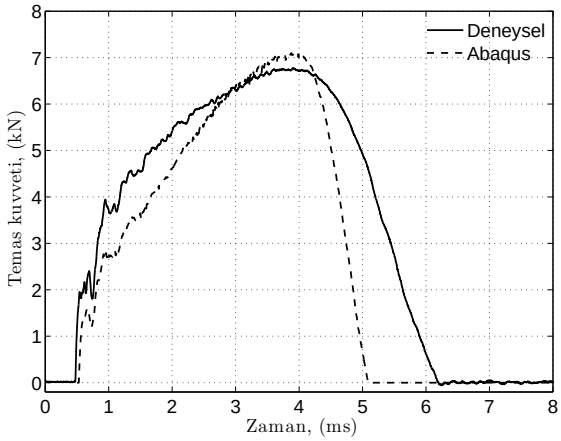
Al-St bağlantının düşük hızlı darbe davranışlarının deneysel sonuçları ve deneysel-teorik kıyaslaması Şekil 3.13-3.14 'de sunulmuştur. Temas kuvvetinin zamana göre değişim grafiği incelendiğinde 28.6 J darbe enerjisinden en büyük temas kuvveti 9.2 kN, 40 J darbe enerjisinde 11.8 kN ve 60 J darbe enerjisinde 13.9 kN olarak gerçekleşmiştir (Şekil 3.13-a). Temas kuvveti elastik bölgede 3.5 kN seviyesine dikey olarak çıkmakta, daha sonra plastik deformasyonların etkisi ile salınım başlamakta ve yaklaşık düzenli bir artış ile zirveye varmaktadır. Nüfuziyet eğrisi, ayrılma eğrisine göre daha fazla eğime sahiptir. Vurucu en fazla nüfuziyeti yapması ve geri dönüşe başlaması 28.6 J darbe enerjisinde 2.5 ms, 40

ve 60 J darbe enerjilerinde yaklaşık 3 ms sürmüştür. Geri dönüş zamanları ise sırasıyla 2, 2.2 ve 2 ms olarak tespit edilmiştir (Şekil 3.13-d). Al-Al bağlantıda olduğu gibi Al-St bağlantıda cihaz tarafından tespit edilen yer değiştirme değerleri gerçekte oluşan çökme değerlerinden farklılık göstermektedir, Ancak hakkında bilgi vermesi açısından yer değiştirme ve kinetik enerji değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.13-c ve d'de sunulmuştur.

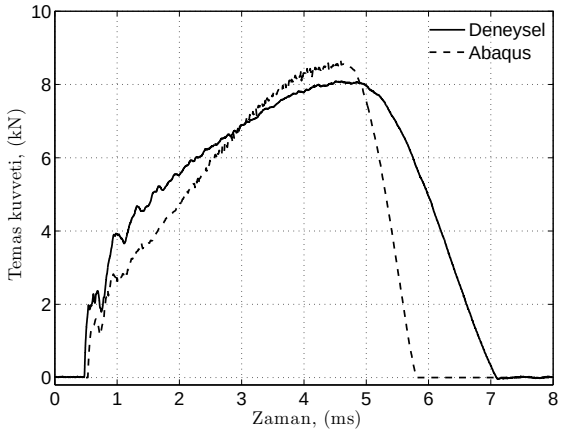
Al-St bağlatının darbe sonrası temas kuvvetlerinin teorik-deneysel kıyaslaması Şekil 3.14 'de verilmiştir. Plakanın birinin çelik olması ile Al-Al bağlantıda elde edilen teorik-deneysel yakınlık başarısı Al-St bağlantıda kötüleşmiştir.Her üç enerji seviyesinde teorik-deneysel temas kuvvetleri arasında $\%18 - \%22$ fark oluşmuştur. 28.6 J enerji seviyesinde deneysel olarak 9.2 kN olan en büyük temas kuvveti, teorik olarak bilgisayar ortamında ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımı ile 11.8 kN olarak hesaplanmıştır. Aradaki fark %22'dir. 40 J enerji seviyesinde deneysel olarak 11.8 kN olan en büyük teorik temas kuvveti %15 farkla 13.9 kN bulunmuştur. 60 J enerji seviyesinde ise en büyük temas kuvveti %18 farkla deneysel olarak 13.9 kN teorik olarak 17 kN tespit edilmiştir. Her üç enerji seviyesinde teorik temas kuvvetleri deneysel temas kuvvetlerine göre daha dik nüfuziyet ve ayrılma eğrilerine sahiptir. Toplam temas süreleri açısından teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında ortalama 1.5 ms fark vardır. Teorik toplam temas süreleri daha kısadır. St-Al bağlantısının darbe davranışı Al-St bağlantısına oldukça benzerlik göstermektedir (Şekil 3.14 ve 3.15).

St-St bağlantı, her iki plakanın da çelik olması sebebi ile hem teorik hem de deneysel en büyük temas kuvvetlerinin ve en kısa toplam temas süresinin kaydedildiği bağlantı olmaktadır (Şekil 3.13-3.14). Deneysel en büyük temas kuvveti 16.2 kN ile 60 J darbe enerjisinde St-St bağlantıda gözlenmiştir. 40 J enerji seviyesinde 14 kN, 28.6 J enerji seviyesinde ise 11.6 kN olarak deneysel temas kuvvetleri tespit edilmiştir. Temas kuvveti elastik bölgede 4.4 kN seviyesine dikey olarak erişmiş, 10-12 kN seviyesi arasına kadar yine büyük bir eğime sahip olmuş, daha sonra ise zirveye kadar eğimini kaybetmiştir. Diğer metal sistemlerde olduğu gibi temas süresi açısından zirveye çıkış zamanı ayrılma zamanından uzundur. Bunu sebebi, vurucunun nüfüziyet sürecince harcanan enerjilerden kinetik enerji ve

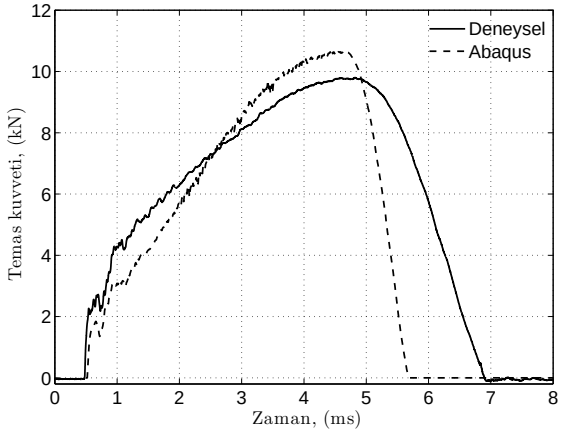
elastik şekil değiştirme enerjisi vurucunun ayrılma sürecinde sistemin bütününe geri aktarılmıştır. Ancak plastik deformasyonlara harcanan enerji bağlantı üzerine kalıcı şekil değişimi olarak kalmıştır. Dolayısıyla, nüfuziyet sürecinde kullanılan toplam enerji ayrılma sürecindeki toplam enerjiden fazladır ve nüfuziyet sürecinin toplam süresi, ayrılma sürecinin toplam süresinden fazladır.



a) $E_1 = 28.6$ J $\rightarrow m = 5$ kg, $v = 3.37$ m/s

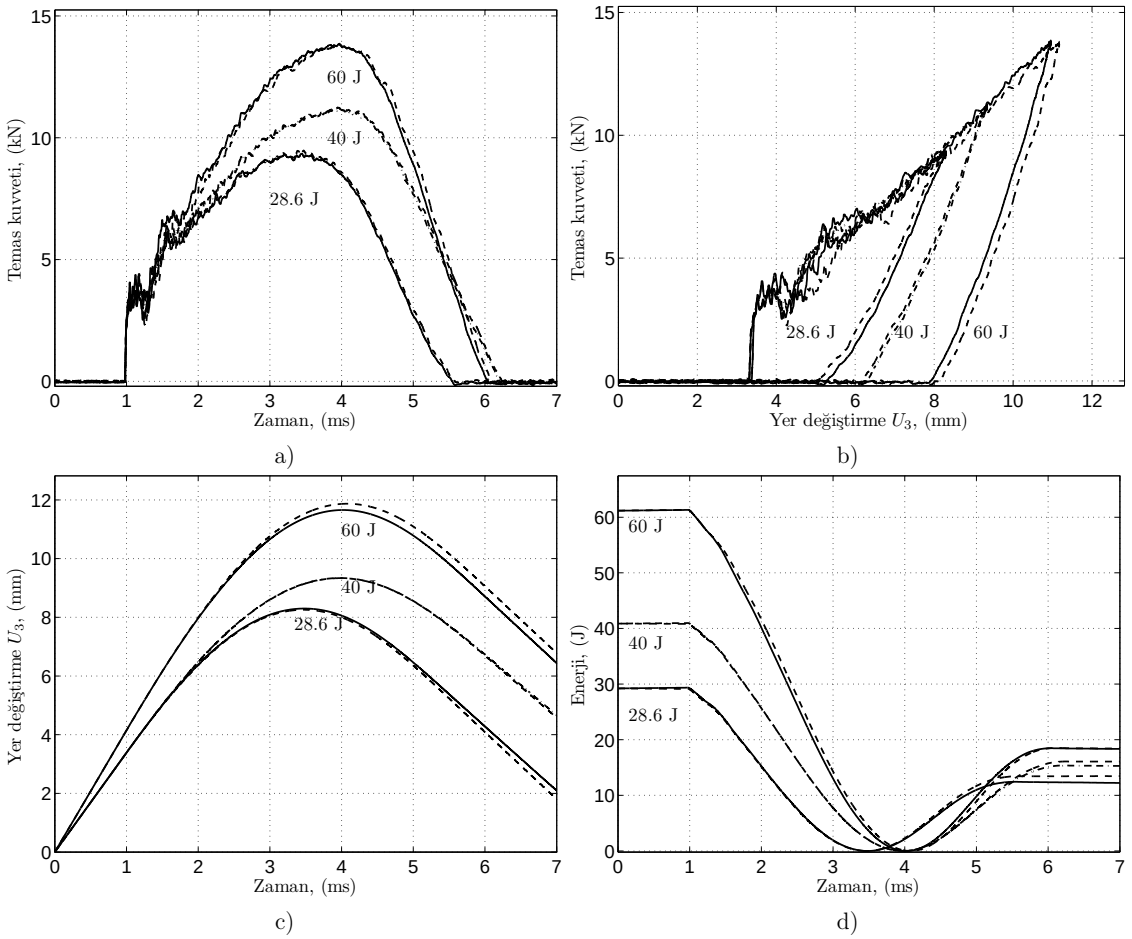


b) $E_2 = 40$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 3.37$ m/s



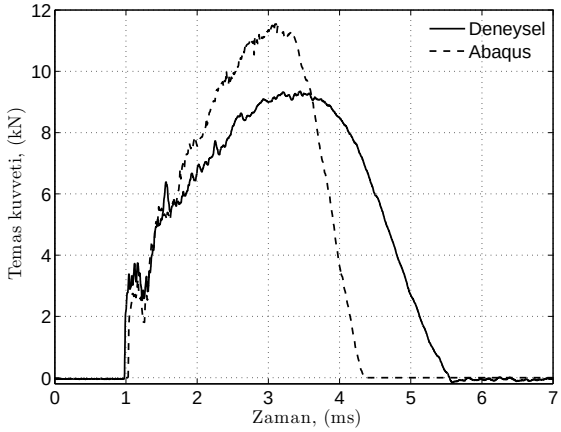
c) $E_3 = 60$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 4.13$ m/s

Şekil 3.12. Al-Al bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri.

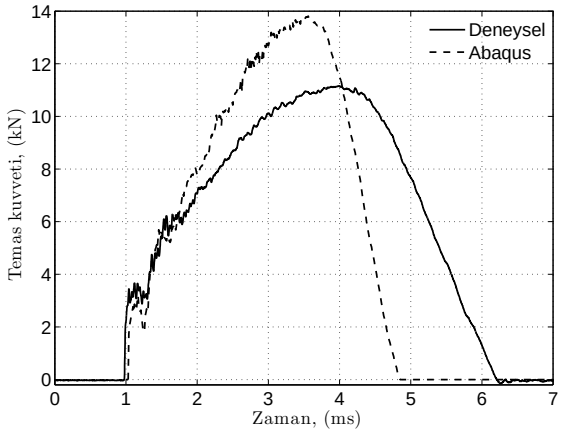


Şekil 3.13. Al-St bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi.

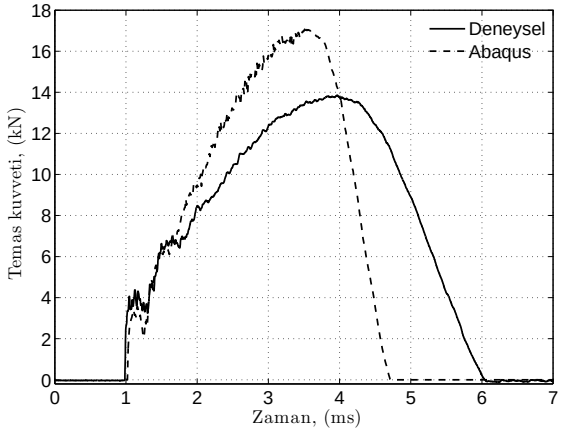
Her iki plakanın çelik olduğu St-St bağlantının deneysel ve teorik temas kuvvetleri Şekil 3.18 'de karşılaştırılmıştır. Al-Al bağlantıdaki deneysel ve teorik sonuçların uyuşma başarısı St-St bağlantıda da kötüleşmektedir. Düşük enerjiden yüksek enerji seviyesine doğru en büyük temas kuvvetleri mukayese edilirse, deneysel ile teorik sonuçlar arasında %19, %19 ve %23 fark görülmektedir. Enerjinin artması aradaki farkı daha belirginleştirmiştir. 60 J enerji seviyesinde en büyük deneysel temas kuvveti 16.2 kN iken teorik olarak 21 kN değerindedir. Toplam temas süresi bakımından diğer üç metal bağlantıda olduğu gibi teorik hesaplanan süre deneysel elde edilen süreden kısadır. St-St bağlantıda düşük enerji seviyesinde 1.4 ms olan teorik-deneysel temas süresindeki fark, 60 J darbe enerjisinde 1.2 ms olmuştur. St-St bağlantıda teorik ve deneysel temas kuvvetlerinin arasında açık farklar olmasına



a) $E_1 = 28.6$ J $\rightarrow m = 5$ kg, $v = 3.37$ m/s



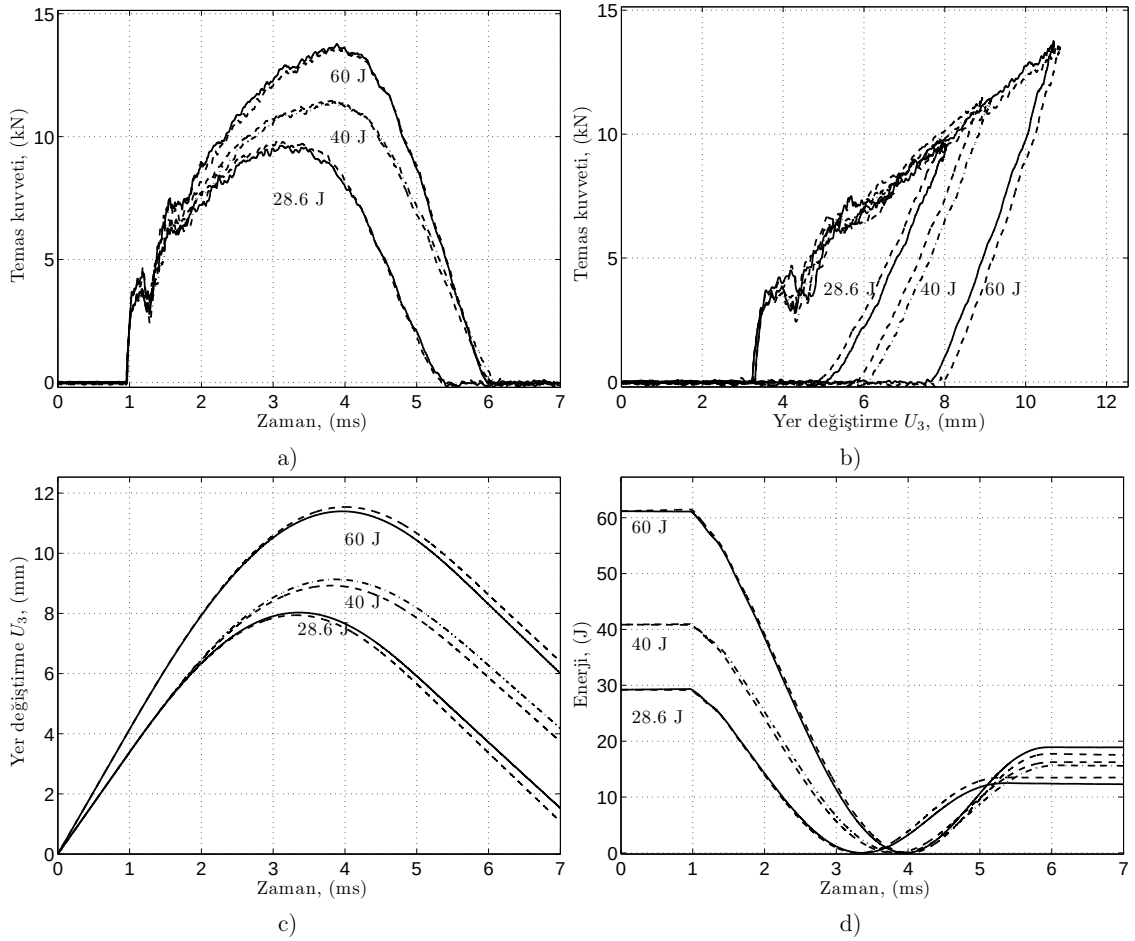
b) $E_2 = 40$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 3.37$ m/s



c) $E_3 = 60$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 4.13$ m/s

Şekil 3.14. Al-St bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri.

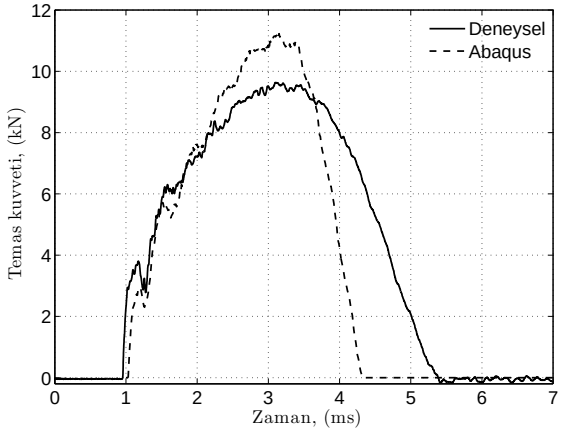
rağmen temas kuvvetinin karakteristiği benzerdir. Örneğin, 28.6 J enerji seviyesinde temas kuvvetlerinin karşılaştırılırsa (Şekil 3.18), 5 kN seviyesine kadar ortak eğri, daha sonra temas kuvvetinde bir dalgalanma, 10 kN değerine kadar tekrar paralel bir eğri ve tekrar 10 kN değerinde temas kuvvetinde bir dalgalanma söz konusudur.



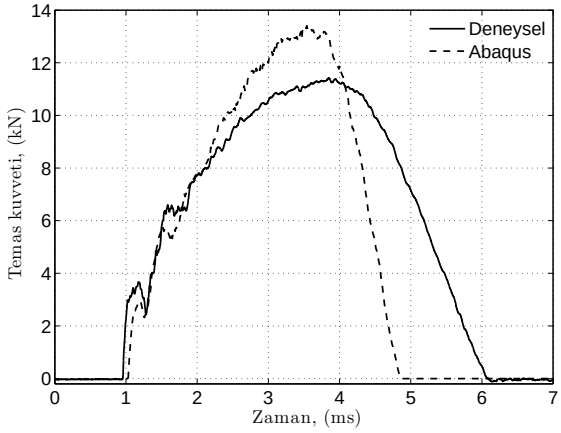
Şekil 3.15. St-Al bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi.

Diğer iki enerji seviyesinde benzer temas kuvveti değişimleri gözlemlenmiştir.

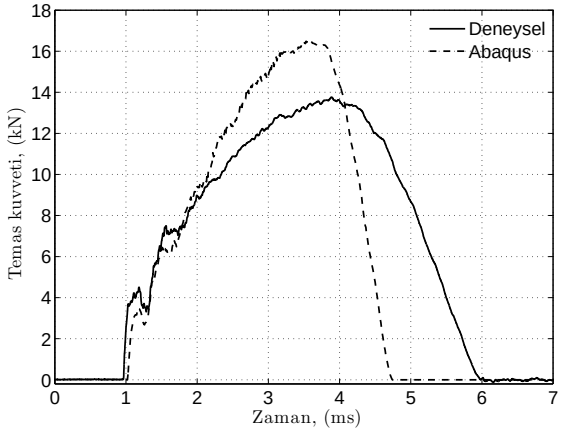
Teorik ve deneysel sonuçlar çelik plakalar için darbe analizlerinde elastikiyet bozunumunun (*degradation*) dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Çelik plakanın malzeme özellikleri ABAQUS® yazılımında tanımlanırken, belirli bir gerilme ya da şekil değiştirme değerinden sonra gerçekte olduğu gibi elastikiyetini kaybetmediği ve halâ mukavim davrandığı, temas kuvvetinin halâ artmasına sebep olduğu görülmektedir. Ayrıca temas kuvveti artarken toplam temas süresi de kısalmaktadır. Teorik ve deneysel sonuçların arasındaki bu farkın ana sebebini dikkate almak için elastikiyet bozunumunun modellenmesi gerekir. Elastikiyet bozunumunu ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar ileride irdelenecektir. Darbe deneylerinden sonra numuneler üzerinde iç yapı hasarlarının tespitine çalışılmıştır. Bu amaç ile



a) $E_1 = 28.6$ J $\rightarrow m = 5$ kg, $v = 3.37$ m/s



b) $E_2 = 40$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 3.37$ m/s

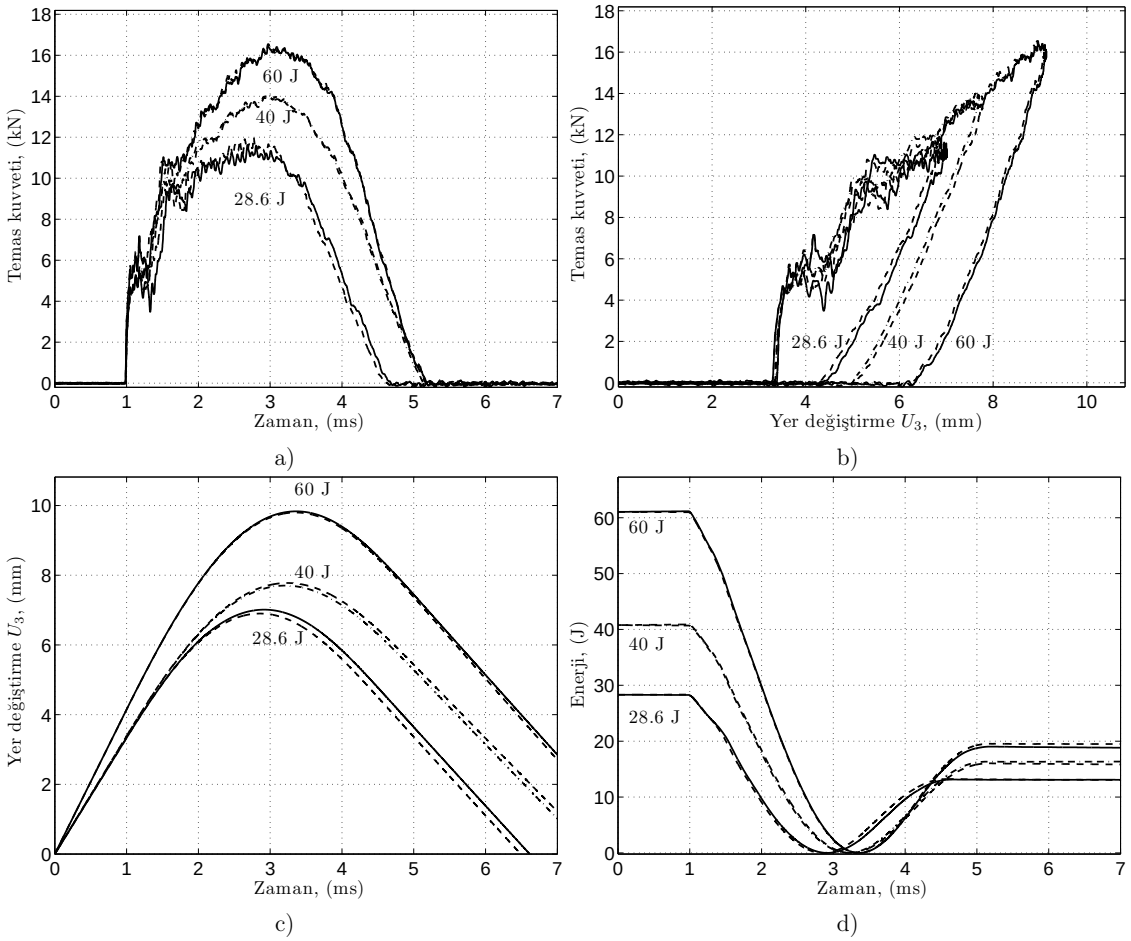


c) $E_3 = 60$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 4.13$ m/s

Şekil 3.16. St-Al bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri.

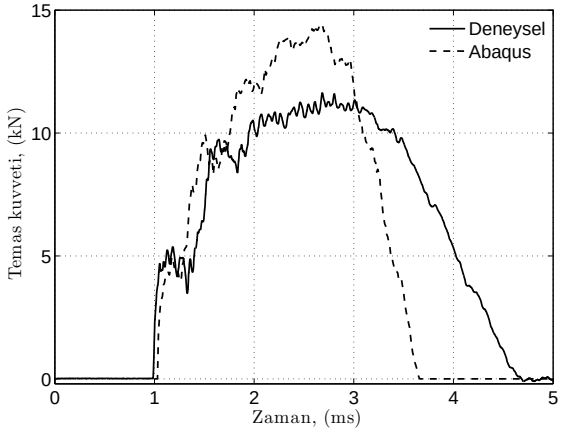
numune kesitleri mikroskop altında incelenmiştir.

Al-Al bağlantının darbe testi sonrasında numune kesitlerinin makro ölçekli resimleri düşük enerji seviyesi için (E = 28.6 J) Şekil 3.19-a'da ve yüksek enerji seviyesi için (E = 60 J) Şekil 3.19-b 'de gösterilmiştir. Kesitler plakaların darbeye maruz kalmış

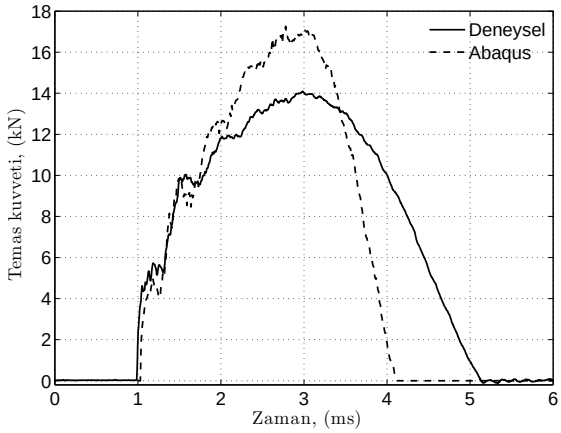


Şekil 3.17. St-St plakaların bindirme bağlantılarının üç farklı enerji seviyesinde darbe davranışları, a) Temas kuvvetinin zamana göre değişimi, b) Temas kuvveti-yer değiştirme değişimi, c) Yer değiştirmenin zamana göre değişimi, d) Darbe enerjisinin zamana göre değişimi.

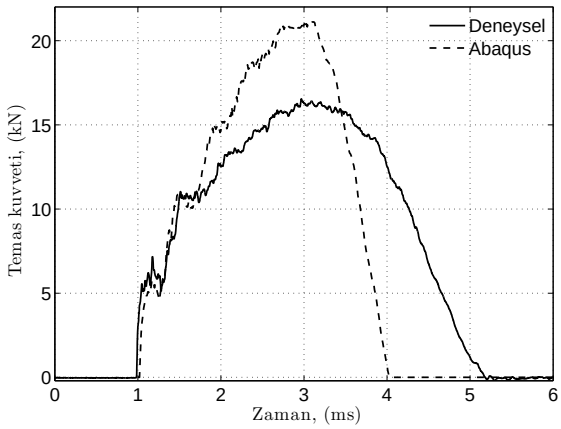
orta bölgesinden alınmıştır. Vurucu ile temas eden üst plakada vurucunun yaptığı deformasyon belirgindir. Yüksek enerji seviyesi bu deformasyonu artırmaktadır. Her iki enerji seviyesinde de yapıştırıcı ile plakalar arayüzeyinde ayrılma görülmektedir. Düşük enerji seviyesinde ayrılma vurucunun temas ettiği bölgenin altında, alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde, gerilmenin yön değiştirdiği vurucunun çevresine denk gelen kısımlarda ise üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde görülmüştür. Yüksek enerji seviyesinde ise vurucu altındaki bölgede hem alt plaka hemde üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ayrılma görülmektedir. Orta bölgeden kenarlara doğru ilerledikçe (Şekil 3.19-b - 6 numaralı resim) yapıştırıcı tabakasında yapıştırma sırasında oluşan üretim hatası (boşluk) nedeni ile üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyindeki ayrılma bu hata boyunca ilelemiş ve alt plaka-arayüzeyinden devam etmiştir. Sol tarafta ise



a) $E_1 = 28.6$ J $\rightarrow m = 5$ kg, $v = 3.37$ m/s



b) $E_2 = 40$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 3.37$ m/s

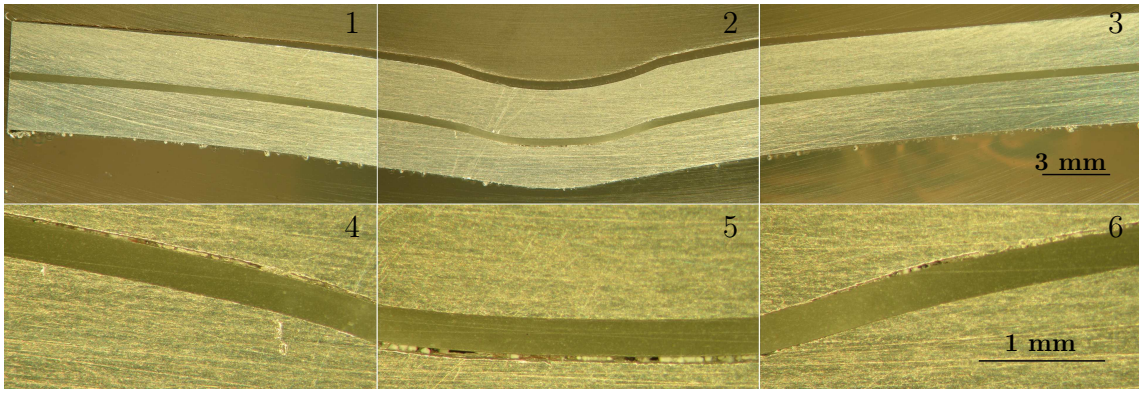


c) $E_3 = 60$ J $\rightarrow m = 7$ kg, $v = 4.13$ m/s

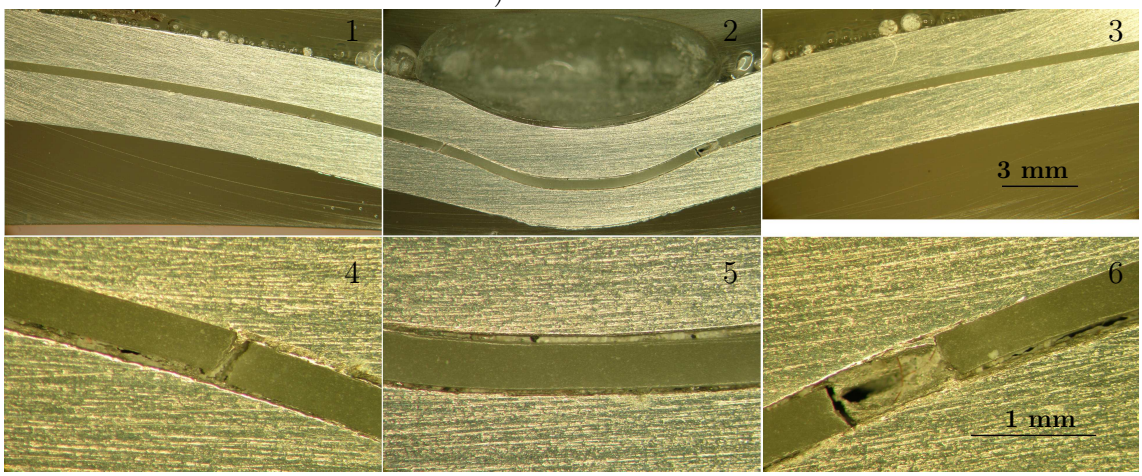
Şekil 3.18. St-St bağlantıların üç farklı enerji seviyesinde deneysel ve teorik temas kuvveti değişimleri.

(Şekil 3.19-b - 4 numaralı resim) yapıştırıcı tabakasında üretim hatası olmadığı halde üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyindeki ayrılma yapıştırıcı tabakasında çatlak oluşturarak alt tabaka-yapıştırıcı arayüzeyinden ayrılmaya devam etmiştir.

Vurucunun altındaki üst plakanda kalınlık boyunca meydana gelen incelme vurucu



a) $E = 28.6$ J

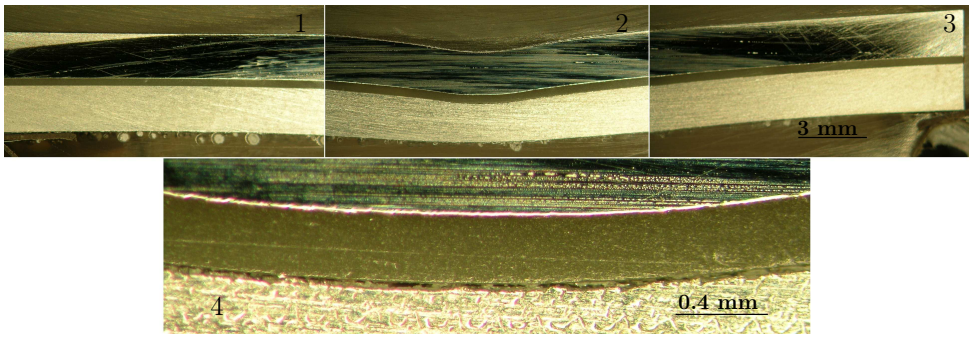


b) $E = 60$ J

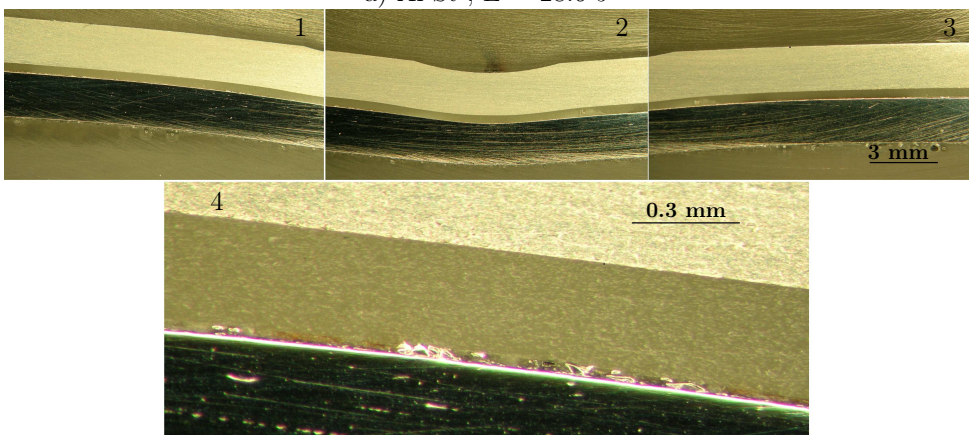
Şekil 3.19. Darbe sonrası Al-Al bağlantının makro kesit resimleri.

altındaki bölgeden yanlara doğru ilerlerken azalmakta ve normal gerilmenin yön değiştirdiği düşünülen bölgeden sonra plaka kalınlığı yaklaşık ilk halini korumaktadır (Şekil 3.19-b - 2 numaralı resim). Fakat alt plakada vurucu hizasındaki bölge üst plakaya göre daha fazla incelmiştir. Alt plaka üzerinde düzlem içi çekme kuvvetlerinin daha etkin olduğuna işaret etmektedir. Yapıştırıcı tabakasının düşük enerji seviyesinde bütünlüğünü koruduğu, yüksek enerji seviyesinde yapıştırıcıda kırılmaların olduğu görülmektedir.

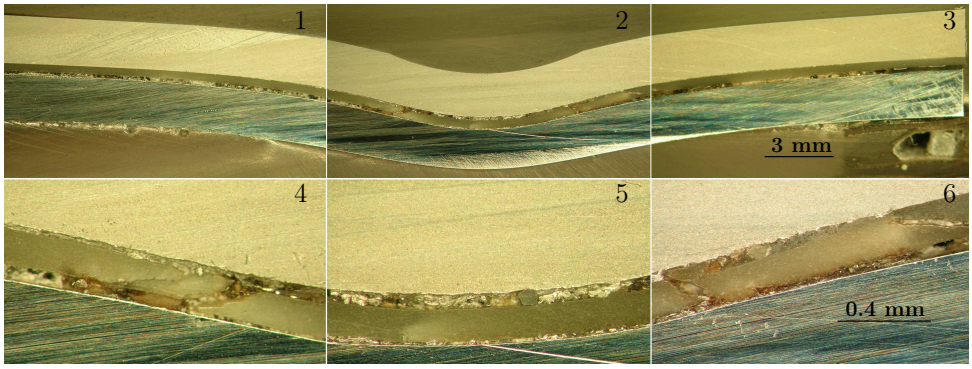
Üst çelik plaka alt alüminyum plaka (Al-St) bağlantının 28.6 J enerjili darbe testi sonrası kesit resimleri Şekil 3.20-a'da gösterilmiştir. Üst plakada çökme olmasına rağmen plakanın çelik olmasından dolayı vurucunun izi belirgin değildir. Üst plaka üzerinde incelme gözle görülmemekte fakat alt plaka alüminyumun çekme etkisiyle inceldiği vurucu hizasında kalan bölgede farkedilmektedir. Düşük enerji seviyesinde (Şekil 3.20-a 4 numaralı resim) alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde gerilmenin en



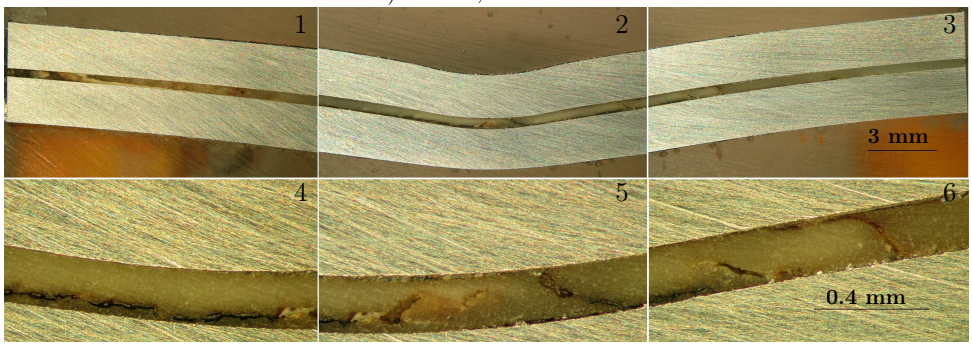
a) Al-St , $E = 28.6$ J



b) St-Al , $E = 28.6$ J



c) St-Al , $E = 60$ J



d) St-St , $E = 60$ J

Şekil 3.20. Farklı enerji seviyelerinde darbe testi sonrası metal bağlantıların kesit resimleri.

yüksek olduğu vurucu altında kalan bölgede arayüzeyde ayrılma ortaya çıkmıştır.

Alt çelik plaka üst alüminyum plaka (St-Al) bağlantıda düşük ve yüksek enerji altında darbe testi sonrası kesit resimleri sırasıyla Şekil 3.20-b ve c'de gösterilmiştir. Altta daha mukavemetli bir malzeme olması, üst alüminyum plakanın vurucu ile alt plaka arasında ezilmesine sebep olmuştur. Vurucunun üst plaka üzerinde izi belirgin bir şekilde düşük enerji seviyesinde dahi görülmektedir. Vurucu altında kalan bölgede yapıştırıcı arayüzeylerinde makro ölçekte arayüzeyde ayrılma görülmez iken, vurucunun altında kalan bölgeden yanal ilerledikçe kenarlara doğru normal gerilmenin yön değiştirdiği bölgelerde kısmen alt plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ayrılma görülmektedir (Şekil 3.20-b 4 numara). Üst alüminyum plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ayrılma mevcut değildir.

St-Al bağlantının yüksek enerji seviyesinde kesit resmi alınan tüm bölgede yapıştırıcının alt ve üst plaka ile arayüzeylerinde oldukça geniş alanda belirgin ayrılma mevcuttur (Şekil 3.20-c). Vurucu altında kalan bölgede ve vurucu çapına sahip dairesel alanda yapıştırıcının her iki plaka ile arayüzeyi tamamen ayrılmıştır ve artık görevini yapamayacak seviyeye gelmiştir. Bu bölgede aynı zamanda gerilmenin yön değiştirdiği (Şekil 3.20-c 4 ve 6 numaralı resimler) kısımlarda yapıştırıcı tabakası üzerinde çok büyük kırılma ve parçalanmaların olduğu görülmektedir. Bu kırılmalar yaklaşık 45^o açı ile yapıştırıcı tabakası üzerinden geçmektedir. Bu geçişlerin olduğu kısımlarda yapıştırıcı üst tarafı basma gerilmesinden kırılmanın alt ucunda basma gerilmesine geçiş olmuştur. Yapıştırıcının alt tarafındaki çekme gerilmesi üst tarafta çekme gerilmesi olarak arayüzeyde atlama yapmıştır. Yapıştırıcı ile plakalar arasındaki boşluklar ile yapıştırıcı tabakasındaki oluşan çatlaklara numunelerin kesilmesi sırasında ve zımpara ile parlatma esnasında kopan parçacıkların dolduğu resimlerden görülmektedir. Oluşan arayüzey ayrılmaları yaklaşık yapıştırıcı kalınlığının yarısı kadardır. St-Al bağlantının $E = 60$ J enerji seviyesinde üst alüminyum plaka üzerinde oluşan vurucu izi çok daha belirgin ve vurucu şeklini almış olduğu görülmektedir. Alt çelik plakada çekmeden dolayı incelme olduğu bununla beraber üst plaka alüminyumundan ezilmeden dolayı inceldiği tespit edilmiştir.

Yapıştırıcı tabakasında en fazla deformasyon St-St bağlantının 60 J darbe enerjisinde ortaya çıkmıştır (Şekil 3.20-d). Vurucu altında kalan bölge ile yaklaşık vurucunun 1.5 katı çapa sahip ϕ27 mm'lik dairesel bölgede yapıştırıcı kalınlığı boyunca ve yapıştırıcı tabakası enine çatlak ve kırılmaların olduğu görülmektedir (Şekil 3.20-d 4,5, ve 6). Aynı zamanda ϕ40 mm'lik daha büyük bir bölgede yapıştırıcı ile alt ve üst plaka arayüzeylerinde ayrılmalar olduğu tespit edilmiştir. Yapıştırıcıya göre çok mukavemetli iki plaka arasında kalan yapıştırıcı tabakası tamamen işlevini yitirmiş, üstüne gelen enerjiyi taşıyamamıştır. Darbe enerjisi yapıştırıcı tabakasının ciddi oranda hasara uğramasına sebep olmuştur.

3.8. Elastikiyet Bozunumu (Degredasyon)

Teorik çalışmalarda metal ve yapışıtıcı için kullanılan malzeme modellerinden dolayı, modellerde yapıştırıcı kalınlığı, plaka kalınlığı, sınır şartlarının mükemmel olması fakat deneylerde ise olmaması, gerçekte vurucunun elastik, fakat analizlerde rijit kabul edilmesi gibi nedenlerden dolayı teorik çalışmalardan elde edilen temas kuvveti deneysel sonuçlara benzemekle birlikte seviye bakımından farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkların temel nedeni malzemelerdeki elastikiyet bozunumunun modellere aktarılmamasıdır.

Deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki farklılıkların giderilebilmesi için elastikiyet bozunumu modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerden bazıları ticari yazılımların içine dahil edilmiş ve bir arayüzle kullanıma sunulmuştur. Araştırmacılar tarafından başka bir programlama dili vasıtasıyla arzu edilen modellerin eklenmesi mümkündür. Örneğin Örneğin ABAQUS® bünyesinde ağ içerisindeki elemanın yok sayılması (*element kill*) yöntemi mevcuttur. En sık kullanılan yöntemlerden biridir. Çözüm esnasında herhangi bir eleman üzerindeki gerilme ya da şekil değiştirme değeri tanımlanan değerlerin üzerine çıkması ile bahsi geçen elemanın elastikiyeti sıfıra yakın küçük bir değere indirgenerek yapının tüm elastikiyetine katkısı düşürülür. Fakat bu yöntemin dez avantajı elamanın elastikiyetindeki ani düşüştür ki, takip eden yük adımlarında yakınsamayı zorlaştırmakta veya ıraksamaya neden olmaktadır. Dolayısı ile elamanın elastikiyetinde ani düşme yerine bir kurala uyarak bu işlemin gerçekleştirilmesi belirtilen sorunları ortadan kaldırır. Bu amaçla,

ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımında FORTRAN programlama dili kullanılarak bir elastikiyet bozunumu modeli kodlanmıştır.

Elastikiyet bozunum modeli yapının her bir elemanının belirlenen başlangıç plastik şekil değiştirme değerinden itibaren bitiş plastik şekil değiştirme değerine kadar elastiklik modülünün lineer olarak düşürülmesi prensibine dayanmaktadır. İlgili model şu aşamalara sahiptir:

» Alt ve üst eşdeğer plastik şekil değiştirme limitleri belirlenir ($\varepsilon_{alt}, \varepsilon_{üst}$).

» Elastikiyet bozunumu ilgili malzemenin elastiklik modülüne uygulanır. Üst limiti ($E_{üst}$) malzemeye ait olan değer olarak alınır, alt limit olarak kullanılacak değeri (E_{alt}) tespit etmek için bir eğim çarpanı belirlenir ve bu eğim çarpanı ile $E_{üst}$ çarpılarak E_{alt} değerleri bulunur.

» Modelin uygulandığı yük adımlarında her bir iterasyonda her bir eleman için o anki eşdeğer plastik şekil değiştirme değeri (ε^p) iterasyon noktasından alınır, alınan plastik şekil değiştirme değerinden ε_{alt} değeri çıkartılarak

$$x = |\varepsilon - \varepsilon_{alt}| \tag{3.1}$$

elde edilir.

» Elde edilen x değerinden degredasyon indeksi D_i 'yi bulmak için

$$D_i = min\left(1, \left|\frac{x}{\varepsilon_{üst} - \varepsilon_{alt}}\right|\right) \tag{3.2}$$

kullanılır.

» D_i [0, 1] arasında değişir. D_i 'nin en büyük değeri 1, degredasyon yapılacak malzeme özelliğinin düşebileceği en küçük değere (E_{alt}), D_i nin en küçük değeri 0, degredasyon yapılacak malzeme özelliğinin en büyük değerine ($E_{üst}$) karşılık gelecek şekilde, D_i'nin (0-1) arasındaki ara değerleri ve karşılık gelen malzemenin elastiklik modülü değerleri lineer olarak üretilir. D_i'nin yer aldığı tablo indeks tablosu olarak adlandırılır ve bir sonraki iterasyonda kullanılacak olan elastiklik modülü D_i'nin değerine göre bu tablodan belirlenir.

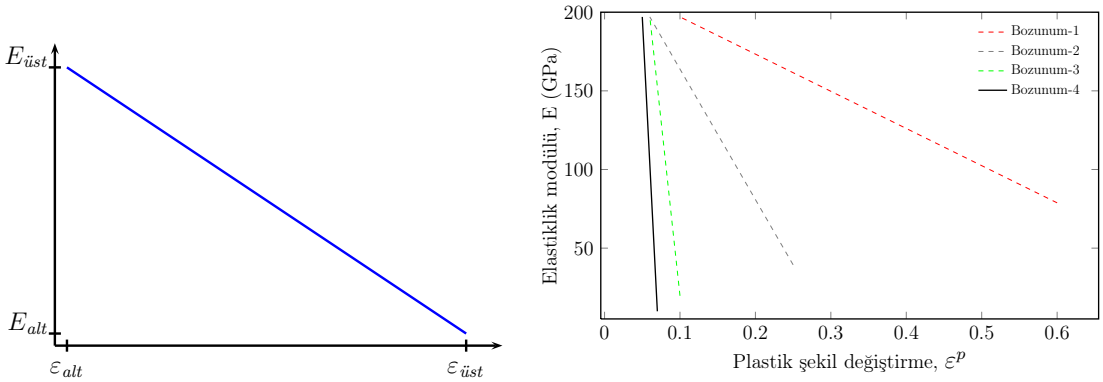
$E_{üst} = 197$ GPa, çarpan 0.4, $E_{alt} = E_{üst} \times 0.4 = 78.80$ GPa ve plastik şekil değiştirme sınırları $\varepsilon_{üst} = 0.6, \varepsilon_{alt} = 0.1$ için 11 adımlı D_i çarpanına sahip örnek bir elastikiyet bozunum tablosu Tablo 3.2'de ve karşılık gelen gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.21-a'de görülmektedir. Analizlerde 51 adımlık daha sık aralıklı tablolar kullanılmıştır. Fortran ve Python programlama dilleri [53] kullanılarak tablolar hazırlanmıştır. İlgili fonksiyonlar parametrik olarak tasarlanmış, giriş olarak verilen ε, E değerlerinin alt ve üst sınırlarına göre tabloları oluşturmakta ve ASCII formatta bir dosyaya kaydetmektedir.

Tablo 3.2. Elastikiyet bozunum tablosu, $E_{üst} = 197$ GPa, $E_{alt} = 78.80$ GPa, $\varepsilon_{üst} = 0.6$, $\varepsilon_{alt} = 0.1$.

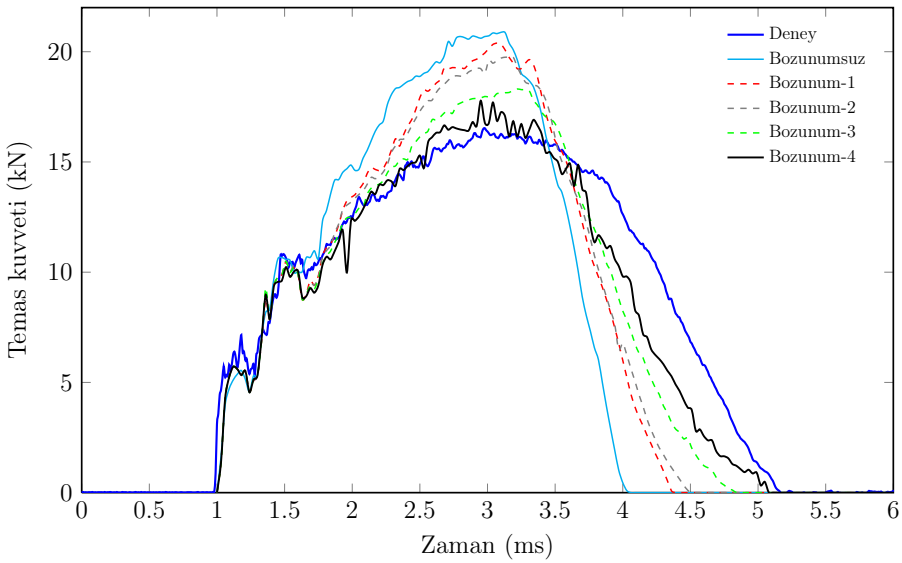
E (GPa)	D_i	ε
78.80	1.0	0.60
90.62	0.9	0.55
102.44	0.8	0.50
114.26	0.7	0.45
126.08	0.6	0.40
137.90	0.5	0.35
149.72	0.4	0.30
161.54	0.3	0.25
173.36	0.2	0.20
185.18	0.1	0.15
197.00	0.0	0.10

Uygun elastikiyet bozunum modelleri deneme yanılma yöntemi ile tespit edilmiştir. Teorik olarak elastikiyet bozunum modeli uygulanmayan analizden elde edilen temas kuvvetleri değişimini deneysel temas kuvvetleri değişimine yaklaştıran uygun, ektin parametreler saptanmış, etkili parametreler üzerinde gerekli değişiklikler yapılmıştır. Şekil 3.22'de farklı elastikiyet bozunum modelleri ile ana teorik modelin temas kuvveti değişimlerinin deneysel temas kuvveti değişimine yaklaşımı görülmektedir. Sürekli açık mavi çizgi ile temsil edilen en yüksek temas kuvvetine sahip eğri elastikiyet bozunum modeli uygulanmayan analizlerden elde edilen eğridir. Bu eğri ile deneysel eğri arasında en büyük temas kuvveti ve toplam temas süresi bakımından yaklaşık %24 kadar fark bulunmaktadır. Elastikiyet bozunum modellerinden elde edilen temas kuvvetleri kesikli çizgilerle gösterilmektedir. Seçilen parametrelerinin elastiklik modülü üzerine etkileri Şekil 3.21-b 'de gösterilmektedir. Tespit edilen en

başarılı sonuç sürekli siyah çizgi ile gösterilmektedir ve deneysel sonuca oldukça yakındır. Elastikiyet bozunum modelleri uygulanmayan analizden elde edilen temas kuvvetinin toplam temas süresi 1 ms'de başlayıp 4 ms'de biterken, en başarılı degredasyondan elde edilen toplam temas süresi 1 ms'de başlayıp 5 ms'de bitmektedir. En büyük temas kuvveti değeri 21 kN'dan 16 kN değerine inmiştir. Elde edilen bu sonuçlar deneysel değerlere oldukça yakındır.



Şekil 3.21. Elastikiyet bozunumu, a) Bozunumundan elde edilen plastik şekil değiştirme-elastiklik modülü ($\varepsilon^p - E$) eğrisi, b) Farklı bozunum parametrelerinin elastiklik modülünde tesiri.



Şekil 3.22. Deneysel, elastikiyet bozunumsuz ve farklı bozunum parametreleri sonucu teorik (ABAQUS®) temas kuvvetleri.

En başarılı bozunum parametreleri, $\varepsilon_{üst} = 0.07$, $\varepsilon_{alt} = 0.05$, $E_{üst} = 197$ GPa, $E_{alt} = 197$ GPa $\times$ $0.05 = 9.85$ GPa, olarak tespit edilmiştir. Plastik şekil değiştirme

çok kısa bir aralıkta değişirken, bu kısa zaman aralığından elastiklik modülü başlangıç değerinin %5'ine düşmektedir. Yapılan teorik analizlerde uygulanan elastikiyet bozunum modelinden "teorik temas kuvvetinin deneysel temas kuvvetine yaklaşması için plastik bölgede belirli bir şekil değiştirme değerinden sonra çok kısa zaman aralığında malzemenin direngenliğinin aniden düşmesi gerektiği" sonucuna varılabilir.

4. BÖLÜM

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI

4.1. Motivasyon

Fonksiyonel olmasının yanı sıra bünyelerinde önemli özellikleri barındıran kompozit malzemeler, son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte otomotiv, uzay ve denizcilik gibi endüstriler için aranan malzemeler olmuşlardır. Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla malzemeden oluşan ve daha iyi özellikler elde etmek amacı ile üretilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır. İnsan kemiği ve bambu ağacı doğadaki kompozit malzemelere, kerpiç ise insanoğlunun yıllar önce kullanıdığı kompozit malzemeye en güzel örnekler olarak verilebilir.

Farklı endüstri alanlarında kompozit malzemelerin çok tercih edilmelerinin başlıca sebepleri; hafif olmaları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci, yüksek yorulma ömrü, v.b. gibi özelliklere sahip olmalarıdır. Yapılan tüm ürünlerde yakıt (enerji) verimi ve hafiflik temel ortak faktördür. Fiberler ve matrisler düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle fiber takviyeli kompozitler hafiftir. Yakıt (enerji) verimi ve hafiflik ana amaç ise kompozit vazgeçilmezdir.

Tasarım açısından bakıldığında ideal yapının hiçbir eklentiye/bindirmeye sahip olmaması gerekir, çünkü yüksek gerilme durumunda eklenti ya da bindirmenin hemen civarında hasar başlaması olasıdır. Fakat uygulamada eklentisiz/bindirmesiz tek parça ideal büyük boyutlarda yapı olması mümkün değildir. Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere her türlü yapı montajında yapıştırma önemli bir birleştirme yöntemidir.

Yapıştırıcı ile birleştirme yapıştırılacak malzemelerin farklı olmaları ya da plastik esaslı olmaları durumunda daha fazla önem kazanmaktadır. Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırma en iyi yöntemlerden biridir.

4.2. Teorik Model

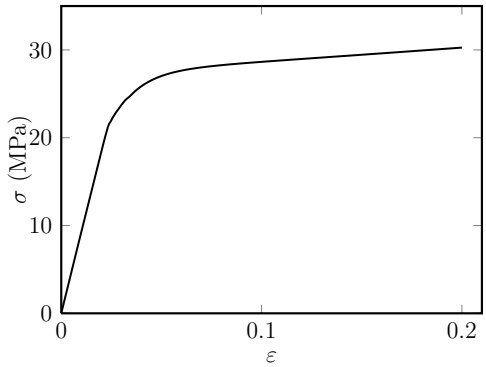
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışı analizleri metal sistemlerde olduğu gibi üç farklı yapıştırıcı kalınlığında (t_2 = 0.2, 0.5 ve 1.0 mm), beş farklı fiber açısında (α = 0, 30, 45, 60 ve 90^o) ve vurucu kütlesi sabit olup (m = 5.045 kg) vurucu hızının değiştiği (v = 2, 3 ve 4 m/s) üç farklı enerji seviyesinde (E = 10, 23 ve 40 J) ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakalar ve yapıştırıcı tabakası üç boyutlu (3B) solid eleman kullanılarak modellenmiştir. Yapıştırıcı tabaka metal sistemlerde kullanılan Araldite 2015, endüstriyel yapıştırıcı olup izotropik elasto-plastik (Şekil 4.1), kompozit plakalar ortotropik elastik malzeme modeline sahiptir (Tablo 4.1). Vurucu metal sistemlerde olduğu gibi rijit modellenmiştir.

Yapıştırıcı tabakası kalınlığı boyunca 4 elemana (4 katmana) bölünmüştür . Deneysel olarak üretimi yapılan kompozit plakaların 2 mm kalınlıkta sekiz tabakaya sahip olmasından dolayı sonlu elemanlar modeli oluşturulurken kompozit plakalar $t_1 = t_3 = 2$ mm sabit plaka kalınlığında 8 katmanlı olarak modellenmiştir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakaların teorik modeli oluşturulurken ASTM D7136 standartları temel alınmıştır [54]. ASTM D7136 standartlarına uygun hazırlanan teorik modelin geometrisi Şekil 4.2'de verilmiştir. ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımı kullanarak modellenen sistemin ağ yapısının üstten ve yandan görünüşleri ile yapıştırıcı tabakası ve kompozit plakaların kalınlık boyunca ayrıntı görünüşleri Şekil 4.3'de görülmektedir. ABAQUS®

Tablo 4.1. Kompozit bağlantıda kullanılan kompozit malzemenin (grafit-epoksi IM-6 / 3501-6) mekanik özellikleri (V_f = %63.5).

Fiber mekanik özellikleri										Matris mekanik özellikleri			
Yoğunluk ρ,kg/m^3	E_{11} GPa	E_{22} GPa	E_{33} GPa	G_{12} GPa	G_{13} GPa	G_{23} GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	Yoğunluk ρ,kg/m^3	E GPa	G GPa	ν
1743.834	259.105	13.927	13.927	50.952	50.952	8.274	0.26	0.26	0.33	1264.972	4.344	1.597	0.36

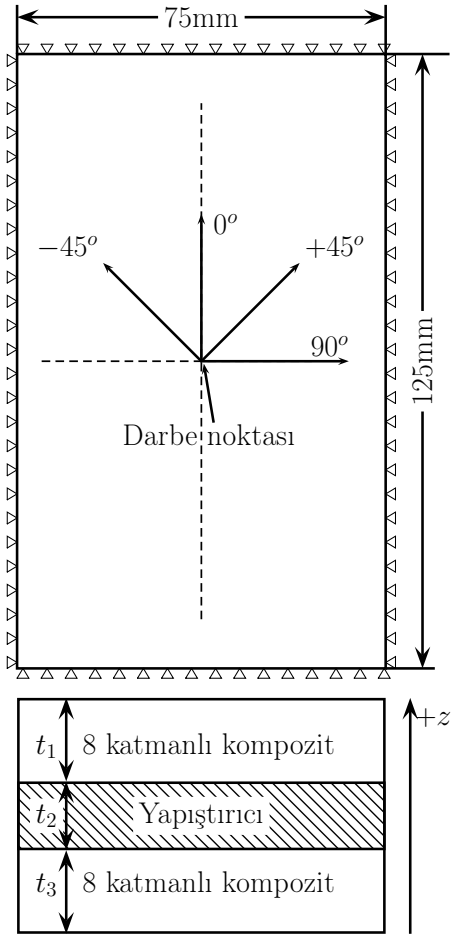
yazılımında modellenmesi Python programlama dili kullanılarak parametrik olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakaların her biri 47984, yapıştırıcı tabaka 23992 elemana sahip iken bağlantının tamamı 145727 düğüm noktasından oluşmaktadır.



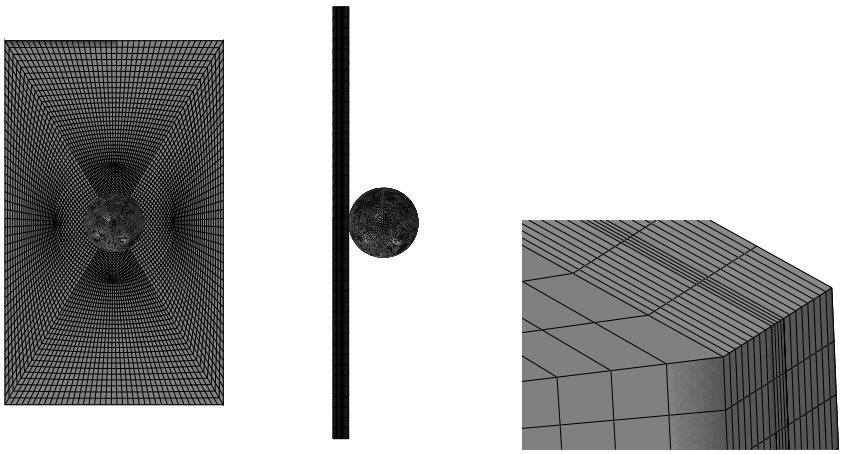
Şekil 4.1. Fiber takviyeli kompozit plakaların yapıştırılmasında kullanılan Araldite 2015'in gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \varepsilon$) eğrisi.

4.3. Hasar Kriterleri

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları teorik olarak incelenirken kompozit plakaların uğrayabileceği hasarların tespiti için hasar kriterleri göz önüne alınmıştır. Bir kompozit plakanın darbe sonrası nasıl bir deformasyona maruz kaldığı ve bu deformasyon sonucu plakada oluşabilecek hasarların bilinmesi önem arz etmektedir. Eğer darbe sonrası plaka üzerinde oluşabilecek hasarlar biliniyorsa toplam bağlantının tamamen hasara uğramadan gerekli önlemler alınabilir. Parça üzerine yama gerektiriyorsa yama yapılabilir, değiştirilmesi gerekiyorsa değişim talep edilebilir. Kompozit malzemelerin hasar modellerinin geliştirilmesi 30 yıllık bir geçmişe sahiptir ve ilgili literatürde kullanılabilecek bir çok teori mevcuttur. Bu kriterleri sınıflandırmak mümkündür: kırılma mekaniği temelli teoriler, genel ya da özel hasar tiplerinin belirlenmesi üzerine kurulan teoriler ve düzlem içi ya da tabakalar arası hasarların tespiti temelli teoriler gibi. Çalışmamızda yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları incelenirken, kompozit plakalarda meydana gelebilecek hasar tiplerinden düzlem içi ve tabakalar arası hasar tipleri dikkate alınmıştır. Bu hasar tipleri daha çok tek bir tabakanın gerilme bileşenleri üzerine kurulmuş modellerdir.



Şekil 4.2. ASTM D 7136D standartlarına uygun olarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakalar için teorik model geometrisi [54].



a) b) c)

Şekil 4.3. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakanın sonlu elemanlar modeli, a) Üstten görünüş, b) Yandan görünüş, c) Yapıştırıcı ve kompozit kesiti.

4.3.1. Fiber Hasar Kriterleri

Fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakalarda meydan gelebilecek hasar tiplerinden olan fiber hasarları çekme ve basma olarak ikiye ayrılabilir. Her bir kompozit tabakada fiberlerde çekmeden kaynaklanan hasarların sebebi fiberin yük taşıma yetersizliğidir. Eğer gereken yükü taşıyacak kadar sağlam fiber tabaka içinde kalmaz ise, o zaman çekme altında fiber kritik durumdadır. Çekme altında fiber hasarları ile çalışan birçok araştırmacı kritik durumu tespit etmekte çekme deneylerinden elde edilen en büyük gerilme ya da en büyük şekil değiştirme değerlerini esas almışlardır. Bunlardan en çok bilinen ve literatürde en iyi sonuç veren teorilerden birisini Hashin 1980 yılında yaptığı çalışma ile bilim dünyasına sunmuştur [55]. Hashin çekme altında üç boyutlu fiber hasar kriterinde,

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}\left(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2\right) \geqslant 1 \tag{4.1}$$

1, 2 ve 3 yönleri sırasıyla fiber, düşey ve kalınlık boyunca yönü tarif etmektedir. X_T fiber yönünde en büyük normal gerilme, S_{12} laminanın kayma gerilmesi değeri olup deneysel olarak tespit edilen sabit değerlerdir. σ_1, τ_{12} ve τ_{13} analizler sırasında çözüm adımlarından elde edilen gerilmeler olup sırasıyla fiber yönündeki normal gerilme değerini, 1-2 ve 1-3 düzlemlerindeki kayma gerilmelerini temsil etmektedir. Bu hasar kriterinin uygulanabilmesi için $\sigma_1 > 0$ olması gerekmektedir. Aksi takdirde fiber basma altında olacaktır ve uygulanacak kriter değişecektir.

Fiberin maruz kalabileceği diğer bir hasar tipi ise basma altındadır. Basma altında fiberde meydana gelebilecek hasarın sebebi mikroburkulma (*microbuckling*) ve kıvrılma (*kinking*) bandının oluşmasıdır. Aslında bu iki sebep bir birinden farklı hasar tiplerini ifade ederler. Mikroburkulma genel bir hasar tipi iken, kıvrılma daha lokal mikroyapı kusurlardan oluşan hasar tipi olarak ortaya çıkar. Analizlerde kullandığımız model, mikroburkulma hasar modellerinden olan literatürde kabul görmüş 1974 yılında Greszczuk [56], tarafından geliştirilen hasar kriteridir. Greszczuk tarafından geliştirilen hasar kriteri

$$\sigma_1 \geq \frac{G_{12}^m}{1 - V_f} \tag{4.2}$$

şeklindedir. Burada G_{12}^m matrisin kayma modülü, V_f fiber hacimsel oranını temsil etmektedir. Çözüm adımında kompozit plakanın her bir elemanında elde edilen 1 yönündeki normal gerilme σ_1 değeri $\frac{G_{12}^m}{1-V_f}$ değerini geçtiği andan itibaren ilgili elemanda fiber, basma altında hasara uğramış kabul edilmektedir.

4.3.2. Matris Hasar Kriterleri

Tabakalı kompozit plakalarda matris hasarları karmaşık bir yapıya sahiptir. Matrisdeki çatlak genel olarak kusurlu bölgede ya da matris fiber arayüzeyinde başlar, tabaka boyunca yığılır ve kritik çatlak bölgesi boyunca hasar oluşmasına öncülük eder.

Fiber takviyeli kompozit plakalardaki matrislerin çekme ve basma altında maruz kalabileceği hasar kriterlerinden yine Hashin tarafından 1980 yılından ortaya atılmış ve günümüze kadar bir çok testten başarı ile geçen Hashin 3B Matrix Tension ve Hashin 2D Matrix Compression hasar kriterleri sayısal analizlerde yaygın kullanılmıştır [55]. Hashin 3D Matrix Tension hasar kriteri

$$\frac{(\sigma_2 + \sigma_3)^2}{Y_T^2} + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3)}{S_{23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 - \tau_{13}^2)}{S_{12}^2} \geqslant 1 \tag{4.3}$$

ve Hashin 2D Matrix Compression hasar kriteri

$$\frac{\sigma_2}{Y_C}\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{4.4}$$

ile tanımlanmıştır. Burada σ_1, σ_2, σ_3, τ_{12}, τ_{13}, τ_{23} herbir noktadaki gerilme bileşenleri, Y_T, S_{12}, S_{23} deneysel olarak tespit edilen sabit üst dayanım değerleri olup sırasıyla matrisin çekme altındaki en büyük gerilme değeri, 1-2 ve 2-3 düzlemlerindeki laminanın kayma gerilmesi değerlerini temsil etmektedirler. Eşitlik 4.4'de farklı olarak Y_C matrisin basma altındaki en büyük gerilme değerini temsil etmektedir.

Tablo 4.2. Grafit-epoksi kompozit fiber (IM-6) ve matris (3501-6) için micro-mekanik özellikler [57].

Özellik	Birim	Kısaltma	Değer
Fiber çekme mukavemeti	GPa	X_T	2.56
Matris çekme mukavemeti	MPa	$Y_T = Z_T$	42.54
Matris basma mukavemeti	MPa	$Y_C = 3.2 \times Y_T$	136.13
Matris kayma mukavemeti	GPa	G_{12}^m	1.597
Lamina kayma mukavemeti	MPa	$S_{12} = S_{13} = S_{23}$	77.08

4.3.3. Kayma Hasar Kriteri

Fiber ve matris için çekme ve basma altında toplam 4 adet hasar kriteri gerçekleştirilen analizlerde kullanılmıştır. Bu kriterlere ek olarak düzlem içi hasar kriterlerinden fiber matris kayma kriterlerinden biri olan 1980 yılında Hashin tarafından teorisi ortaya konan hasar kriteri

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{4.5}$$

kullanılmıştır [55].

4.3.4. Ayrılma (delaminasyon) Hasar Kriteri

Her bir katmanın, ya da katmanlar arası arayüzey elemanlarının gerilme değerlerine bağlı olarak ayrılma başlamasını belirleyebilmek üzere yapılmış bir çok çalışma literatürde mevcuttur. Yapılan çalışmaların bir çoğunda kalınlık boyunca gerilme ve kayma parametreleri, bir kısmında ise fiber yönündeki gerilme değerleri kullanılmıştır. Yaptığımız analizlerde Hashin tarafından önerilen

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 \geqslant 1 \tag{4.6}$$

ayrılma kriteri kullanılmıştır [55]. Burada diğer hasar kriterlerinden farklı olan Z_T parametresi kalınlık boyunca matrisin çekme altında en büyük gerilme değerini temsil etmektedir. $Z_T = Y_T$ olarak analizlerde kullanılmıştır. Hasar kriterlerinde kullanılan fiber ve matrisin mekanik özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

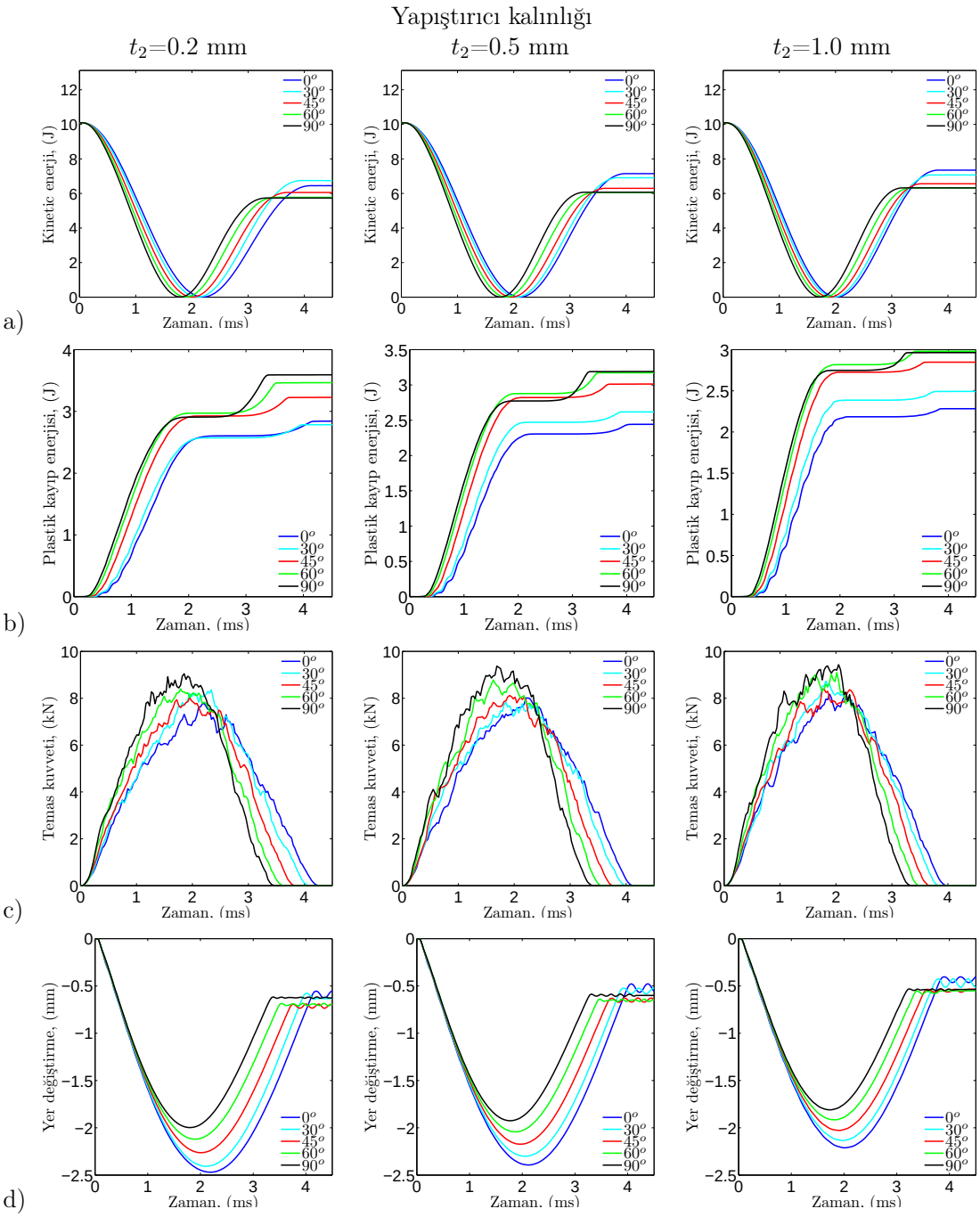
4.4. Sayısal Analiz Sonuçları

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakalardan üretilen tabakalı bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarından elde edilen sayısal sonuçlar; yapıştırıcı kalınlığı, fiber açısı ve darbe enerjisinin, kinetik enerji, plastik kayıp enerjisi, temas kuvveti, kalıcı deformasyonlar, yapıştırıcı tabakası deformasyonları, hasar kriterlerinin kompozit plakaların kalınlığı boyunca katmanlarında ilerleyişi ve hasar alanları üzerine etkileri dikkate alınarak incelenmiştir.

4.4.1. Yapıştırıcı kalınlığı, fiber açısı ve darbe enerjisinin etkileri

Fiber açısının yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların darbe davranışları üzerine etkisi üç farklı yapıştırıcı kalınlığı ($t_2 = 0.2$, 0.5, 1.0 mm) için incelenmiştir. Vurucu hızı $v = 2$ m/s, kütlesi $m = 5.045$ kg, enerjisi $E = 10$ J değerleri için gerçekleştirilen analizlerden kinetik enerji, plastik kayıp enerjisi, temas kuvveti ve alt plaka arka yüzey orta noktasından alınan yer değiştirmenin zamana göre değişim grafikleri Şekil -4.4' te görülmektedir. Genel olarak üç farklı yapıştırıcı kalınlığı değişiklik olmadığı görülmektedir. Fiber açısının 0^o değerinde fiberler kompozit plakaların uzun kenarı boyunca (1 yönünde) yönlendirilmiş durumdadırlar. Plakaların kare olmayıp dikdörtgen olmaları fiberlerin 0^o ile 90^o açılarda gösterdikleri davranışların birbirinden farklılık göstermesine sebep olmuştur. Fiberlerin 90^o fiber açısına sahip oldukları durumda, fiberler kompozit plakaların kısa kenarı (2 yönünde) boyunca yönlenmiş durumda olduklarından dolayı, vurucunun çarptığı orta noktadan alınan moment kolu 0^o fiber açısına göre kısalmakta, kompozit plaka 90^o fiber açısında daha rijit bir yapıya sahip olmaktadır.

90^o fiber açısında kompozit plakalar daha rijit olduklarından yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan kalıcı deformasyonların artmasına, dolayısı ile daha rijit iki plaka arasında kalan yapıştırıcı tabakasının diğer fiber açısı değerlerine göre fazladan ezilmesine sebep olmuştur. Her üç yapıştırıcı kalınlığı için fiber açısının 90^o değeri için oluşan plastik kayıp enerjileri artmakta, darbe sonrası sistemde kalan kinetik enerji değerleri azalmaktadır. Her üç yapıştırıcı kalınlığı için en büyük temas kuvveti ve en düşük yerdeğişmeler yine 90^o fiber açısında oluşmaktadır.



Şekil 4.4. Fiber açısının yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların üç farklı yapıştırıcı kalınlığında ($t_2 = 0.2, 0.5, 1.0$ mm) a) kinetik enerji, b) plastik kayıp enerji, c) temas kuvveti, d) yer değiştirme davranışları üzerine etkisi ($E = 10$ J).

Yapıştırıcı tabakası tarafından harcanan plastik enerji değeri $t_2 = 0.2$ mm yapıştırıcı kalınlığında, 90^o fiber açısında 3.5 J iken 0^o fiber açısında 2.6 J değerindedir. Yapıştırıcı kalınlığı $t_2 = 0.5$ mm için sırasıyla 3.2 J, 2.4 J, $t_2 = 1.0$ mm için sırasıyla 3 J, 2.2 J olarak gerçekleşmiştir.

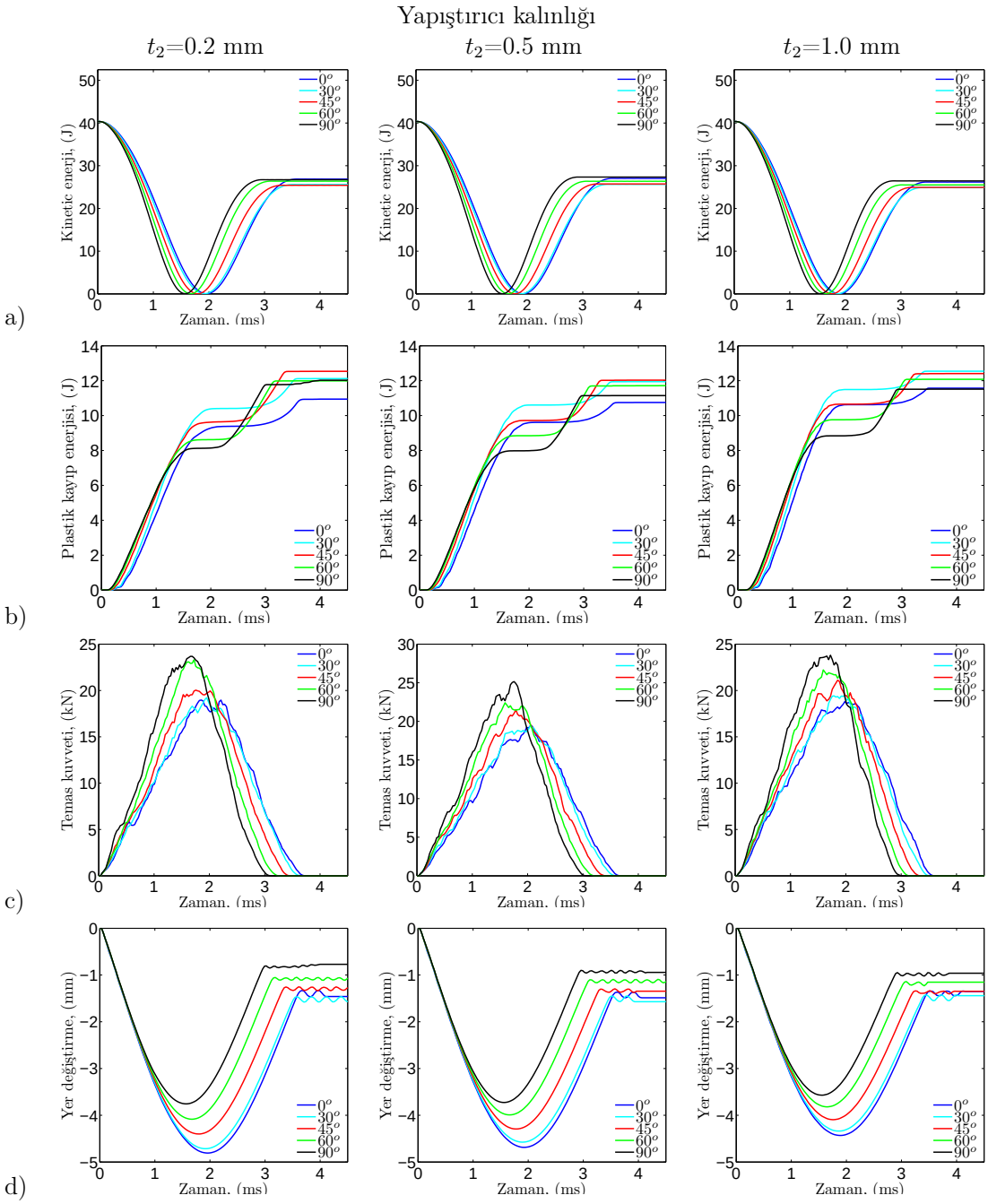
Fiber açısının 90^o ile 0^o değerlerinin temas kuvveti üzerine etkileri incelenecek olur ise, $t_2 = 0.2$ mm yapıştırıcı kalınlığında 90^o fiber açısında en büyük temas kuvveti 9 kN, 0^o fiber açısında temas kuvveti 7.8 kN olarak gerçekleşmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının diğer iki değeri içinde temas kuvvetlerinde durum aynıdır. 90^o fiber açısında en büyük temas kuvveti oluşurken, 0^o fiber açısında düşük temas kuvveti görülmektedir.

Fiber açısının etkileri en iyi olarak yer değiştirme grafiklerinde görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının $t_2 = 0.2$ mm değerinde beş farklı fiber açısı için elde edilen sonuçlar incelenecek olur ise, 0^o 'den 90^o'ye sırasıyla beş farklı fiber açısı için elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri sırasıyla 2.5, 2.4, 2.2, 2.0 ve 1.8 mm olmuştur. 0^o fiber açısında plakalar en büyük çökmeye sahip iken fiber açısının artması ile plakaların rijitlikleri artmış ve çökme miktarları azalmıştır. 90^o fiber açısında en düşük çökme elde edilmiştir. Aynı durumu diğer iki yapıştırıcı kalınlığında da görmek mümkündür.

Fiber açısın artması ile plakaların elastikiyeti artmaktadır. Dolayısı ile fiber açısının artması yapıştırıcı tabakasında kalıcı deformasyonların artmasına, plastik kayıp enerjilerinin artmasına, bağlantıda kalan kinetik enerji değerlerinin azalmasına, temas kuvvetlerinin artmasına, en büyük çekme değerlerinin azalmasına sebep olmuştur. Üç farklı yapıştırıcı kalınlığı için benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil -4.4).

Şekil 4.5'de analizi gerçekleştirilen en yüksek enerji seviyesi ($E = 40$ J, $v = 4$ m/s, $m = 5.045$ kg) için fiber açısının üç farklı yapıştırıcı kalınlığında kinetik enerji, plastik kayıp enerjisi, temas kuvveti ve yer değiştirmeler üzerine etkileri verilmiştir.

$E = 10$ J olduğu gibi 0^o fiber açısında en düşük temas kuvveti elde edilmiş, fiber açısının artması ile temas kuvvetleri artmış ve en büyük temas kuvveti 90^o fiber açısında gerçekleşmiştir (Şekil -4.5). Değer olarak yapıştırıcı kalınlığı $t_2 = 0.2$ mm için 90^o fiber açısında 24.5 kN, 0^o fiber açısında 19 kN temas kuvveti oluşmuştur. Fiber açısının 0^o'den 90^o'ye değişmesi ile temas kuvvetinde $\sim$ %25'lik bir artış gözlenmektedir.



Şekil 4.5. Fiber açısının yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların üç farklı yapıştırıcı kalınlığında ($t_2 = 0.2, 0.5, 1.0$ mm) a) kinetik enerji, b) plastik kayıp enerji, c) temas kuvveti, d) yer değiştirme davranışları üzerine etkisi ($E = 40$ J).

Yerdeğiştirmeler için benzer durum değişmemiş, fiber açısının artması ile kalıcı çökme değerleri azalmıştır. $t_2 = 0.2$ mm için 0^o fiber açısında 4.8 mm olan kalıcı çökme, 90^o fiber açısında 3.6 mm olarak gerçekleşmiştir (Şekil -4.5). Fiber açısının 0^o'den 90^o değilmesi ile kalıcı çökme değerlerinde %25'lik bir düşüş gözlenmektedir.

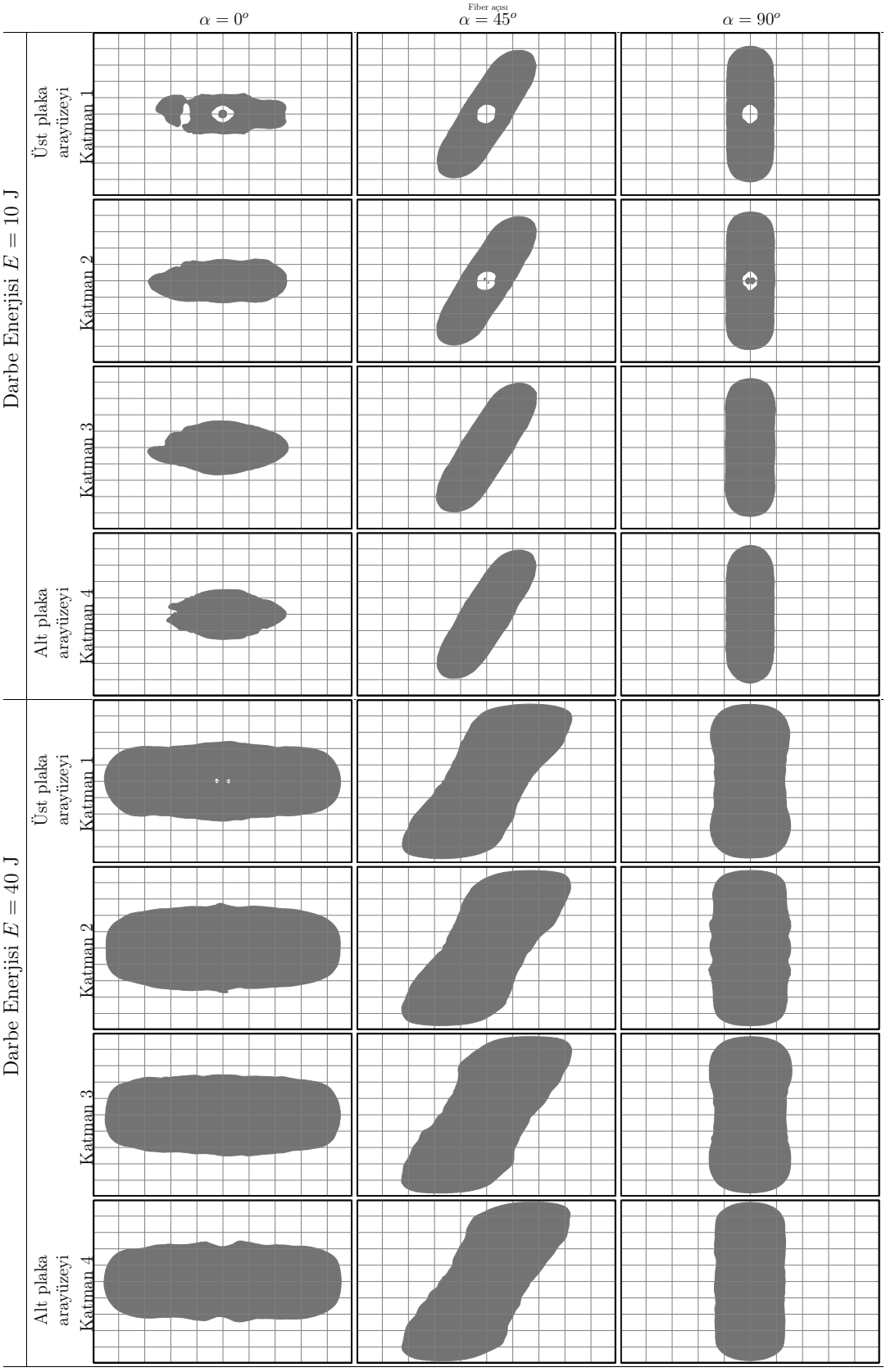
Benzer durum diğer iki yapıştırıcı kalınlığı için geçerlidir.

Düşükten yüksek darbe enerji seviyesine artış fiber açısının temas kuvveti ve kalıcı deformasyonların üzerine etkilerinin karakteristiğini değiştirmemiştir. Fakat plastik kayıp enerjisi ve kinetik enerjinin darbe süresince değişimi üzerinde ihmal edilebilir farklılıklar oluşmuştur. $E = 40$ J için en büyük plastik kayıp enerjisi her üç yapıştırıcı kalınlığında 45^o fiber açısında gerçekleşmiştir. Darbe sonrası kinetik enerji değerleri arasındaki farklar çok fazla değişim göstermemiştir. Fakat kinetik enerji değişimlerinden görülmektedir ki, fiber açısının artması ile bağlantının enerjisinin yutulması yani vurucunun plakalar üzerinde yapabileceği en büyük yer değiştirmeye ulaşma (nüfuziyet) zamanı azalmıştır. Her üç yapıştırıcı kalınlığı içinde aynı durum geçerlidir.

4.4.2. Yapıştırıcı kalınlığı, fiber açısı ve darbe enerjisinin yapıştırıcı hasarı üzerine etkileri

Yapıştırıcı tabakası kalınlığı boyunca 4 eleman (4 katman) ile modellenmiştir. Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca hasarın nasıl geliştiğini belirlemek amacıyla, $t_2 = 0.2$ mm kalınlığı boyunca mümkün olabilecek en fazla eleman kullanmak önemlidir. Bir seri analiz kalınlık boyunca 4 elemanın yeterli olduğunu göstermiştir ve takip eden analizler yapıştırıcı kalınlığı boyunca 4 eleman için yapılmıştır. Daha fazla eleman ile modelleme yapmak iş istasyonlarına çok fazla yük getirmekte, eleman sayısı arttıkça çözüm süreleri orantısız artmaktadır. Çözüm için kullanılan iş istasyonu 8 çekirdekli, 32 GB hafızaya, paralel çalışan dört disk özelliklerine sahip güçlü bir işistasyonu olmasına rağmen mevcut verilerin elde edildiği 119960 elemandan oluşan modelin çözümü 40-48 duvar saati sürmektedir.

Yapıştırıcı kalınlığı boyunca kalıcı deformasyonların nasıl geliştiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'da düşük (10 J) ve yüksek (40 J) enerji seviyeleri için beş farklı fiber açısında yapıştırıcı kalınlığının en çok zorlandığı $t_2 = 0.2$ mm değerinde kalıcı deformasyonların, vurucu ile temas eden üstplaka yapıştırıcı arayüzeyinden yapıştırıcı kalınlığı boyunca altplaka arayüzeyine doğru değişimi mevcuttur. Yapıştırıcı tabakasında meydana gelen deformasyonlar fiber açısına



Şekil 4.6. Farklı fiber açılarında ($\alpha = 0^o$, 45^o, 90^o) ve farklı darbe enerjilerinde yapıştırıcı tabakasının kalınlığı boyunca 4 katmanında oluşan kalıcı hasar bölgeleri (yapıştırıcı tabakası boyutları $125 \times 75 \times 0.2$ mm).

uyum göstermekte, fiber açısının değişimi ile kalıcı deformasyonların şekli değişmektedir. Düşük enerji seviyesinde kalıcı deformasyonlar orta bölgede toplanırken, yüksek enerji seviyesinin 0^o fiber açısın dışındaki fiber açılarında kalıcı deformasyonlar yapıştırıcı tabakasının kenarlarına kadar ilerlemekte ve yığılma göstermektedir. Enerji seviyesinin 10 J'den 40 J'le çıkması ile yapıştırıcı üzerinde oluşan kalıcı deformasyon alanlarında 2 kat ile 4 kat arasında artış gözlenmektedir.

Düşük enerji seviyesinde yapıştırıcının üst katmanlarında (1 ve 2. katmanları) vurucunun temas ettiği bölgenin hizasında kısımda yapıştırıcı üzerinde oluşan plastik şekil değiştirme değerleri $\varepsilon_{adh}^{hasar} = 0.16566$ değerinin üstüne çıkmamış, yapıştırıcı tabaka vurucu tarafından yanal olarak hareket etmeye zorlanmıştır. Vurucu temas noktasında da oluşan plastik deformasyon değerleri 0.16566 değerinin altında kaldığı görülmektedir. Diğer yapıştırıcı kalınlıklarında ($t_2 = 0.5$ ve 1.0 mm) $\varepsilon_{adh}^{hasar} = 0.16566$ değeri üstünden gerçekleşen kalıcı deformasyonlar, $t_2 = 0.2$ mm değerinde olduğu kadar belirgin değildir. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcı kütlesi artmakta, birim hacim üzerine düşen şekil değiştirme enerji miktarı azalmaktadır. Dolayısı ile, yapıştırıcı tabaka elastik olarak daha fazla enerjiyi depolayabilmekte, kendisi üzerinde oluşan kalıcı deformasyonlar azalmaktadır.

4.4.3. Darbe sonrası kompozit tabakalarda hasar analizleri

Fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların darbe analizlerinde fiber için basma altında, çekme altında, matris için basma altında, çekme altında, ayrılma ve kayma hasar kriterleri hasar kriteri kullanılmıştır (Tablo 4.3).

Hasar kriterleri şu şekilde uygulanmıştır: hasar kriterleri tek FORTRAN kod dosyasında ABAQUS yazılımına uygun *vusdfld()* alt kodu olarak yazılmıştır. ABAQUS ilk yük iterasyonunu yapar, iterasyon sonunda hasar kriterlerinde kullanılacak parametreler hesaplanmıştır, malzemeye ait olan deneysel olarak hesaplanması gereken parametreler sabit değer olarak FORTRAN programına girilmiş durumdadır. Hasar kriterleri her bir iterasyon sonunda ABAQUS tarfından çağrılır. Hasar kriteri her bir eleman için teker teker gerekli parametreleri kullanarak hesaplamaları yapar ve ABAQUS tarafında SDV olarak tariflenen tüm elemanları

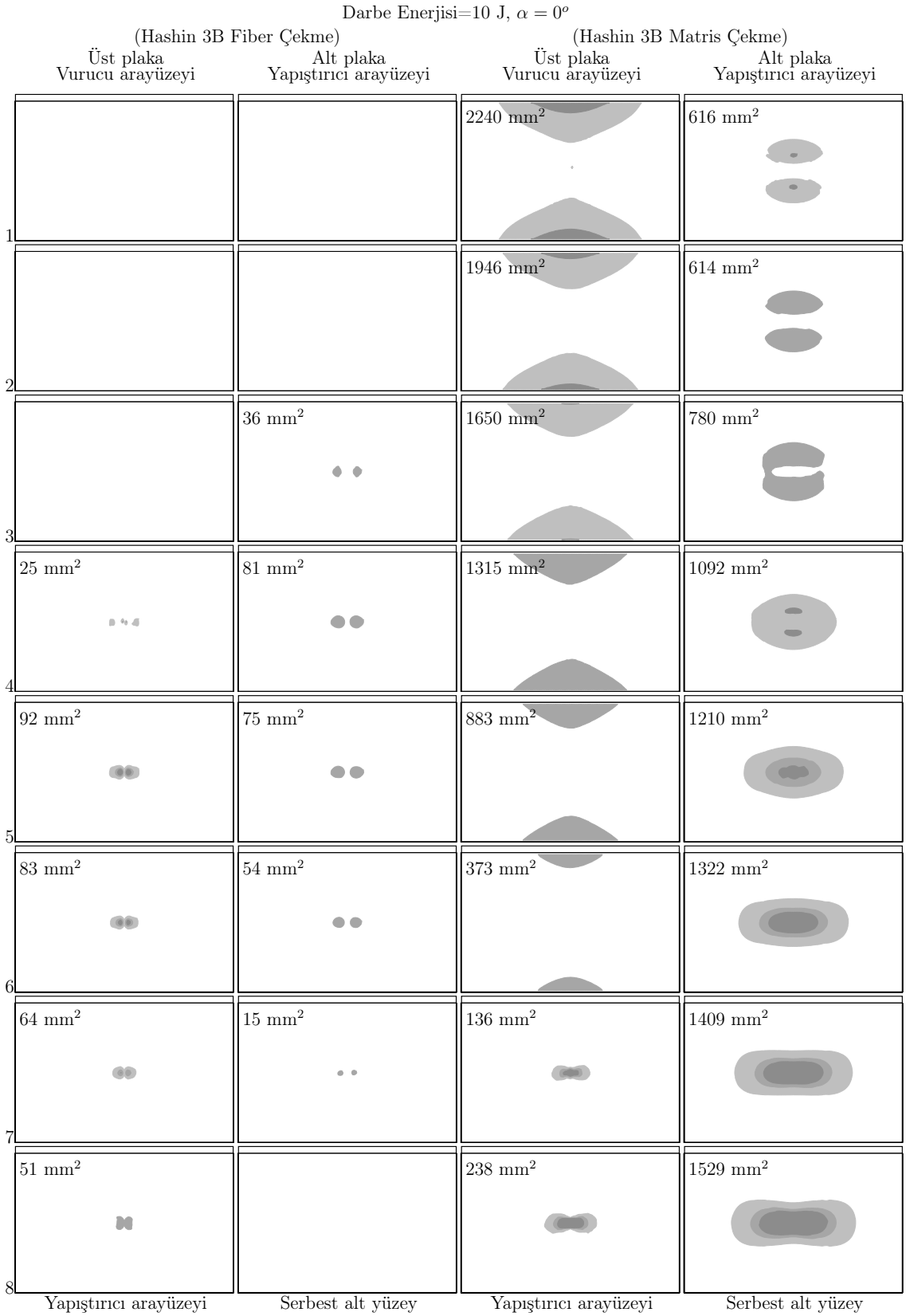
Tablo 4.3. Kompozit hasar kriterleri.

Hasar kriteri	Eşitlik
1980-Hashin-3D-fibre-tension [55]	$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \frac{1}{S_{12}^2}\left(\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2\right) \geqslant 1$
1974-Greszczuk-fibre-compression [56]	$\sigma_1 \geqslant \left(\frac{G_{12}^m}{1 - V_f}\right)$
1980-Hashin-3D-matrix-tension [55]	$\frac{(\sigma_2 + \sigma_3)^2}{Y_T^2} + \frac{(\tau_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3)}{S_{23}^2} + \frac{(\tau_{12}^2 - \tau_{13}^2)}{S_{12}^2} \geqslant 1$
1980-Hashin-2D-matrix-compression [55]	$\frac{\sigma_2}{Y_C}\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] + \left(\frac{\sigma_2}{2S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geqslant 1$
1980-Hashin-shear [55]	$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geqslant 1$
1980-Hashin-delamination-init [55]	$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{31}}{S_{31}}\right)^2 \geqslant 1$

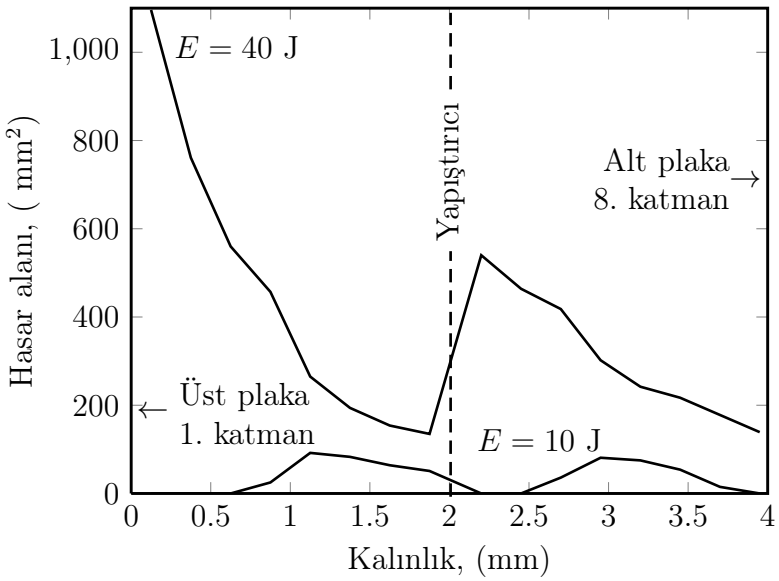
teker teker karşılayacak şekilde matris formunda bulunan her bir hasar kriterine ait değeri $[0 - 1]$ arasında değişen indeks değişkenini hasar durumuna göre doldurur. SDV'nin 1 olması demek artık o elemanın ilgili hasar kriterinde hasara uğradığı (*fail*) anlamına gelir. Hasar kriterleri herbir iterasyon noktası için tüm yük adımlarında ve tüm iterasyonlarda tekrarlanır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakaların bindirme bağlantılarında hasar kriterleri analizlerinde düşük $E = 10$ J ve yüksek enerji seviyeleri $E = 40$ J için yapılan üç farklı yapıştırıcı kalınlığında ($t_2 = 0.2$, $t_2 = 0.5$ ve $t_2 = 1.0$ mm) fiber ve matris malzemesinin çekme altında hasara uğramalarının diğer dört hasar kriterine göre daha kritik oldukları görülmüştür.

Hashin'in (Eşitlik 4.1) ve 4.3, fiberin ve matrisin çekme altındaki hasar kriterlerine göre düşük enerji seviyesinde $E = 10$ J, yapıştırıcı kalınlığı $t_2 = 0.2$ mm, fiber açısı $\alpha = 0^o$ değeri için alt ve üst kompozit plakaların kalınlık boyunca 8 katmanında tespit edilen hasar alanları Şekil 4.7'de sunulmuştur. Kompozit plakaların katmanları 1, 2, ..., 8 ile tariflenmektedir. Vurucu üst plakanın 1 nolu katmanı ile temas etmektedir. Kalınlık aşağı 8 nolu katmana doğru ilerlemektedir. Üst plakanın 8. katmanı ile yapıştırıcı ara yüzeyi bulunmaktadır. Alt plakanın



Şekil 4.7. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 10$ J).

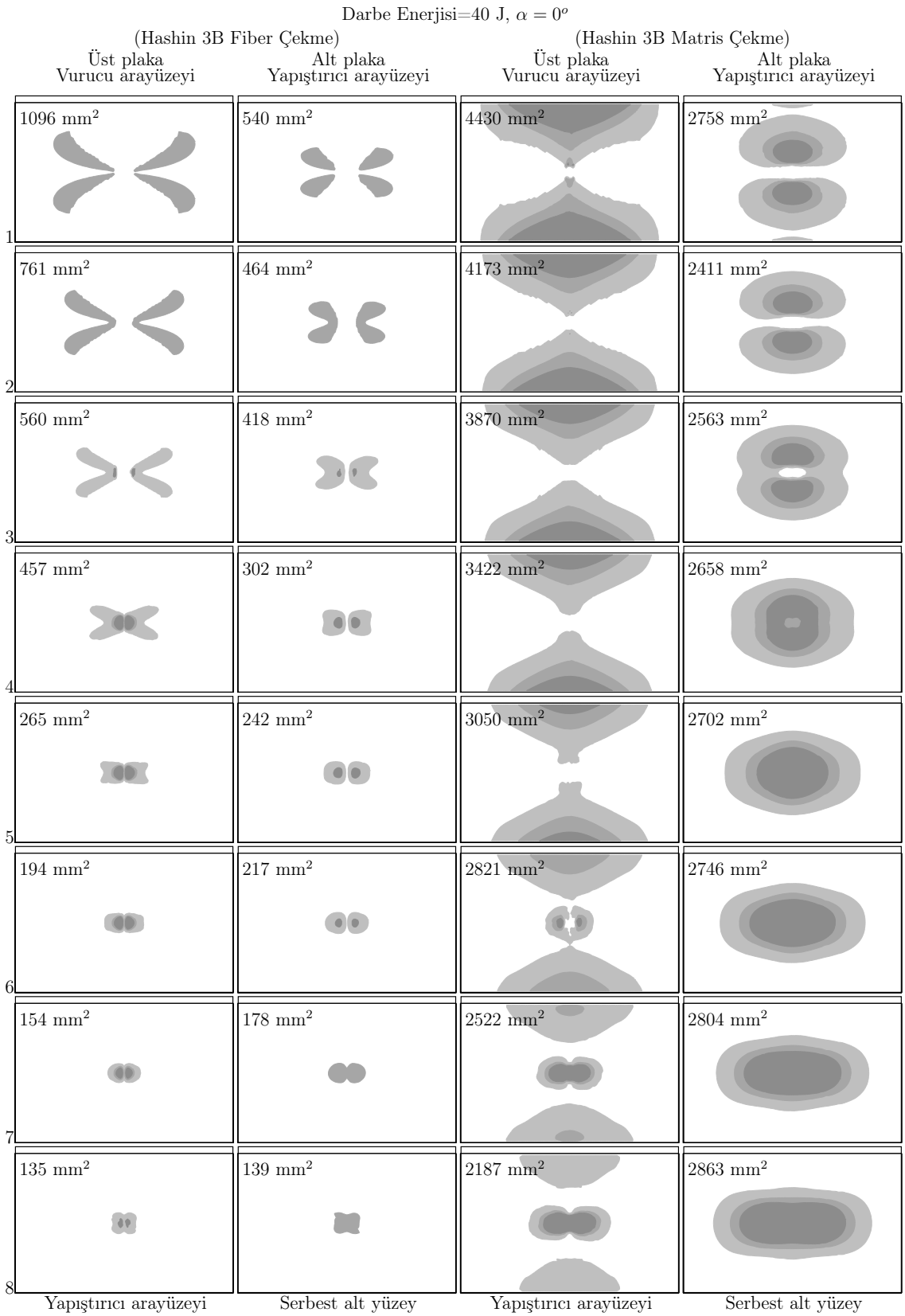


Şekil 4.8. Çekme altında Hashin 3B fiber hasar kriteri alanlarının $E = 10$ J, $E = 40$ J, $t_2 = 0.2$ mm, $\alpha = 0^o$ için bağlantı kalınlığı boyunca değişimi.

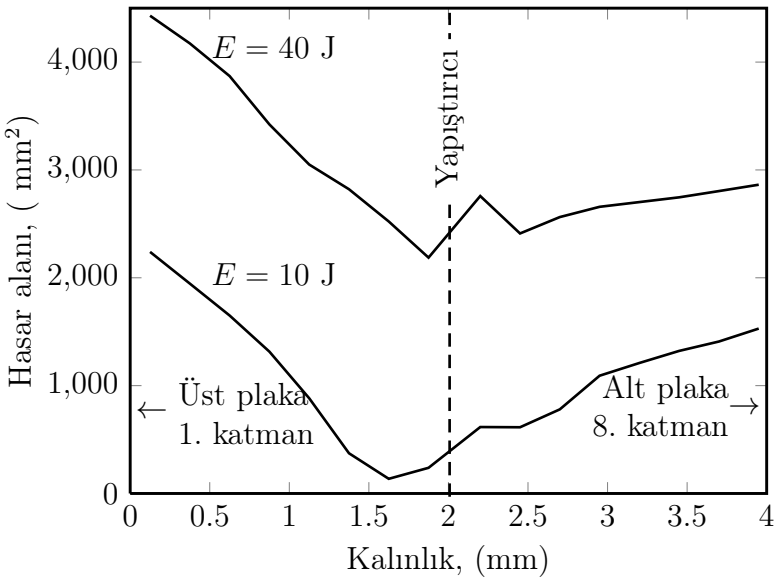
yapıştırıcı ile arayüzeyi 1. katmandır ve yine alt plakanın kalınlığı aşağı 8 numaralı katmana doğru ilerlemektedir. Tariflenen bu durum altında hasarların kalınlık boyunca katmanlarda ilerleyişi şekilde görülmektedir (Şekil 4.7).

Düşük enerji seviyesinde ($E = 10$ J) üst plakanın ilk üç katmanında ve alt plakanın 1., 2. ve 8. katmanlarında Hashin Fiber çekme (Eşitlik 4.1) kriterine göre hasar görünmez iken, üst ve alt plakanın diğer katmanlarında fiber açı ile aynı yönde ($\alpha = 0^o$) boyuna doğrultuda çekme altında fiber hasarlarının olduğu görülmektedir (Şekil 4.7). Oluşan en büyük çekme altında fiber hasar alanı 92 mm^2 ile üst plakada 5. katmanda, 81 mm^2 ile alt plakada 4. katmandadır. Üst plakanın 5., 6., 7. ve 8. katmanlarında oluşan fiber hasar alanlarında düzenli bir azalış vardır. Alt plakada ise, 4. katmanda en büyük hasar alanı 5., 6.,7. ve 8. katmanlarda düzenli bir şekilde azalmıştır ve alt plakanın en alt katmanı olan 8. katmanda fiber hasar alanı görülmektedir. $E = 10$ J ve $E = 40$ J enerji seviyelerinde kompozit bindirmenin kalınlığı boyunca üst plaka 1. katmanından itibaren başlayıp alt plaka 8. katmanına kadar olan çekme altındaki fiber hasar kriterine göre hasar alanlarının değişimi Şekil 4.8'de görülmektedir.

Matrisin çekme altında (Eşitlik 4.3) uğradığı hasarın alanları fiber hasar alanlarına



Şekil 4.9. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 40$ J).



Şekil 4.10. Çekme altında Hashin 3B matris hasar kriteri alanlarının $E = 10$ J, $E = 40$ J, $t_2 = 0.2$ mm, $\alpha = 0^o$ için bağlantı kalınlığı boyunca değişimi.

göre oldukça büyüktür. Fiberlerin plakaların boyuna yönünde yük taşımasından dolayı ($\alpha = 0^o$) matris üst plakanın tüm katmanlarında fiber açısına dik enine yönünde hasara uğradıkları görülmektedir. Alt plakada çekme altında matris hasarları yön değiştirmeye başlamış, plakaların enine doğrultusundan boyuna doğrultusuna fiber yönünde hasar alanları gelişmiştir. Üst plakanın 1. katmanında yan yüzeylerde başlayıp orta noktaya doğru ilerleyen çekme altında matris hasarı alt katmanlarda orta noktada yığılma göstermiştir. Alt plakada ise matrisin hasar yönü değişmiş, fiberin orta noktada yük taşıyamamasından ve çekme altında alt plakanın orta noktasında hasara uğramasından dolayı alt plakanın özellikle 6., 7. ve 8. katmanlarında belirgin olarak matris fiber yönünde hasara uğramıştır. Çekme altında matris hasarı vurucunun temas ettiği üst plaka 1. katmananında en büyük alana (2240 mm^2) sahip olup, yapıştırıcı arayüzeyine doğru düzenli olarak azalmakta, alt plakanın yapıştırıcı ile arayüzeyi olan 1. katmanından itibaren tekrar artış göstermekte, alt plakanın en alt katmanı olan 8. katmanda 1529 mm^2 olarak gerçekleşmektedir. Kompozit bindirmenin kalınlığı boyunca üst plaka 1. katmanından itibaren başlayıp alt plaka 8. katmanına kadar olan çekme altındaki matris hasar kriteri alanlarının değişimi düşük ve yüksek enerji seviyesi için Şekil 4.10'da görülmektedir. Üst plakanın vurucu ile temas eden 1. katmanında

en büyük değere sahip olan hasar alanı üst plaka kalınlığınca azaldığı, alt plakaya geçtikten sonra alt plakanın 8. katmanına doğru yaklaşık düzenli olarak arttığı görülmektedir.

Yüksek enerji seviyesine sahip ($E = 40$ J) darbe testi analizlerinden, yapıştırıcı kalınlığı $t_2 = 0.2$ mm, fiber açısı $\alpha = 0^o$ kompozit plakaların bindirme bağlantılarının darbe sonrası Hashin'in çekme altında fiber ve matris hasar kriterleri sonucu elde edilen hasar alanları Şekil 4.9'da verilmiştir. Yüksek enerji seviyesinde üst ve alt plakanın tüm katmanlarında fiber ve matrisin hasara uğradığı, oluşan hasar alanlarının düşük enerji seviyesine göre oldukça fazla olduğu görülmektedir. Düşük enerji $E = 10$ J seviyesinde üst plakanın ilk üç katmanında fiber çekme altında hasara uğramazken (Şekil 4.7), yüksek enerji seviyesinde alt ve üst plakaların tüm katmanlarında fiber çekme altında hasara uğramıştır (Şekil 4.9). Plakalarda 1. katmandan kalınlık boyunca aşağı doğru 8. katmana hasar alanlarının düzenli azaldığı görülmektedir. En büyük fiber hasarı 1096 mm^2 olarak vurucu ile temas eden üst plakanın 1. katmanında oluşmuştur. Alt plakada oluşan en büyük fiber hasar alanı ise yine 1. katmanda 540 mm^2 olarak gerçeklemiştir. Her iki plakanın en düşük hasar alanları 8. katmanlarında ve yaklaşık olarak 135 mm^2 değerinde gerçekleşmiştir. Üst plaka ve alt plakada fiber hasarları kelebek kanadı şeklinde ve fiber açısı yönünde başlamış, katmanlarda ilerledikçe lokal orta noktalarda toplanma şeklini almıştır. Enerjinin 4 kat artması ile, çekme altındaki fiber hasar alanı en büyük değer açısından 92 mm^2'den 1096 mm^2'ye çıkmış ve 11.9 kat artış göstermiştir. En büyük fiber hasarının oluştuğu katman düşük enerji seviyesinde üst plakada 5. katman iken yüksek enerji seviyesinde yine üst plakada 1. katman olmuştur.

Yüksek enerji seviyesi ve $\alpha = 0^o$ fiber açısında matris hasar alanları bakımından incelenecek olursa, toplam plaka alanı $125 \times 75 = 9375$ mm^2 olan üst plakanın 1. katmanının %47'si (4430 mm^2) hasara uğramıştır. Matris bakımında plakaların yüksek enerji seviyesinde oldukça zorlandığını söylemek mümkündür. Matris hasarlarının kalınlık boyunca değişim karakteristiği düşük enerji seviyesinin olduğu gibi olmuştur. Üst plakanın 1. katmanında en büyük değerinde olup, kalınlık boyunca aşağı 8. katmana doğru ilerledikçe azalmış, alt plakanın 8. katmanına

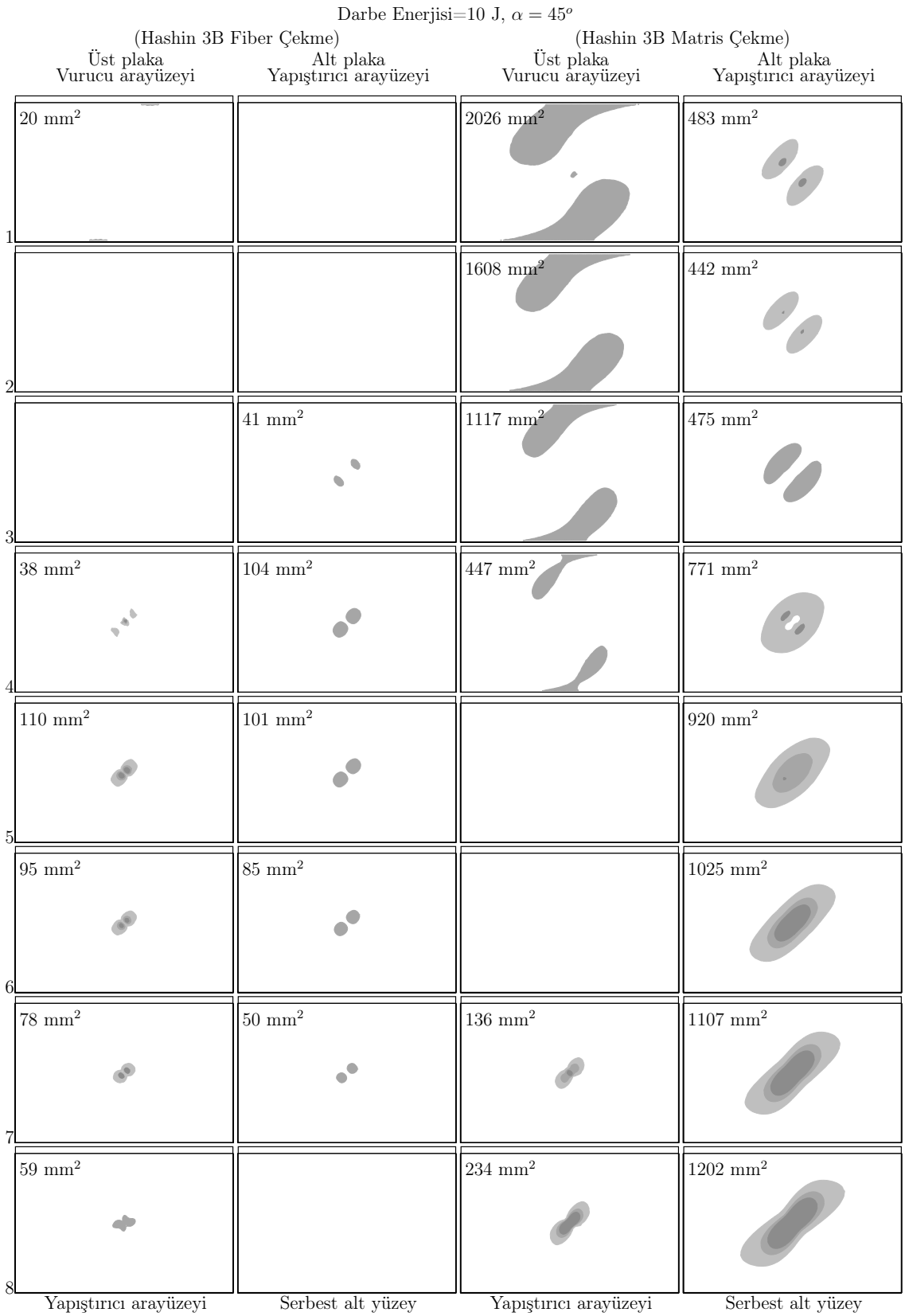
doğru tekrar artışa geçmiştir (Şekil 4.10). Normal şartlarda iki kompozit plaka yapıştırılmadan tek parça 4.2 mm kalınlığında kullanılmış olsaydı, Şekil 4.10'da görülen yapıştırıcı tabakasından hemen sonra alt plakanın 1. katmanında meydana gelen matris hasar alanındaki artışın olmaması gerekirdi. Yapıştırıcı tabakasından dolayı malzemedeki süreksizlikler ve yapıştırıcı tabakasının mekanik özelliklerinin kompozit plakanın mekanik özelliklerinden kötü olmasından dolayı, alt plakanın yapıştırıcı ile temas eden 1. katmanını oluşturan matris üst plakanın 8. katmanına göre daha fazla çekmeye maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Dolayısı ile alt plakanın 1. katmanında meydana gelen matrisin çekme altındaki hasar alanı üst plakanın yapıştırıcı ile arayüzeyi olan en alt katmanında meydana gelen hasar alanından daha fazla olmuştur.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların iki farklı fiber açısında ($\alpha = 45^o$,90^o) düşük ve yüksek enerji seviyelerinde ($E = 10, = 40$ J), çekme altında Hashin fiber ve matris hasar kriterlerine göre matriste ve fiberlerde hasar alanlarının kompozit plakaların kalınlıkları boyunca değişimleri sırasıyla Şekil 4.11-4.14'de verilmiştir.

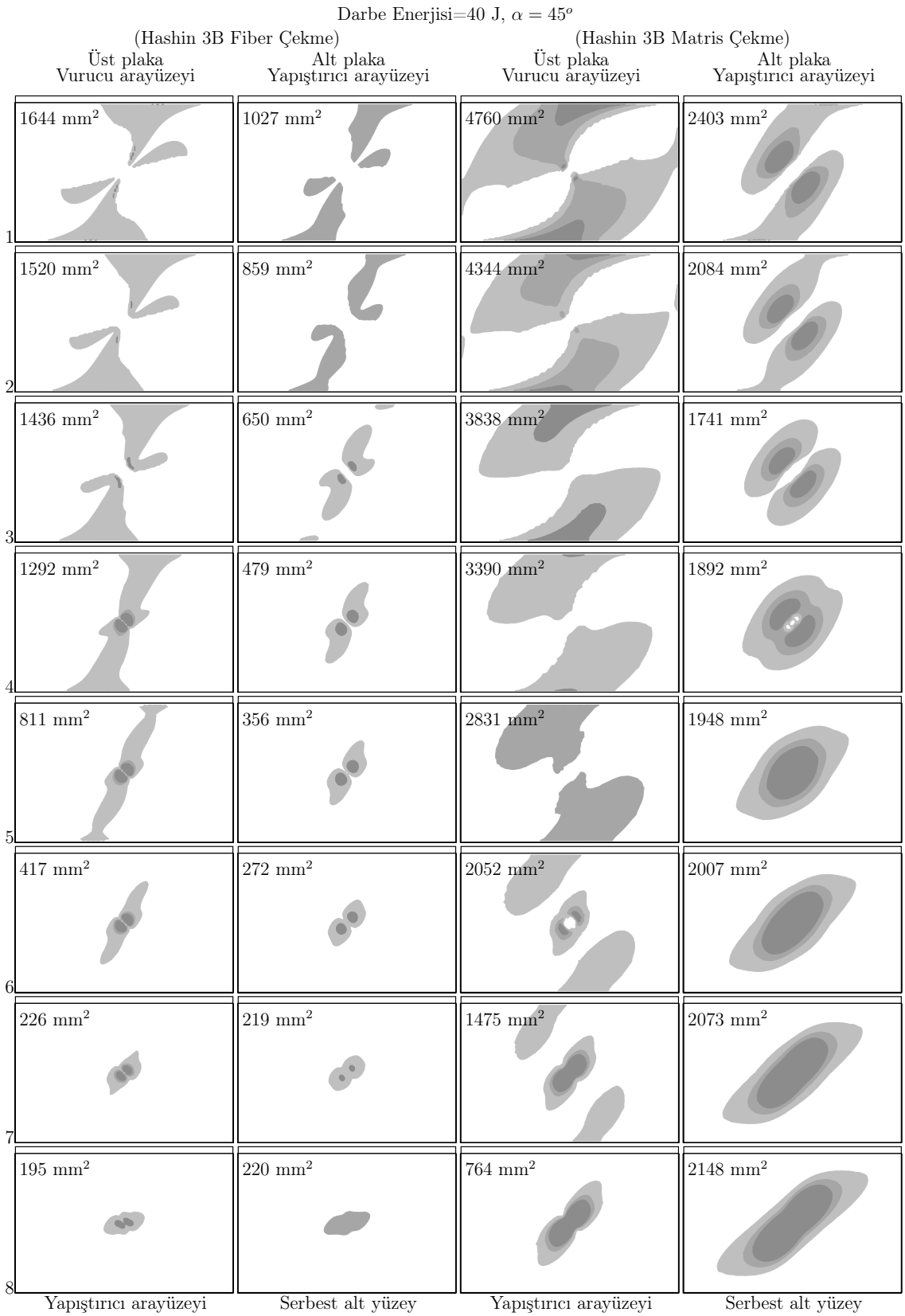
Düşük enerji seviyesinde $\alpha = 45^o$ için Şekil 4.11'e bakılacak olur ise, hem matris hem de fiber hasarının fiber yönüne göre şekillendiğini görmek mümkündür. Fiber açısının 45^o değeri için oluşan fiber hasar alanlarının 0^o'de oluşan fiber hasarlarından fazla olduğu, en büyük fiber hasar alanının üst plakanın 5. katmanında 110 mm^2 olduğu görülmektedir. $\alpha = 0^o$ fiber açısında da en büyük fiber hasar alanı üst plaka 5. katmanında 92 mm^2 olarak gerçekleşmiştir. Fiber açısının 45^o olması ile oluşan fiber hasar alanının en büyük değerinde %20 artış olmuştur. Fiber hasarlarının kalınlık boyunca değişim karakteristiği 0^o fiber açısındaki hasar alanlarının değişim karakteristiğine benzemektedir.

Matris hasar alanları Şekil 4.11'de incelenecek olur ise, en büyük hasar alanının üst plakanın 1. katmanında olduğu, kalınlık boyunca ilerledikçe hasar alanlarının azaldığı, üst plakanın 5. ve 6. katmanında matriste hasara rastlanmadığı görülmüştür. Alt plakada oluşan en büyük matris hasarı yine alt plakanın en alt katmanı 8. katmanında 1202 mm^2 olarak ortaya çıkmıştır.

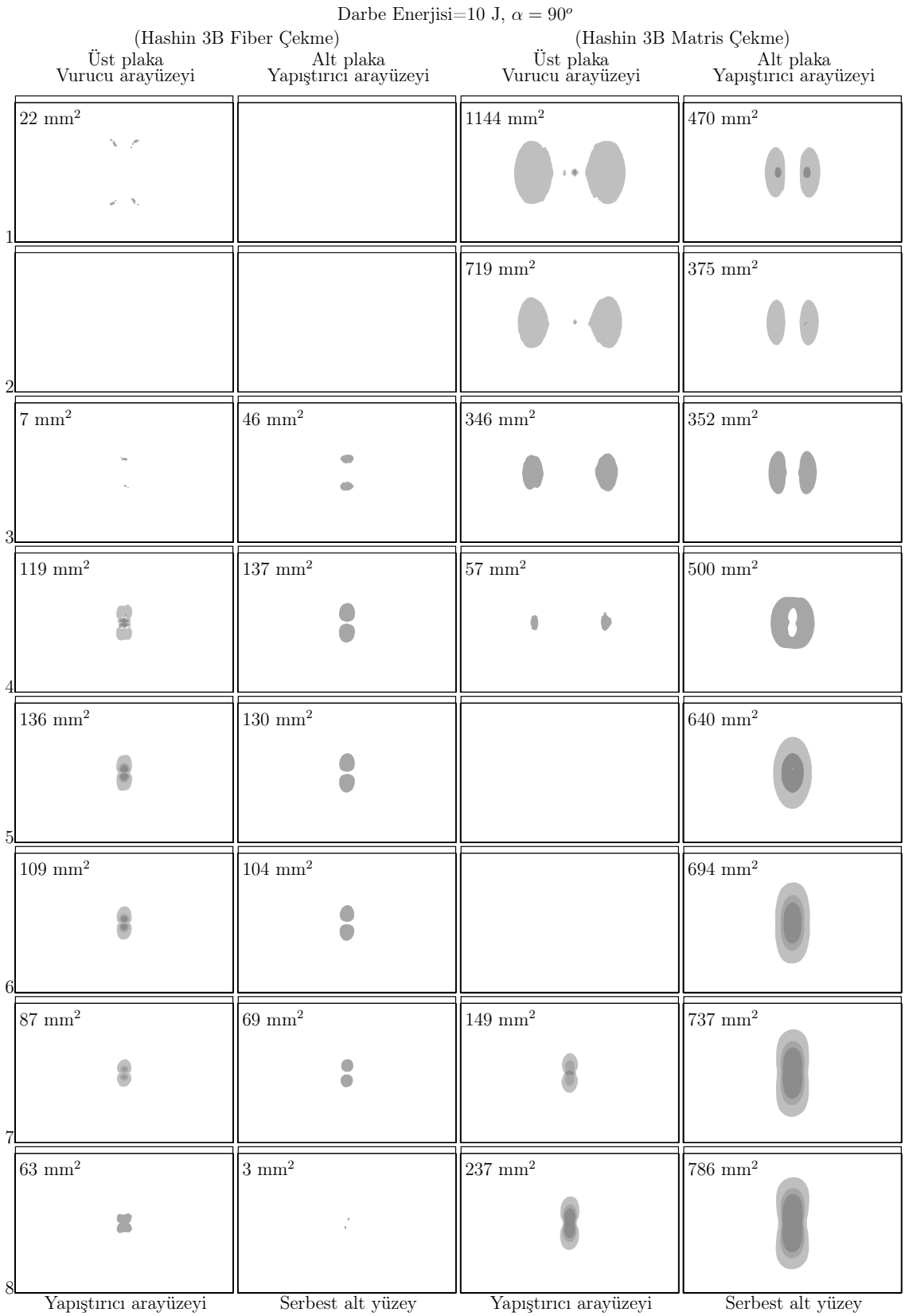
$\alpha = 45^o$ fiber açısının yüksek enerji seviyesi $E = 40$ J altındaki fiber ve matris



Şekil 4.11. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 10$ J).



Şekil 4.12. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 40$ J).



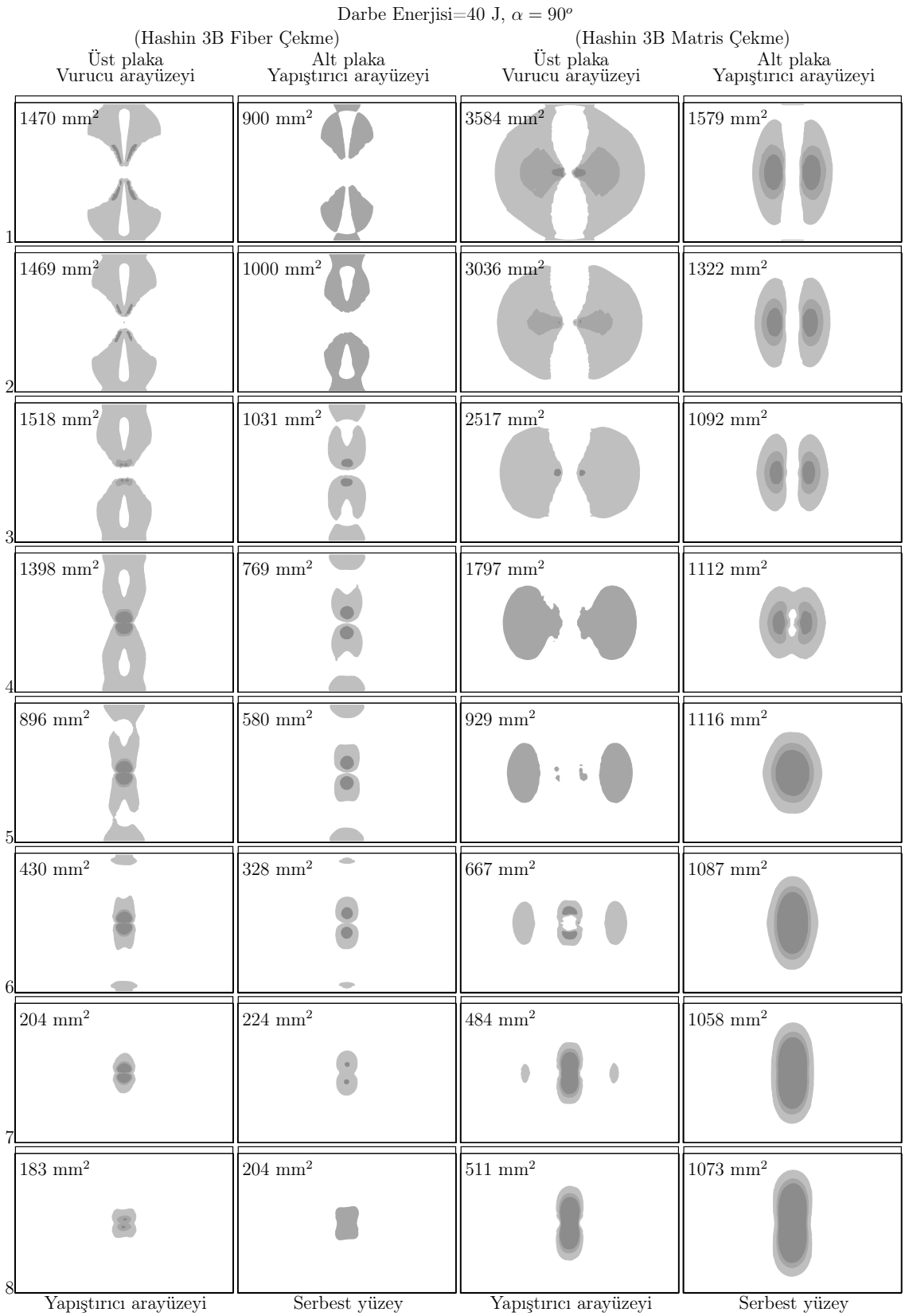
Şekil 4.13. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 10$ J).

hasarları Şekil 4.12'de görülmektedir. Enerji seviyesinin artması ile oluşan hasar alanlarının fiber açısına göre şekillenmeleri alt ve üst plakanın tüm katmanlarında oldukça belirgindir. Enerji seviyesinin 4 kat artışı çekme altında fiberlerde oluşan en büyük hasar alanını kat artarak 110 mm^2'den 1644 mm^2 değerine taşımıştır. En büyük fiber hasarının oluştuğu katman değişmiştir. Düşük enerji seviyesinde üst plakanın 5. katmanı iken yüksek enerji seviyesinde darbe ile temas eden üst plakanın 1. katmanı olmuştur. Fiber hasar alanları alt ve üst plakaların her ikisinde 1. katmandan 8. katmana doğru azalma göstermiştir. Alttaki katmanların (7. ve 8. katmanlar) fiber hasar alanları vurucu hizasında bölgede toplanmış, bu katmanlarda ortalama hasar alanı ise 220 mm^2 tespit edilmiştir. Matris hasar alanları $\alpha = 45^o$'de $\alpha = 0^o$'ye göre üst plakanın 1. katmanında %7.5 artışla 4760 mm^2, üst plakanın 8. katmanında %65 düşüş ile 764 mm^2 olmuştur. $\alpha = 45^o$'de oluşan en büyük hasar alanı $\alpha = 0^o$ 'de oluşan en büyük hasar alanından büyük olmasına rağmen, üst plaka için 3. katmandan sonra $\alpha = 0^o$ 'de matris daha çok zorlanmış ve oluşan hasar alanları $\alpha = 45^o$ fiber açısında oluşan hasar alanlarından daha büyük olmuştur. Alt plakanın tüm katmanları $\alpha = 0^o$ fiber açısında $\alpha = 45^o$ fiber açısına göre çok daha fazla hasara magruzdur. Fiber açısının artması ile kompozit plakalarda her bir katmanın mukavemetinin arttığı temas kuvvetleri değişimlerinden ve oluşan hasar alanlarından görülmektedir. Fiber daha çok yük taşımakta, matris daha az hasara uğramaktadır. $\alpha = 45^o$ fiber açısı ve $E = 40$ J enerji seviyesinde alt plakada oluşan matris hasarları kompozit plaka katmanları esas alınarak $\alpha = 0^o$ fiber açısı ve $E = 40$ J enerji seviyesinde oluşan hasar alanları ile kıyaslandığında $\alpha = 45^o$'nin daha düşük olduğu görülmektedir. Hatta $\alpha = 45^o$'de en alt plakada oluşan en büyük matris hasar alanı 2403 mm^2 ile 1. katmandadır ve $\alpha = 0^o$ 'de 2. katmanda oluşan en küçük hasar alanı 2411 mm^2'den küçüktür. $\alpha = 0^o$ fiber açısında matris hasarları bakımından alt plakanın en çok zorlanan plaka olduğu görülmektedir.

Fiber açısının $\alpha = 90^o$ değeri için düşük ve yüksek enerji seviyesinde oluşan hasar alanları sırasıyla Şekil 4.13-4.14'de verilmiştir. Fiber açısının artması ile fiberin daha çok hasara zorlandığı, matrite oluşan hasar alanlarının azaldığı görülmektedir. $E = 10$ J düşük enerji seviyesine sahip fiber açısının $\alpha = 90^o$ olduğu darbe

analizlerinden elde edilen fiber hasar alanları incelendiğin zaman, en büyük hasar alanının alt plakanın 4. katmanında 137 mm^2 olarak gerçekleştiği, diğer iki fiber açısında üst plakanın ilk üç katmanında fiberde hasar oluşmaz iken, $\alpha = 90^o$ fiber açısında üst plakanın 1. ve 3. katmanında azda olsa hasarın oluştuğu, oluşan hasar alanlarının sırasıyla 22 mm^2 ve 7 mm^2'ye eriştiği görülmektedir. Diğer iki fiber açısının alt plakasının son katmanında hasar oluşmaz iken, $\alpha = 90^o$ fiber açısında son katmanda noktasal olarak plakanın orta noktasında 3 mm^2 hasarın olduğu görülmektedir. Düşük enerji seviyesinde üst plakada oluşan en büyük matris hasar alanı 1144 mm^2 olup, diğer iki fiber açısında oluşan hasar alanından küçüktür. Genel olarak $\alpha = 90^o$ fiber açısında oluşan matris hasar alanları diğer fiber açılarına göre küçüktür. Üç farklı fiber açısında düşük enerji seviyesi için oluşan en büyük matris hasar alanları $\alpha = 0^o$ için 2240 mm^2, $\alpha = 45^o$ için 2026 mm^2 ve $\alpha = 90^o$ için 114 mm^2 olmuştur. Oluşan en büyük matris hasar alanları üst plakanın 1. katmanında görülmüştür. Alt plakada matris bakımından en çok zorlanan 8. katmandır ve fiber açıları için sırasıyla matris hasar alanları, 1529, 1202 ve 786 mm^2 olarak gerçekleşmiş, yine $\alpha = 0^o$ fiber açısı alt plakanın en çok zorlandığı fiber açısı olmuştur.

$E = 40$ J darbe enerji için hasar alanları incelenirse, farklı fiber açılarında fiberde en büyük hasar alanları sırasıyla, 1096 mm^2 (üst plaka 1. katman), 1644 mm^2 (üst plaka 1. katman) ve 1518 mm^2 (üst plaka 3. katman) olarak gerçekleştiği, fiber açısının artması ile fiberlerde oluşan hasarların arttığı, fiberin daha çok zorlandığı ve daha çok yük taşımak zorunda kaldığı açıktır. Fiber demetleri en çok $\alpha = 45^o$ fiber açısında risk altında olduğu görülmektedir. Matrisde ise durumun tam tersi olduğu gözlenmektedir. Sadece $\alpha = 45^o$ fiber açısında üst plakanın ilk bir-iki katmanının en büyük hasar alanına sahip olmasına rağmen, fiber açısının artması ile genel olarak katmanlarda matris üzerinde oluşan hasar alanlarının ciddi düşüş gösterdiği görülmektedir. Özellikle fiber açısının artması ile alt plakanın tüm katmanlarında matriste oluşan hasar alanları net ve düzenli azalmaktadır. 0, 45 ve 90^o fiber açıları için alt plaka üzerinde 1. katmanda oluşan hasar alanları sırasıyla 2758, 2403 ve 1579 mm^2'dir.



Şekil 4.14. Darbe sonrası kompozit plakaların tabakalarında Hashin 3B fibre çekme ve Hashin 3B matris çekme hasar kriterlerine göre oluşan hasar alanları ($t_2 = 0.2$ mm, $E = 40$ J).

5. BÖLÜM

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI (DENEYSEL ÇALIŞMA)

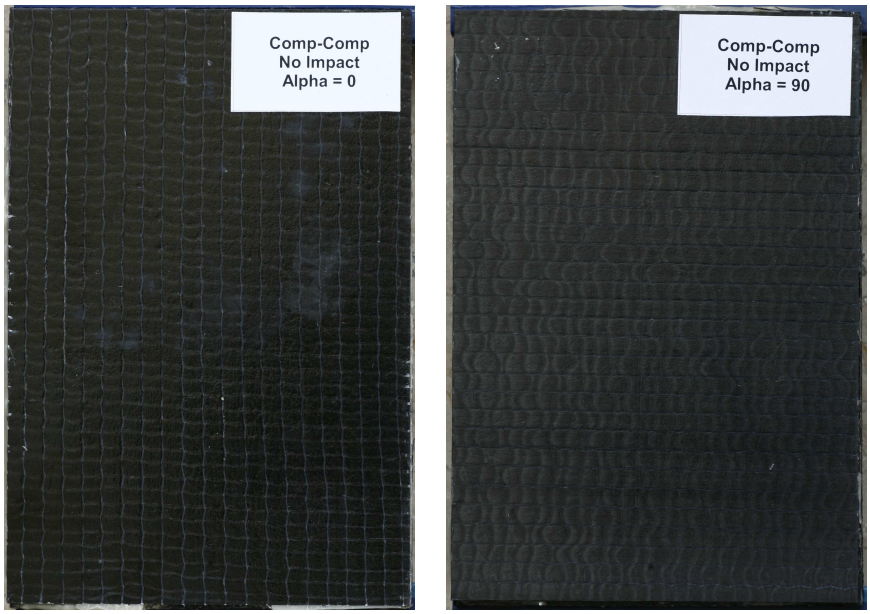
5.1. Giriş

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarının ABAQUS® yazılımı kullanılarak sayısal analizlerine ilaveten, bu bölümde yapıştırıcı ile birleştirilmiş farklı fiber açılarına ($\alpha = 0^o, 90^o$) sahip fiber takviyeli plastik esaslı kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir.

5.2. Yöntem

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit sistemlerin düşük hızlı darbe davranışlarında takip edilen yöntem metal sistemlerin düşük hızlı darbe davranışlarında uygulanan yöntemden farklı değildir. Kullanılan düşük hızlı darbe numune standardı (ASTM D7136 [54]) 'ye göre boyutları metal numune boyutlarından farklıdır. Kompozit plakaların düşük hızlı darbe testleri için numune geometrisi teorik analizlerde kullanılan geometri ile aynıdır (Şekil 4.2). Kompozit plakalar İzmir'de faaliyet göstermekte olan İzoreel LTD.ŞTİ.'nden temin edilmiştir. Kompozit plakalar plastik esaslı karbon fiber takviyeli 600 × 1000 mm boyutlarında 2 mm kalınlığında teslim alınmıştır. Giyotin ile kesilerek istenilen boyutlara getirilmiştir.

Kompozit sistemlerin deneylerinde kullanılan enerji seviyeleri, vurucu kütlesi ve hızı Tablo 5.1'de görülmektedir. İki farklı fiber açısı için ($\alpha = 0^o$ ve 90^o) ve üç farklı enerji seviyesinde deneyler gerçekleştirilmiştir. ABAQUS® sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilen teorik analizlerde kullanılan parametreler esas alınarak deneyler



Şekil 5.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş $\alpha = 0^o$ ve 90^o fiber açılarına sahip kompozit plakaların resimleri.

gerçekleştirilmiştir. Teorik analizlerde $\alpha = 0^o$, 30^o, 45^o, 60^o ve 90^o olmak üzere beş farklı fiber açısı için çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmada ise bu fiber açılarından sadece $\alpha = 0^o$ ve 90^o olmak üzere iki fiber açısı esas alınarak deneyler yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakalardan fiber açısı $\alpha = 0^o$ ve $\alpha = 90^o$ için darbe öncesi plakaların resimleri Şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kompozit bağlantıların darbe testlerinde kullanılan enerji seviyeleri.

Enerji seviyesi (J)	kütle (kg)	hız (m/s)
10	5.045	2
22.7	5.045	3
40.4	5.045	4

5.3. Darbe Sonrası Analizler

Kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışlarının metaller gibi olmadığı bilinmektedir. Metal plakaların darbe süresince plastik deformasyona uğramaları ve kalıcı şekil değişikliklerinin, deformasyon eğrilerinin CNC ile 3 boyutlu tespiti yapılabilirken, kompozit plakalarınki yapılamamıştır. Kompozit plakalarda darbe sonrası oluşan hasarlar çatlak, iç yapı hasarı, fiber kırılması, tabakalar arası

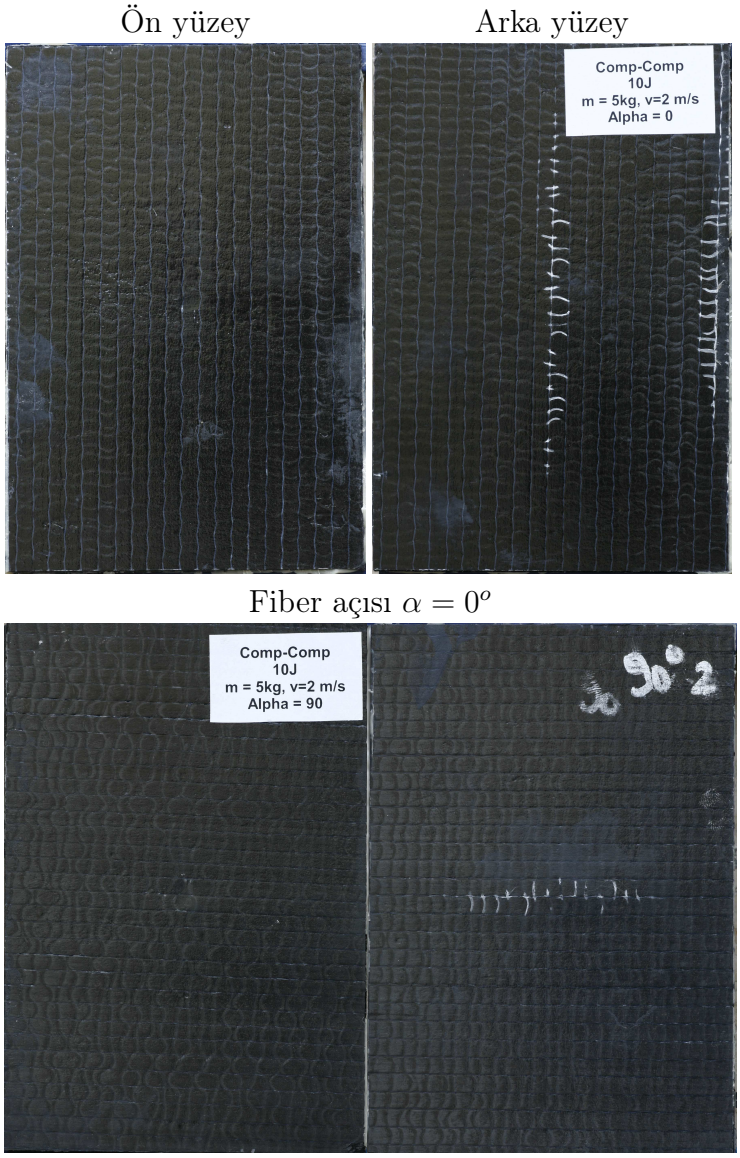


Şekil 5.2. Epoksiye kalıplanan kompozit plaka ve parçalarına ayrılabilir kalıp.

ayrılma şeklinde gerçekleşmesinden dolayı deforme olmuş numunelerin üzerinden deformasyon yüzey profilleri alınamamıştır.

Darbe sonrası mikroskop altında makro yapıda hasarların incelenmesi için yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakalar önce epoksi kalıbına alınmıştır. Epoksi ile kalıplama sırasında içi sıvı parafinle yeterince yağlanan metal kalıp içerisine kompozit plakanın $2-3$ mm havada durmasını sağlayacak şekilde destekler konulmuş, desteklerin seviyesine kadar epoksi dökülmüş ve içerisine kompozit plaka yatırılmıştır. Kompozit plakanın üstüne $2-3$ mm geçecek şekilde epoksi dökülmüştür. Epoksinin sertleşmesinden sonra (24 saat) metal kalıp parçalarına ayrılmış ve içerisinden numune çıkartılmıştır. Bütün numuneler için bu işlemler tekrarlanmıştır. Şekil 5.2 'de kullanılan metal kalıbın ve içerisinde numune ile yeni epoksi dökülmüş kompozit plakın resmi görülmektedir. Metal kalıbın yan yüzeyleri M6 civatalar ile alt plakaya tutturulmuştur. Yan yüzeylerinin sökülebilir olması epoksi sertleştikten sonra kalıp içerisinden numunelerin çıkartılmasında büyük kolaylık sağlamıştır.

Epoksi ile kalıplanan kompozit plakalar vurucunun temas ettiği orta nokta referans alınıp metal sistemlerde olduğu gibi ortadan önce ikiye kesilmiş, daha sonra iki parça tekrar ortadan ikiye kesilmiştir. 4 parçaya ayrılan plakanın 1 parçası referans alınarak üzerinden makro görüntüleme işlemleri yapılmıştır.

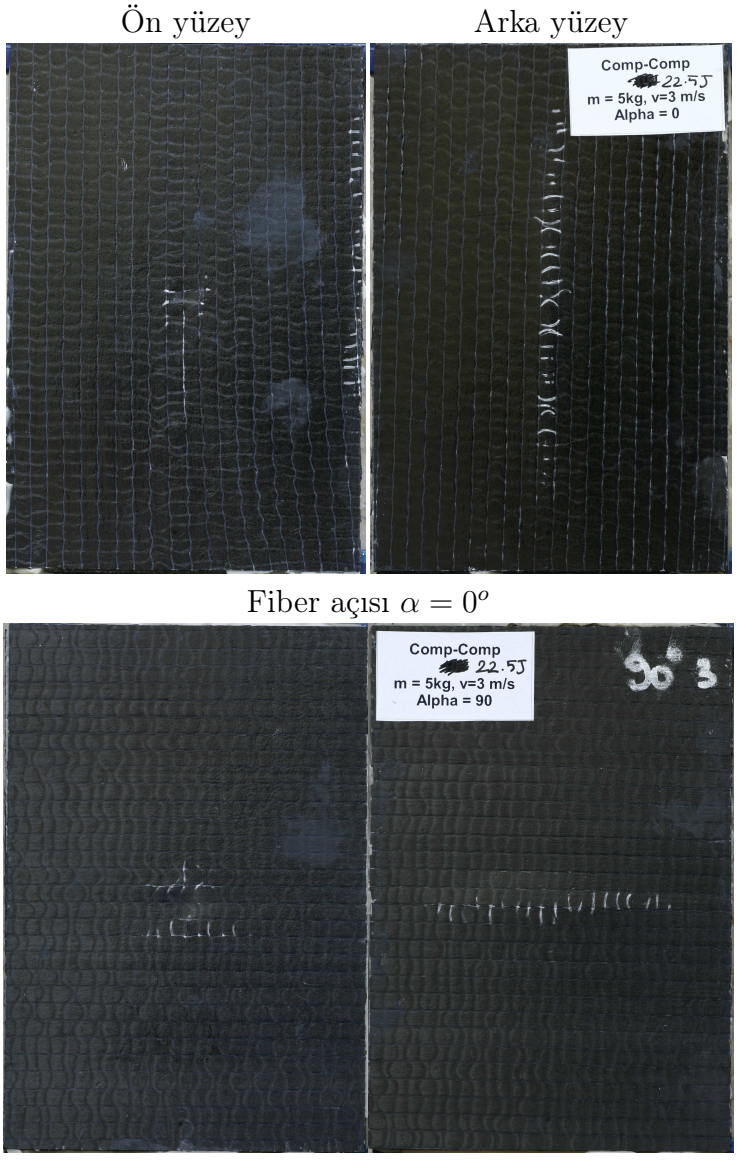


Şekil 5.3. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 10 J enerjili darbe testi sonrası hasarlı ön ve arka yüzeylerinin fotoğrafları.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakalar düşük hızlı darbe deneylerinden sonra ön ve arka yüzeylerinden fotoğraflanmışlardır. Üç farklı enerji seviyesi $(10, 23, 40$ J) ve iki farklı fiber açısı ($\alpha = 0^o$ ve 90^o) için deney sonrası çekilen fotoğraflar sırayla Şekil 5.3-5.5'de sunulmuştur.

Şekil 5.3 'de görüldüğü üzere, en düşük enerji seviyesi 10 J darbe enerjisinde her iki fiber açısı için, plakaların ön yüzeyinde vurucunun temas ettiği bölgede belirsiz iken, arka yüzeyde fiber açısı yönünde ilerleyen matris hasarları görülmektedir.

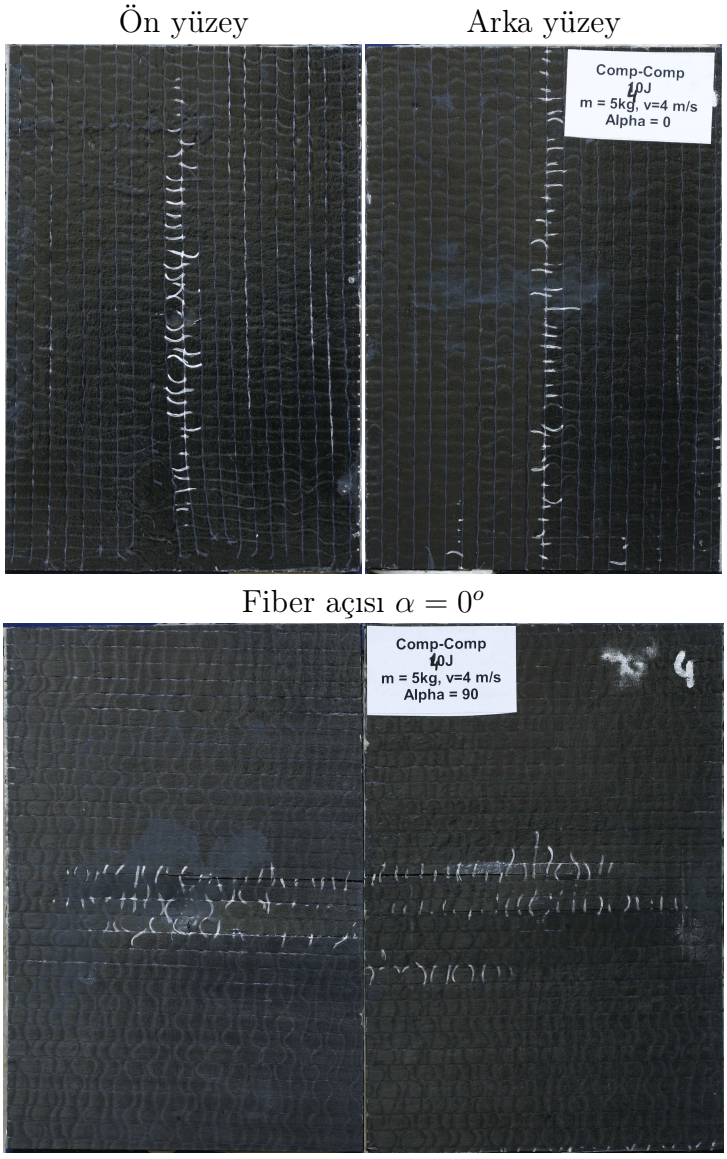
$\alpha = 0^o$ fiber açısında fiberler plakaların uzun kenarı boyunca yönelmektedirler. Bu durumda arka yüzeyde oluşan çatlak, fiber ile aynı yönde ve matris üzerinde oluşmaktadır. Hasarın büyüklüğü diğer enerji seviyelerine göre çok olmamakla birlikte plaka boyunun %60'ında görülmektedir.



Şekil 5.4. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 23 J enerjili darbe testi sonrası hasarlı ön ve arka yüzeylerinin fotoğrafları.

Enerji seviyesinin artması ile birlikte doğal olarak oluşan hasarlar arttığı fotoğraflardan görülmektedir. 23 J enerji seviyesi için oluşan hasarlar Şekil 5.4 'te sunulmuştur. Ön yüzeyde temas bölgesi çevresinde oluşan hasar belirgin bir şekilde görülmektedir. Arka yüzeyde oluşan hasar fiber açısı yönünde matris hasarı olarak

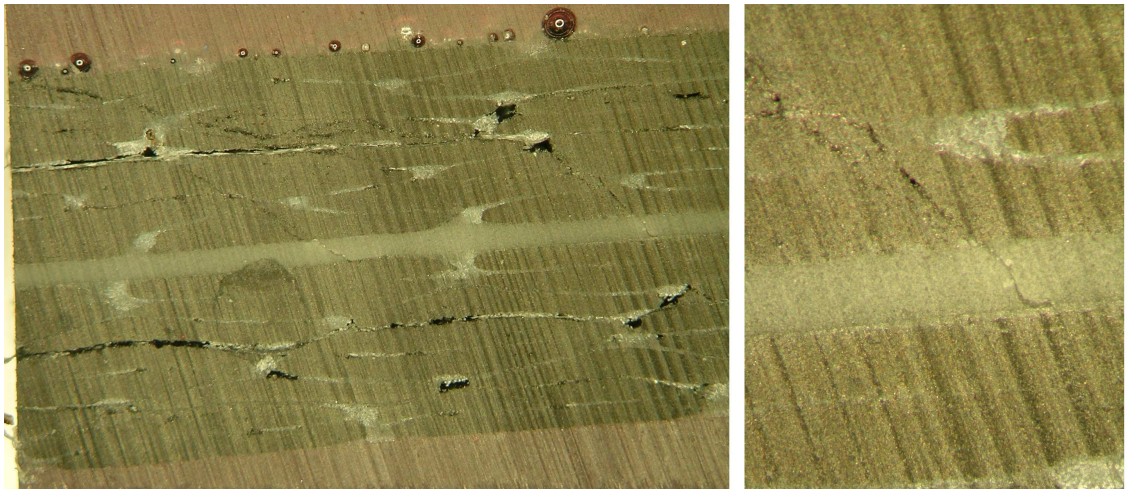
gerçekleşirken, ön yüzeyde hem fiberde hem de matris üzerinde gerçekleşmiştir. $\alpha = 90^o$ fiber açısında arka yüzeyde oluşan hasarın 10 J darbe enerjisinde oluşan hasara göre çok daha belirgin olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.5. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 40 J enerjili darbe testi sonrası hasarlı ön ve arka yüzeylerinin fotoğrafları.

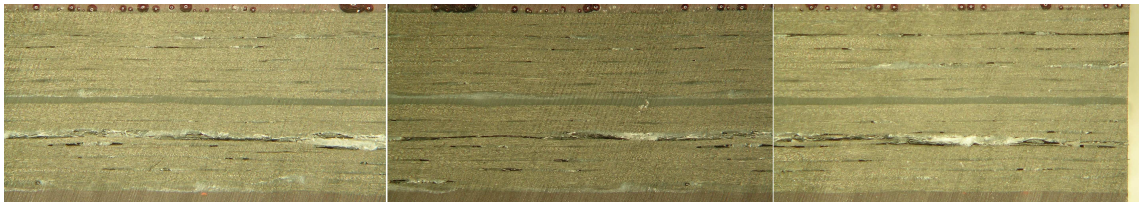
40 J'lük darbe enerjisinde $\alpha = 0^o$ fiber açısında fiber ön ve arka yüzeyde kısmen düzenli ve düşük enerji seviyesindeki benzer karakteristiğe sahip iken, $\alpha = 90^o$ fiber açısında artık plakaların ön ve arka yüzeylerinde makro boyutta çatlakların oluştuğu, plakaların tamamen kırılma ve çatlama hasarına uğradığı görülmektedir. Baskın hasar tipinin yine matris kırılması şeklinde oluştuğu tespit edilmiştir. $\alpha = 90^o$ fiber

açısında ön yüzeyde matrisin yanında makro ölçekte fiberlerinde hasara uğradığı görülmektedir. Temas kuvveti grafiklerinden de görüldüğü üzere $\alpha = 90^o$ fiber açısında 40 J enerji seviyesinde plakaların tamamen yetersiz oldukları görülmektedir (Şekil 5.10).



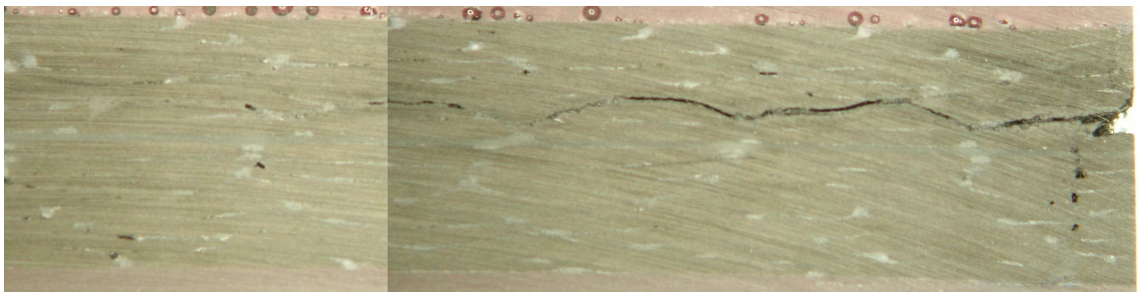
Şekil 5.6. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 23 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 90^o$.

10 J'lük düşük darbe enerjisinde kompozit plaka üzerinde oluşan iç yapı hasarları mevcut imkanlar dahilinde görüntülenememiştir. Şekil 5.6'da 23 J enerji seviyesinde makro yapıda $\alpha = 90^o$ fiber açısında uzun kenarın kesitinde (fibere dik doğrultuda) elde edilen resim görülmektedir. Resim iki kısımdan oluşmaktadır. Sol taraftaki resmin sol kenarı plakanın tam orta noktasına karşılık gelmekte, vurucu üst yüzeyden temas etmektedir. Sağ taraftaki resimde ise yapıştırıcı tabakası üzerinden geçen çatlak görülmektedir. Alt kompozit plakada arka yüzeyde oluşan çatlak ve patlama sol taraftaki resmin sol alt köşesinde net bir şekilde görülmektedir. İlgili köşenin normal şartlarda keskin olması gerekir iken, darbe sonrası oluşan çatlağı kalıplama malzemesi epoksinin doldurduğu tespit edilmiştir. Alt ve üst her iki plakada tabakalar arası ayrılma oluşmaktadır. Alt plakada oluşan tabakalar arası ayrılma üst plakaya göre daha belirgindir. Üst plakada oluşan çatlakların tabakalar üzerinden ilerleyip yapıştırıcı üzerinden geçtiği sol taraftaki resimde orta ve sağa yakın bölgede 2 yerde görülmektedir, sağ taraftaki resimde ise ayrıntılı olarak görülmektedir. Ana hasarlar matris ve tabakalar arası ayrılma şeklinde hasar tipleridir. Fiber hasarı ise makro görüntülemede tesipt edilememiştir.



Şekil 5.7. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 23 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 0^o$.

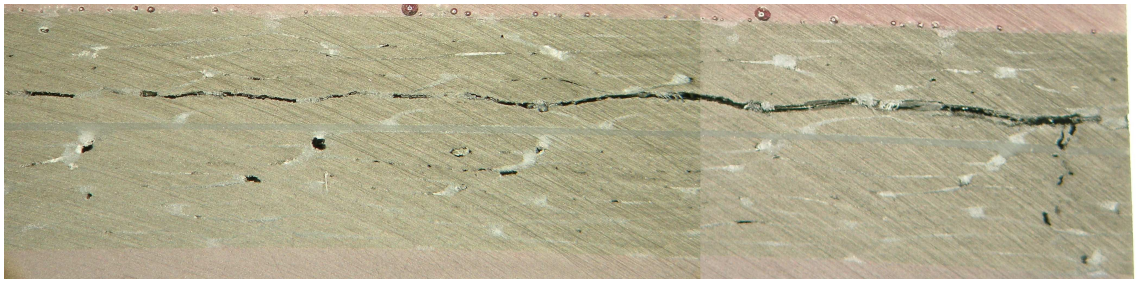
23 J darbe enerjisinde $\alpha = 0^o$ fiber açısı için uzun kenar kesitinden (fiber yönünde kesit) alınan üç makro görüntü Şekil 5.7 'de görülmektedir. Resim sağ tarafı vurucunun temas ettiği orta noktadan itibaren başlamaktadır. Vurucu üst taraftan plakaya temas etmektedir. $\alpha = 0^o$ olması bağlantının $\alpha = 90^o$ olmasına göre daha esnek bir yapıya sahip olması manasına geldiği için, $\alpha = 0^o$ fiber açısında daha fazla darbe enerjisi elastik olarak absorbe edilmiştir. Dolayısı ile plakalarda oluşan hasarlar daha azalmaktadır. Teorik analizlerin işaret ettiği gibi, alt plaka çekme gerilmesi etkisi altında kalmakta ve bağlantı üzerinde en çok hasara alt plaka uğramaktadır. Alt plaka üzerinde oluşan tabaka ayrılması belirgin bir şekilde görülmektedir. 23 J enerji seviyesinde $\alpha = 0^o$ için makro resimlerde yapıştırıcı tabakasında hasar tespit edilememiştir. Makro yapıda yapıştırıcının bütünlüğünü koruduğu söylenebilir.



Şekil 5.8. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 40 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 0^o$.

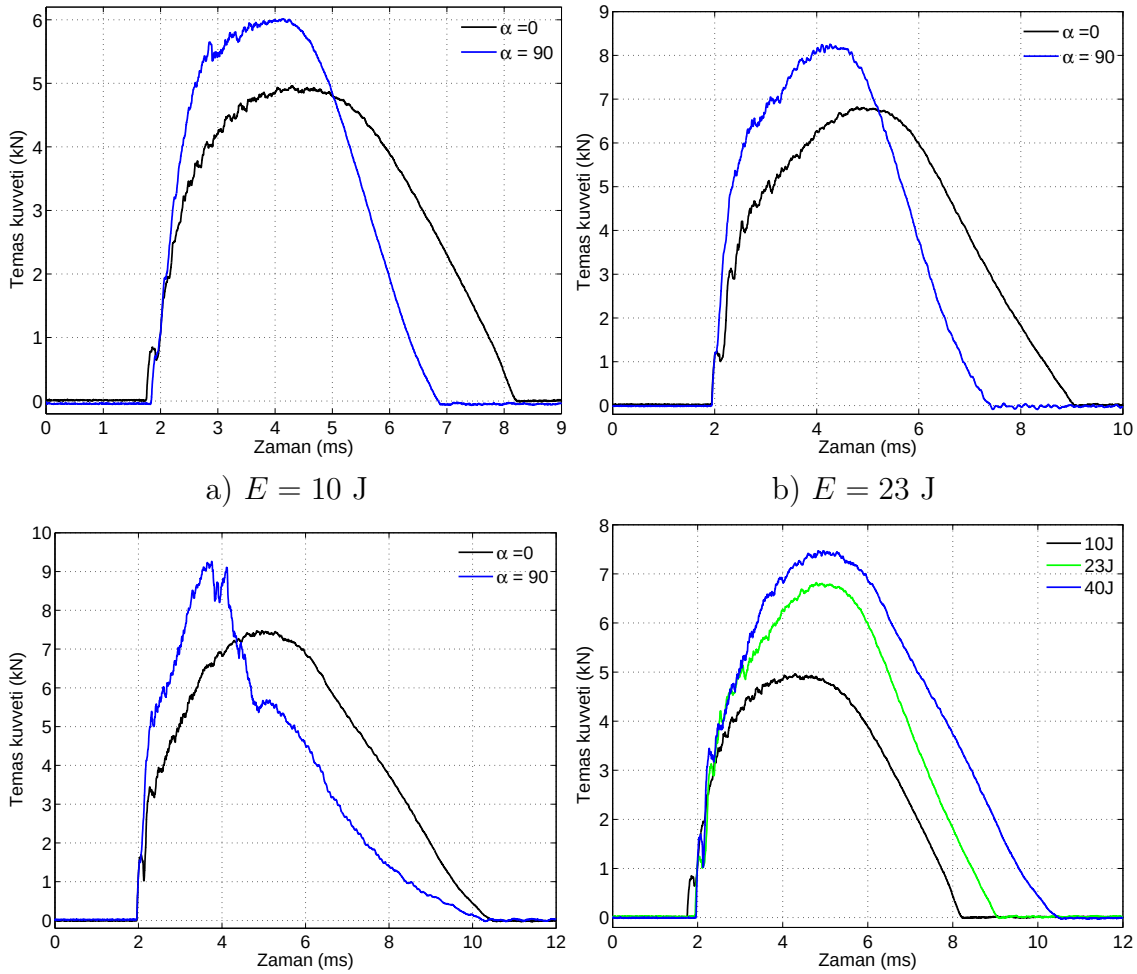
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş fiber takviyeli kompozit plakalar, en büyük hasara ve deformasyona 40 J enerji seviyesinde uğramışlardır. 40 J enerji seviyesinde, $\alpha = 0^o$ fiber açısında üst plakada tabakalar arası ayrılma olarak gelişen ve tabakadan tabakaya ilerleyen çatlağın makro görüntüsü Şekil 5.8 'te görülmektedir. Çatlağın

başladığı resmin sağ üst tarafı vurucunun temas ettiği orta noktayı göstermektedir. Resim fibere dik doğrutuda kesitten çekilmiştir. Görüntü parçanın kısa kenarından alınmıştır. Aynı parça üzerinden, Şekil 5.8 'te verilen kesitin 3 cm gerisinden alınan paralel kesitin görüntüsü Şekil 5.9 'te görülmektedir. Çatlağın devam ettiği ve büyüklüğünü koruduğu görülmektedir. Ayrıca çatlak üzerindeki bir çatlak damarının plakanın kalınlığı boyunca ilerleme yaptığı ve yapıştırıcı üzerinden geçerek alt plaka üzerinde devam ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların 40 J enerjili darbe testi sonrası makroskop altında kesit alanı, $\alpha = 0^o$, 3 cm ofsetli.

Kompozit plakaların darbe testi sonrası kesitlerinde hasar oluşumu ve yayılmasının incelenmesine ilaveten deneysel temas kuvvetlerinin değişimleride irdelenmiştir. Kompozit plakaların deneysel darbe davranışlarının incelendiği üç farklı enerji seviyesi (Tablo 5.1) için temas kuvvetlerinin değişimi Şekil 5.10 'da gösterilmiştir. İki farklı fiber açısının ($\alpha = 0^o, 90^o$) 10 J enerji seviyesinde temas kuvveti üzerine etkisi Şekil 5.10-a 'da görülmektedir. Farklı fiber açılarında yaklaşık 2 kN temas kuvveti seviyesine kadar darbe davranışı benzerlik gösterirken, $\alpha = 90^o$ fiber açısının kompozit plakanın kısa kenarı boyunca yönlenmesinden dolayı daha mukavim bir yapıya sahip plaka temas kuvvetinin artmasına sebep olmuştur. 10 J enerji seviyesinde en büyük temas kuvveti $\alpha = 90^o$ fiber açısında 6 kN olarak gerçekleşmiştir. Yine aynı enerji seviyesinde $\alpha = 0^o$ fiber açısında en büyük temas kuvveti 5 kN dur. 10 J enerji seviyesinde fiber açısının değişimi temas kuvvetinin %20 artmasına neden olmuştur. Toplam temas süreleri $\alpha = 0^o$ için 6.2 ms, $\alpha = 90^o$ için 5 ms olarak gerçekleşmiştir. Daha elastik yapıya sahip plakalarda temas kuvvetininin nüfuziyet ve ayrılma süreçlerindeki değişim grafikleri daha dik eğime sahiptirler.



a) $E = 10$ J b) $E = 23$ J

c) $E = 40$ J d) $\alpha = 0^o$

Şekil 5.10. Kompozit plakaların deneysel temas kuvveti değişimleri, a) $E = 10$ J, b) $E = 23$ J, c)$E = 40$ J, d) Fiber açısı $\alpha = 0^o$ için üç farklı enerji seviyesinde temas kuvvetlerinin değişimi.

Darbe enerjisinin 23 J olduğu düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen temas kuvvetlerinin değişimi 10 J darbe enerjisindeki değişime benzer olmakla birlikte, en büyük temas kuvvetleri ve toplam temas süreleri bakımından farklılıklar bulunmaktadır (Şekil 5.10-b). En büyük temas kuvveti $\alpha = 0^o$ için 7 kN, $\alpha = 90^o$ için 8.2 kN olarak tespit edilmiştir. Yine $\alpha = 0^o$ fiber açısında gerçekleşen toplam temas süresi (7 ms) $\alpha = 90^o$'den (5.5 ms) fazladır.

40 J darbe enerjisinde $\alpha = 0^o$ fiber açısına sahip plaka iç yapısında meydana gelen hasarların haricinde bir bütün olarak kırılma ve çatlama hasarlarına uğramıştır. Meydana gelen hasarlardan dolayı temas kuvveti hasarın oluştuğu andan itibaren ani olarak düşmüştür (Şekil 5.10-c). Alt plakanın kırılması ile birlikte bağlantının

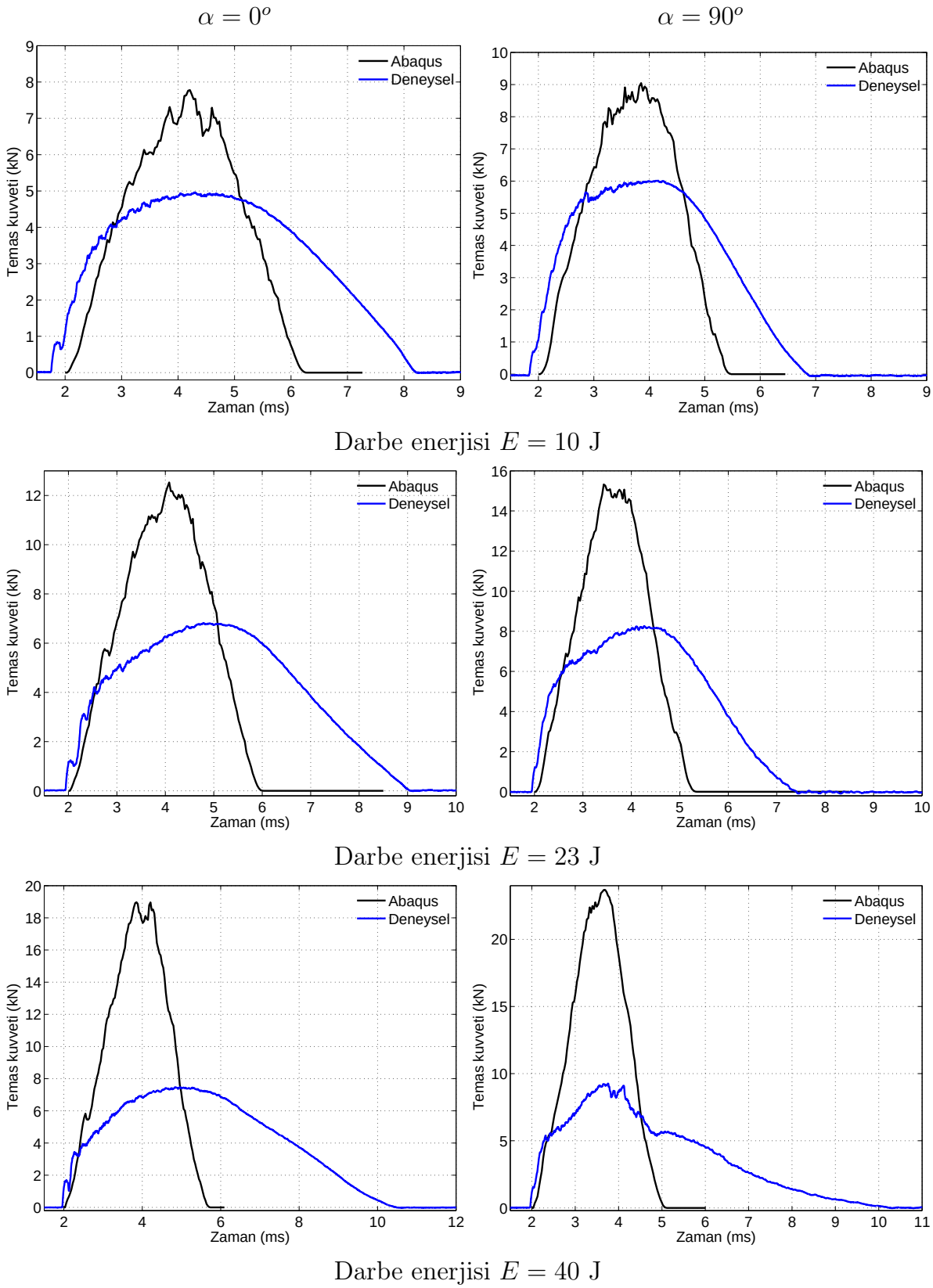
Tablo 5.2. Kompozit plakaların düşük hızlı darbe testlerinden elde edilen en büyük temas kuvvetleri ve temas süreleri.

Darbe enerjisi (J)	Fiber açısı $\alpha(^o)$	En büyük temas kuvveti (kN)	Toplam temas süresi (ms)	Zirveye çıkış süresi (ms)
10	0	4.95	6.43	2.73
	90	6.01	5.09	2.32
23	0	6.82	7.05	2.84
	90	8.25	5.55	2.31
40	0	7.47	8.48	3.00
	90	9.26	8.32	1.80

elastikiyetinde ani bir düşüş gerçekleşmiş ve darbe enerjisinin bir kısmı bu zaman aralığında harcanmıştır. Temas süresi 5 ms iken (5.5 kN), üst plaka tekrar vurucuya karşı direnç göstermeye başlamış ve darbenin bundan sonraki kısmının diğer enerji seviyelerine benzer bir şekilde düzenli değişmesini sağlamıştır.

Testleri gerçekleştirilen üç farklı enerji seviyesinin herbiri için iki farklı fiber açısına ait toplam temas süreleri, en büyük temas kuvvetleri ve bu temas kuvvetine çıkış süreleri Tablo 5.2 'de sunulmuştur. İlgilenilen tüm enerji seviyelerinde fiber açısı $\alpha = 90^o$ için temas kuvvetleri fiber açısı $\alpha = 0^o$'ye göre daha yüksek, toplam temas süreleri ise daha kısa olmuştur. 40 J enerji seviyesinde $\alpha = 90^o$ fiber açısına sahip plakalarda meydana gelen plaka kırılmalarından dolayı gerçekleştiği için toplam temas süreleri birbirine yakındır. Enerji seviyesinin artması ile fiber açısının temas kuvveti üzerindeki etkisi farklılık göstermektedir. 40 J enerji seviyesinde daha mukavim yapıya sahip olan $\alpha = 90^o$ fiber açısına sahip plaka çatlama ve kırılma hasarlarına uğramıştır. Kırılma ve çatlama, temas kuvvetinin değişimden de açıkça görülmektedir (Şekil 5.10-c). Fiber açısının $\alpha = 0^o$ olması uygulanan dört tarafı ankastre sınır şartlarında sistemin daha elastik ve esnek bir yapıya sahip olmasını sağladığı için darbe enerjisini elastik olarak sönümleme kabiliyeti daha fazla olmuştur. Böylelikle kırılma ve çatlama hasarları $\alpha = 90^o$ fiber açısına göre büyük oranda azalmıştır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların yapıştırıcı kalınlığı 0.2 mm, üç farklı enerji seviyesi (10, 23, 40 J) iki farklı fiber açısı ($\alpha = 0^o$ ve 90^o) için teorik ve deneysel temas kuvvetlerinin kıyaslanması Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Teorik



Şekil 5.11. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların darbe davranışlarının deneysel ve teorik temas kuvvetlerinin kıyaslanması.

analizlerde yapılan kabuller, hasar modellerinin plakaların geometrik yapısındaki değişiklikleri dikkate almaması, yani mekanik özelliklerini yada elastikiyetini değiştirmemesi sadece hasar bilgileri hakkında veri toplaması, teorik analizlerde kompozit plakalar için verilen mekanik özelliklerin deneylerde kullanılan kompozit plakaların özelliklerinden kısmen farklı olması gibi bir çok etmenden dolayı temas kuvvetleri arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Teorik temas kuvveti değerlerinin yüksek olması ve toplam temas süresinin kısa olması, metal sistemlerden elde edilen tecrübeler ışığında kompozit plakalarında teorik analizlerinde elastikiyet bozunum modellerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Böylelikle en büyük temas kuvvetlerinin ve toplam temas süresinin deneysel sonuçlara yakşalması sağlanabilecektir. Kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları ile ilgili elastikiyet bozunumlu hasar analizleri daha sonra yapılacak çalışmaların ana konusu olacaktır.

6. BÖLÜM

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ METAL-KOMPOZİT PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI (DENEYSEL ÇALIŞMA)

6.1. Giriş

Tez çalışmasının bu bölümünde yapıştırıcı ile birleştirilmiş farklı malzemelerden oluşan kompozit-metal tabakalı bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit plakalar $\alpha = 0^o$ ve $\alpha = 90^o$ olmak üzere iki farklı fiber açısına ve $v_f = 0.635$ fiber hacim oranına sahiptirler. Ayrıca alüminyum (Al) ve çelik (St) metal plakalar kullanılmıştır.

6.2. Yöntem

Testler ve analizler Tablo 6.1'de verilen sekiz farklı bağlantı için gerçekleştirilmiştir. Bindirme bağlantısında yapıştırıcı kalınlığı $t_2 = 0.2$ mm, vurucu çapı $D = 20$ mm, darbe enerjisi 40 J ($v = 4$ m/s, $m = 5.045$ kg) olup sabittirler. Diğer tüm testlerde olduğu gibi bağlantılar dört kenarından ankastredir. Numune boyutları ASTM D7136 [54] standartlarına göre hazırlanmıştır.

Bağlantılarda Al ve St metal ve kompozit plakalar Bölüm-3 ve 5'daki özelliklere sahiptir. Plakaların yapıştırılmasında benzer yöntemler kullanılmıştır.

6.3. Darbe Testi Sonuçları

Alt alüminyum plaka ve vurucu ile temas eden $\alpha = 0^o$ ve $\alpha = 90^o$ fiber açılı üst kompozit plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının 40 J enerjili darbe sonrası ön ve arka bağlantı yüzeylerinin hasar resimleri Şekil 6.1 'de sunulmuştur.

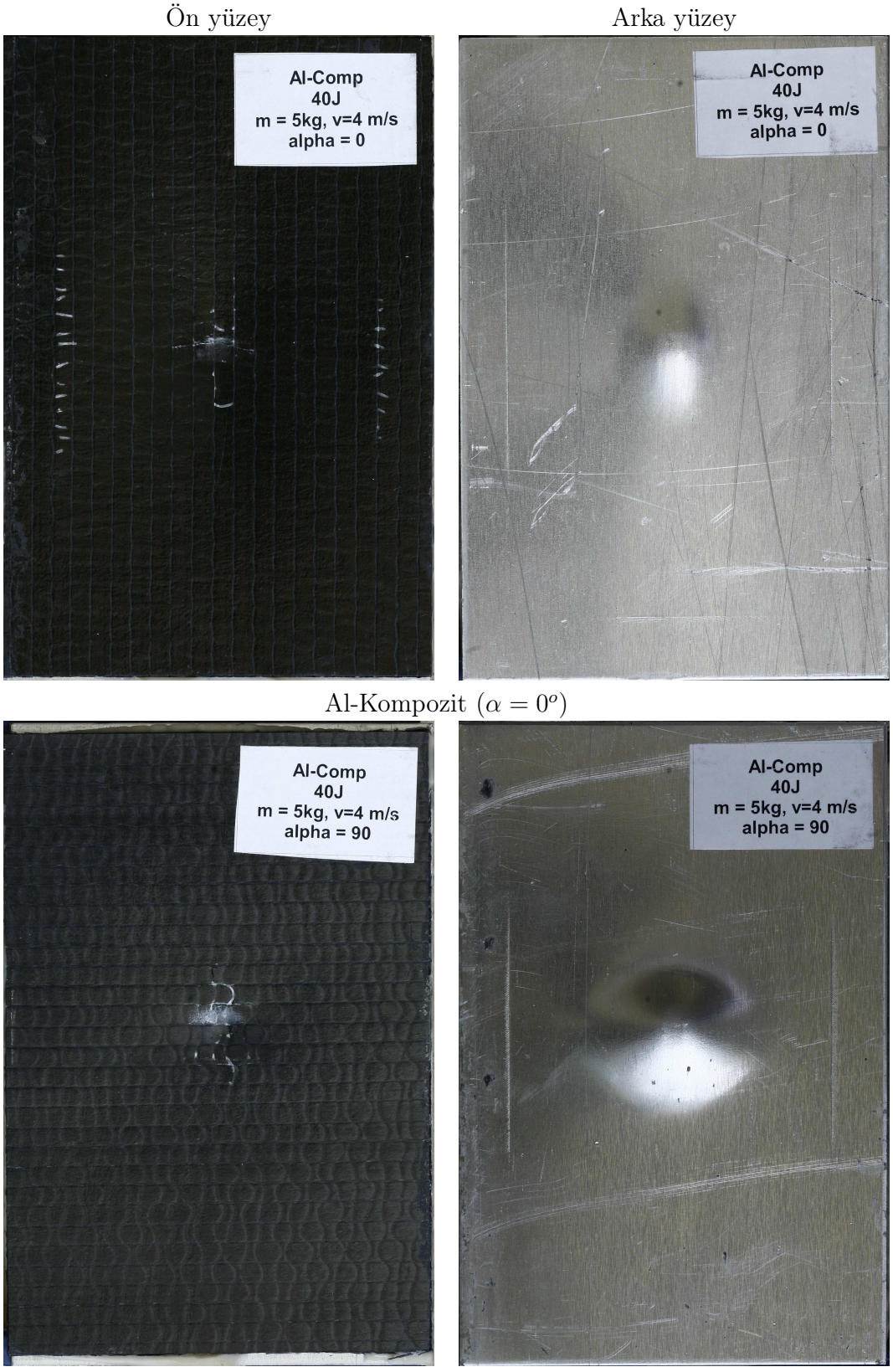
Tablo 6.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal-kompozit bağlantıların düşük hızlı darbe deneylerinde kullanılan plaka dizilimleri.

Alt plaka	Üst plaka	Fiber açısı α
Alüminyum	Kompozit	0^o
Alüminyum	Kompozit	90^o
Kompozit	Alüminyum	0^o
Kompozit	Alüminyum	90^o
Çelik	Kompozit	0^o
Çelik	Kompozit	90^o
Kompozit	Çelik	0^o
Kompozit	Çelik	90^o

Fiber açısının 90^o, yani fiberlerin kısa kenar boyunca yönlenmesi ile daha direngen bir yapıya sahip olan bağlantıda oluşan plastik deformasyonlar artmıştır. Arka yüzeylerde alüminyum plakada oluşan kalıcı deformasyon alanlarının fiber açısı yönündeki yönelimleri belirgindir. Fiber açısının $\alpha = 0^o$ olması ile daha esnek bir yapıya sahip olan bağlantıda kalıcı deformasyonlar azalmış, darbe enerjisi çoğunlukla oranda elastik olarak sönümlenmiştir.

Üst kompozit plakalarda vurucu ile temas eden bölgelerin ezildiği, özellikle 90^o fiber açısında oluşan hasarın daha belirgin olduğu görülmektedir. 0^o'lik fiber açısında üst kompozit plakanın boyuna doğrultusunda her iki kenarda ankastre bölgeye yakın konumlarda hasar olduğu görülmektedir. Oluşan hasarın matris hasarı olduğu, matris üzerinde çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir. 0^o'lik fiber açısında elastik olarak çok fazla çökme olmasından dolayı üst plakanın bu bölgelerinde çekme gerilmesinden dolayı hasarlar meydana gelmiştir. Aynı hasar modları 90^o'lik fiber açısında makro boyutta görülmemektedir.

$\alpha = 0^o$'lik fiber açısında alt alüminyum plakanın arka yüzeyinde oluşan eliptik deformasyonun boyutları 31.8×22.6 mm, $\alpha = 90^o$ fiber açısı için 35.5×45 mm dir (Şekil 6.1). Her iki fiber açısında alüminyum plakanın arka yüzeyinde oluşan plastik deformasyon bölgesi yaklaşık elips kabul edilirse, ölçümlerde elde edilen çapların kullanılması ile hesaplanan alan ve çevre değerleri Tablo 6.2 'de kıyaslamalı olarak verilmiştir. Oluşan elipslerin küçük ve büyük yarıçap oranları 0^o ve 90^o fiber açısı için sırasıyla 0.71 ve 0.79 olarak tespit edilmiştir. $\alpha = 90^o$ fiber açısında oluşan deformasyonun daha çok daireye benzediği söylenebilir.



Şekil 6.1. Alt alüminyum plaka üst kompozit plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J).

Tablo 6.2. Alüminyum-kompozit bindirmelerin alt plaka arka yüzeyinde oluşan kalıcı deformasyon alanları.

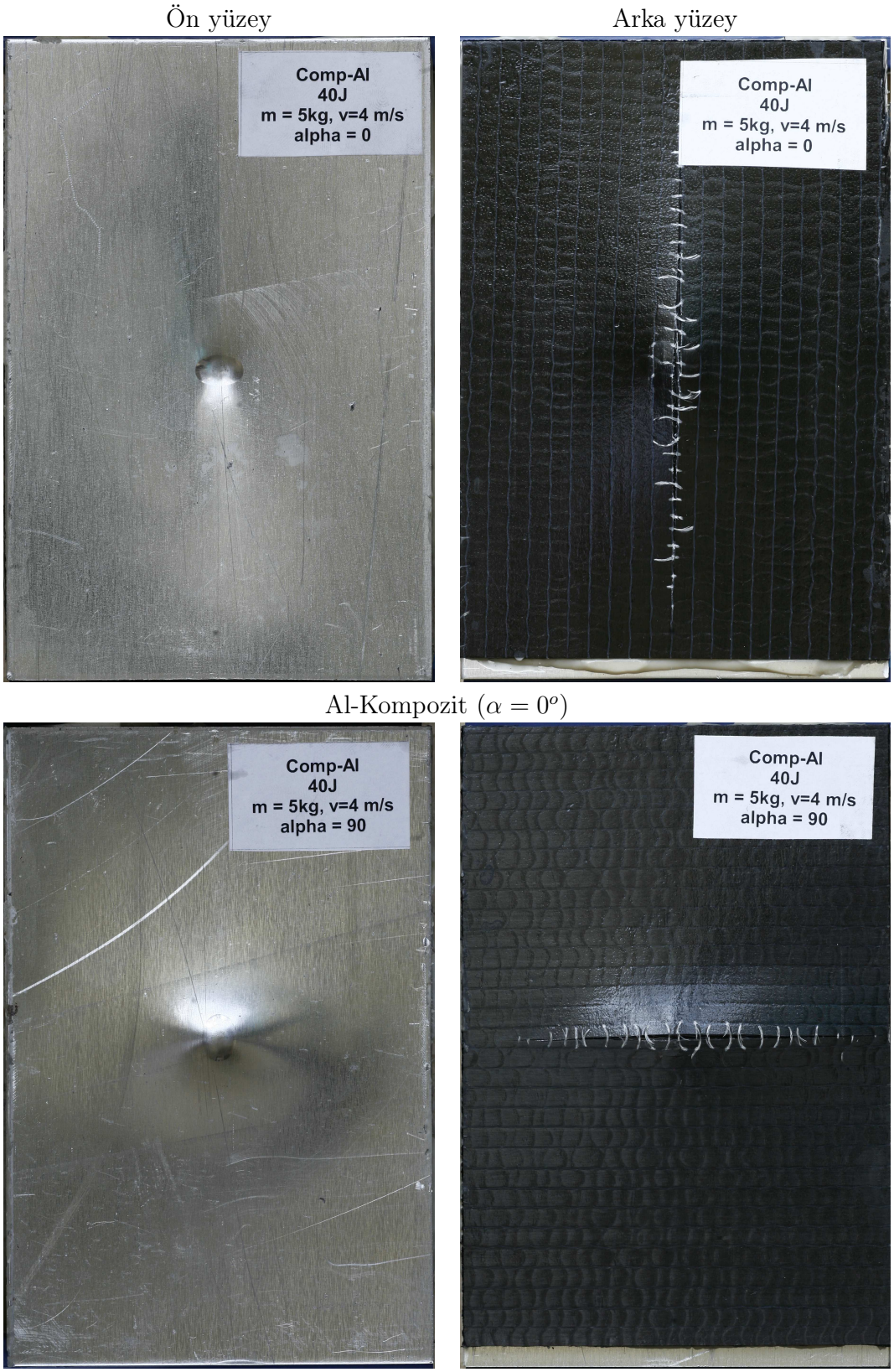
Fiber Açısı	r_1, mm	r_2, mm	$\frac{küçük(r_1,r_2)}{büyük(r_1,r_2)}$	Alan, mm^2	Çevre, mm
$\alpha = 0^o$	31.8	22.6	0.71	564	85
$\alpha = 90^o$	35.5	45.0	0.79	1255	126

Üst alüminyum plakanın, alt kompozit plakanın olduğu bağlantıların darbe sonrası hasar yüzeyleri Şekil 6.2'de görülmektedir. Alt kompozit plakalarda arka yüzeyde oluşan hasarların fiber açısı ile değişimi belirgindir. Hasarlar fiber doğrultusunda matris kırılması şeklinde oluşmuştur. Üst alüminyum plakalarda ön yüzeylerde vurucunun temas ettiği bölgelerde hasarların fiber açısına göre değiştiği açıktır. Kompozit plakanın direngen olduğu fiber açısı doğrultularında üst alüminyum plakaya arkadan destek olduğu, fiber açısına dik doğrultularda kompozit plakanın desteğini alamayan metal plaka üzerinde vurucunun daha çok iz bıraktığı görülmektedir. Kompozit plakaların arka yüzeyinde oluşan çatlakların ankastre bölgeye kadar ilerlediği görülmektedir.

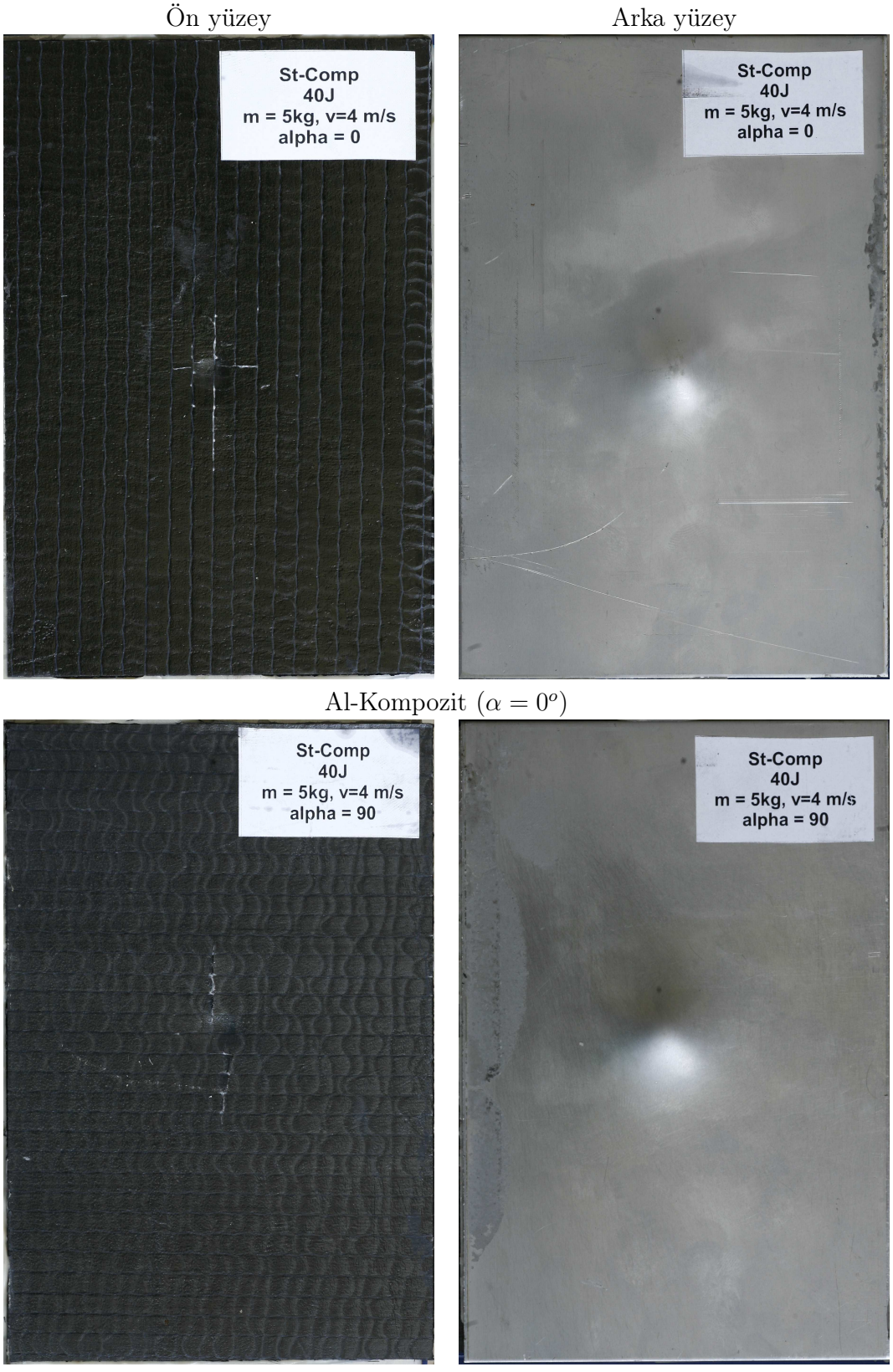
Kompozit ve çelik plakaların birleştirildiği bağlantıların darbe sonrası ön ve arka hasar yüzeyleri Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 'te gösterilmiştir. Şekil 6.3 'te alt plaka çelik, üst plaka kompozit ve Şekil 6.3 'te ise alt plaka kompozit, üst plaka çeliktir.

Üst kompozit alt çelik plakaların olduğu birleştirildiği bağlantılarda her iki fiber açısı için alt çelik plakanın arka yüzeyinde oluşan kalıcı deformasyon yüzeyleri benzerdir. Alt çelik plakanın üst alüminyum plakaya göre daha direngen yapıya sahip olması nedeniyle bağlantıda fiberlerin deformasyonlar üzerindeki mevcut etkisinini görülmesini engellemektedir (Şekil 6.3). Metal alt (St) plaka üzerindeki deformasyon karakteristiğini belirleyen çelik vede kompozit plaka olmuştur. Üst kompozit plakada oluşan hasar tipi $\alpha = 90^o$ fiber açısında matriste çatlak ve fiber kırılması şeklindedir.

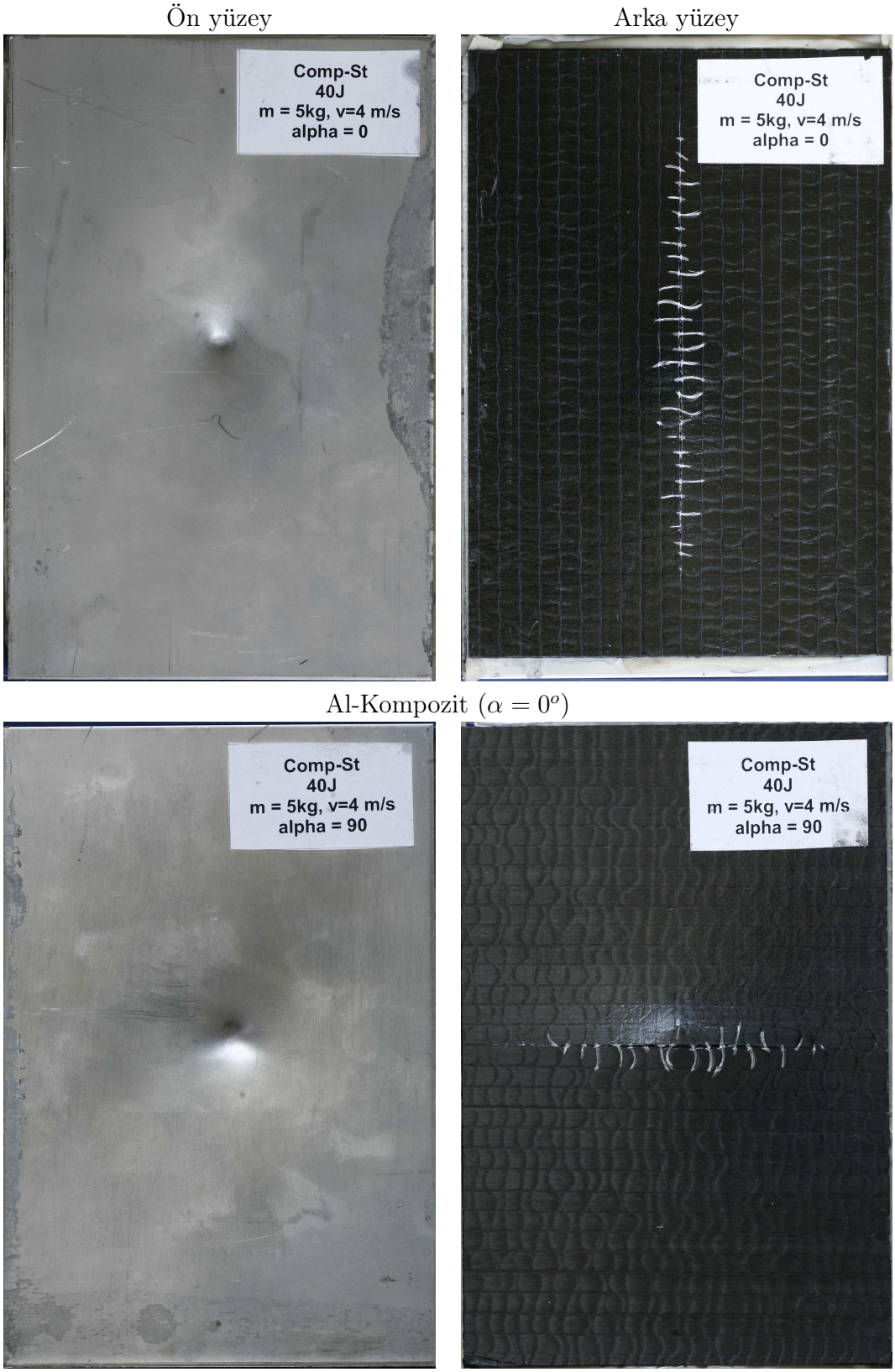
Üst plakanın çelik olması ile darbe enerjisinin büyük oranda elastik olarak yutulmasından dolayı arka kompozit plakalarda oluşan hasarlar alüminyum ile yapılan bindirmelere benzer fakat daha dar bölgededir (Şekil 6.4). Alt kompozit plakaların arka yüzeylerinde oluşan hasarlar matris hasarı şeklinde gelişmiştir.



Şekil 6.2. Alt kompozit plaka üst alüminyum plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J).



Şekil 6.3. Alt çelik plaka üst kompozit plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J).



Al-Kompozit ($\alpha = 0^o$)

Al-Kompozit ($\alpha = 90^o$)

Şekil 6.4. Alt kompozit plaka üst çelik plakanın yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantının iki farklı fiber açısı ön ve arka hasar yüzeyleri ($E = 40$ J).

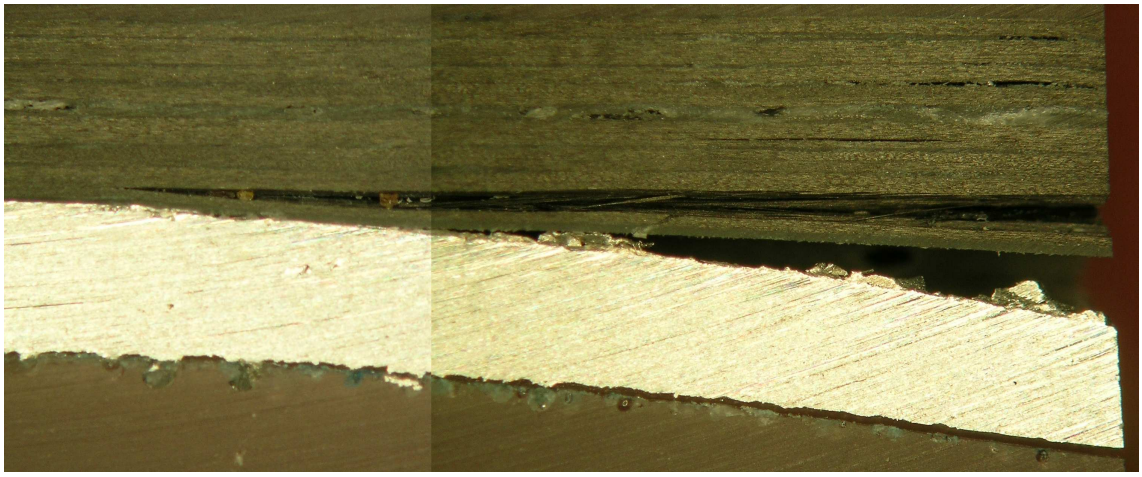


Şekil 6.5. Kesit görüntüleme işlemi için dörde bölünen kompozit-alüminyum bağlantı.

Matriste oluşan hasarlar her iki fiber açısı için fiber yönünde olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Çelik plakaların vurucu ile temas eden yüzeylerinde oluşan izler alüminyum plakalara göre daha dar bir bölge kapsar.

Bağlantıların hasar bölgesinde kesitlerini makroskop altında incelemek için bağlantılar epoksiye kalıplanmıştır. Darbe bölgesi dörde bölünerek kesit parlatılmıştır (Şekil 6.5). İki farklı malzemeli plakalardan bağlantının oluşması nedeniyle bindirme arayüzeylerde ve yapıştırıcı tabakasında oluşan hasarlar önceki bağlantılara göre farklılık göstermiştir.

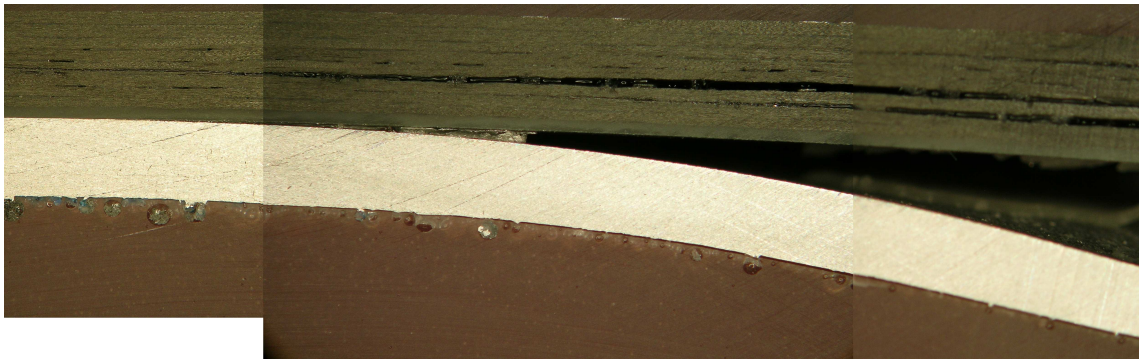
Alt alüminyum plaka ve üst kompozit plaka bağlantının 40 J enerjili darbe testi sonrası vurucunun temas ettiği orta nokta referans alınarak kesilen dörtte



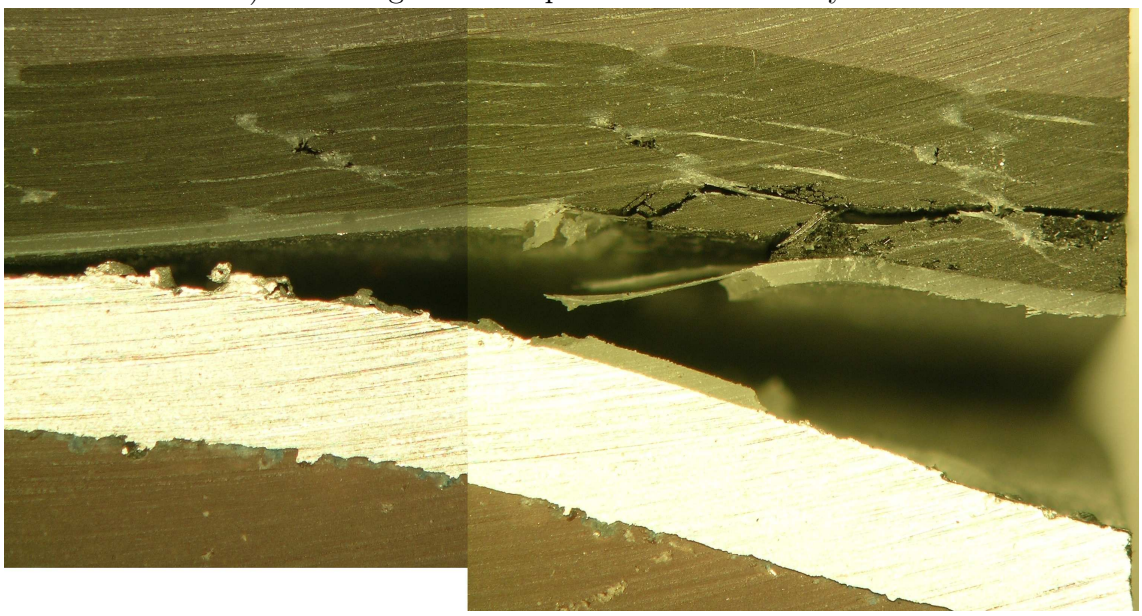
Şekil 6.6. Alüminyum-kompozit bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna paralel kesit görüntüsü.

bir parçasının kesiti Şekil 6.6 'da görülmektedir. Kesit fiber doğrultusuna paraleldir. Makroskop altında bir numune kesitinden ardışık çekilen iki foroğraf bilgisayar ortamında yan yana eklenerek oluşturulmuştur. Sağ üst tarafa vurucu temas etmiştir. Metal plaka ile kompozit plaka yapıştırılmış yüzeyden belirğin ayrılmıştır. Metal plaka üzerinde görülen artık metaller kesme sırasında oluşan çapaklardır. Yapıştırıcı tabakasında oluşan ayrılmanın yanı sıra kompozit plakanın içerisinde tabakalar arası ayrılma oluştuğu görülmektedir. Vurucu üst plaka ile temasa başladıktan sonra, her iki plakayı aşağı doğru iterek deforme etmiş, vurucunun kinetik enerjisinin bitmesinden sonra vurununun geri dönüşe başlamasıyla, metal plaka plastik şekil değişimini muhafaza etmiş; kompozit plaka ise geri dönme eğiliminde bulunmuştur. Yapıştırıcı arayüzeylerindeki gerilmelerden dolayı yapıştırıcı ve plakalar ayrılmış, aynı şekilde kompozit plaka içinde tabakalar arası ayrılmalar ortaya çıkmıştır. Yapıştırıcı tabakasının kompozit plaka ile daha iyi bir bağ kurduğu açıktır. Şöyle ki, ayrılma sırasında yapıştırıcı tabakası kompozit plaka üzerinde kalmıştır.

Alt alüminyum plaka üst kompozit plaka bağlantısından ($\alpha = 90^o$) iki farklı kesitin alınan görünleri alınan görüntüleri Şekil 6.7 'de sunulmuştur. İlki kısa kenar boyunca yönlenmiş $\alpha = 90^o$'lik fiber doğrultusuna paralel kesitten alınmıştır. İkincisi ise dik uzun kenar doğrultusunda alınmıştır. Görüntüler ardışık çekilmiş forğrafların birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Kısa kenara paralel üstteki fotoğrafta



a) Fiber doğrultusuna paralel kısa kenar boyunca



b) Fiber doğrultusuna dik uzun kenar boyunca

Şekil 6.7. Alüminyum-kompozit bağlantının $\alpha = 90^o$ 'lik fiber doğrultusuna paralel ve dik kesit görüntüleri.

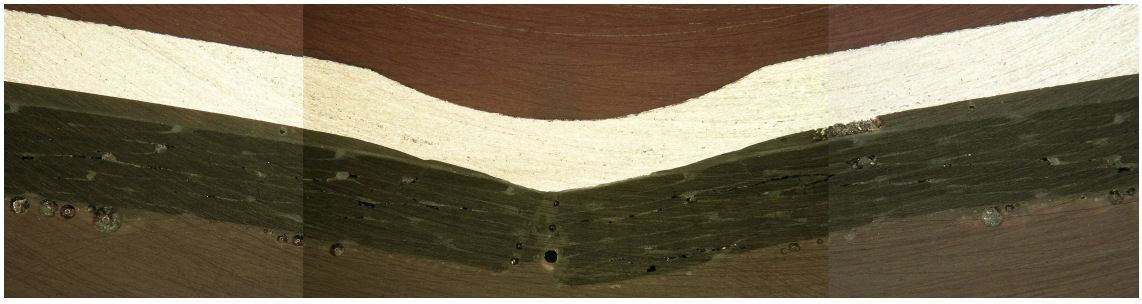
görüldüğü üzere vurucunun geri dönüşü sırasında metal plaka deforme şeklini korumuş ve kompozit plaka ilk haline geri dönmeye çalışmıştır (Şekil 6.7-a). Plakalar ve yapıştırıcı tabakası arasında, kompozit plakada tabakalar arasında ayrılmalar mevcuttur. Kompozit plakanın üç tabakası arasında büyük ayrılmalar tespit edilmiştir. Benzer şekilde yapıştırıcı tabakasının kompozit plaka üzerinde artıklar bırakarak ayrıldığı görülmektedir.

Fiber doğrultusuna dik kesitten alınan alttaki resimde yapıştırıcı tabakasının parçalandığı ve kompozit plaka üzerinde tabakalar arası ayılmanın iç bölgelere doğru ilerleyişi görülmektedir (Şekil 6.7-b). Yapıştırıcı tabakasından başlayan çatlak yapıştırıcı üzerinde çok ciddi hasara yol açmış, tabakalar arası ilerlemiş, kompozit

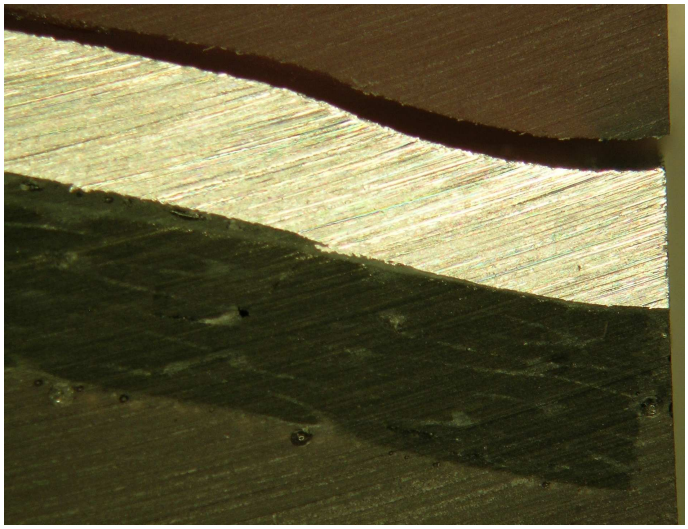
plakada matris ve fiber üzerinde ciddi hasarların oluşmasına neden olmuştur.

Alt kompozit plakanın üst alüminyum plaka bağlantısının 40 J enerjili darbe testi sonrası $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna dik (kısa kenara paralel) alınan kesit görüntüsü Şekil 6.8 'de görülmektedir. Vurucunun üst alüminyum plakada bırakığı iz açıkça görülmektedir. Alüminyum plakanın kalıcı deformasyonu alt kompozit plakanın arka yüzeyinde matris üzerinde büyük hasarların oluşmasına neden olmuştur. Tam ortada alt kompozit plakada oluşan matris hasarı ve de ayrılma görülmektedir. Oluşan boşluğa kalıplama için kullanılan epoksi nüfuzetmiştir. Çatlağın tüm tabakalar kalınlığı boyunca ilerlediği, alüminyum plakaya kadar devam ettiği görülmektedir. Vurucunun temas ettiği orta bölgenin yanlarına doğru kompozit plaka ile metal plakanın darbe sonrası birbirinden ayrıldığı, yapıştırıcı tabakasının plakalardan ayrıldığı, oluşan ara boşluğa kalıplama sırasında epoksinin dolduğu tespit edilmiştir. Yapıştırıcı tabakasının yine kompozit plaka ile daha iyi bir bağ kurduğu, yapıştırıcının kompozit üzerinde artıklar bırakarak ayrıldığı anlaşılmaktadır. Aynı numunenin görülen kesitinin karşı tarafının görüntüsü Şekil 6.9 'da büyütülmüştür. Resim dörte birlik kısma takabül eder ve tam orta noktada kompozit plakanın arka yüzeyinde meydana gelen çatlağın metal plakaya kadar ilerleyişini ayrıntılı gösterir.

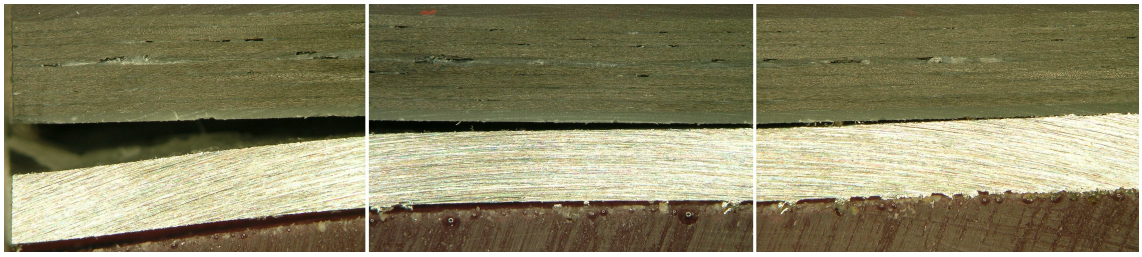
Alt kompozit plaka ($\alpha = 0^o$) ve üst çelik plakadan oluşan bağlantıların darbe testi sonrası fiber doğrultusunda (uzun kenara paralel) kesitinin makro görüntüsü Şekil 6.10 'da görülmektedir. Darbe mekanizması ve deformasyonların gelişimi alüminyum plakalı bağlantılardan farklılık göstermemiş, fakat, metalin çelik olması daha direngen bir yapıya neden olmuştur. Dolayısıyla metal plakada daha az plastik



Şekil 6.8. Kompozit-alüminyum bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna dik kesit görüntüsü.



Şekil 6.9. Kompozit-alüminyum bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusuna dik kesit görüntüsü (ayrıntı).



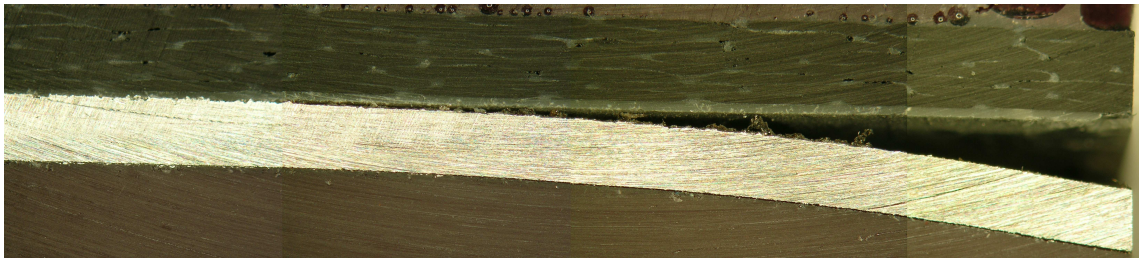
Şekil 6.10. Kompozit-çelik bağlantının $\alpha = 0^o$ fiber doğrultusunda kesit görüntüsü (uzun kenardan kesit).

deformasyon demektir. Alt çelik plakanın arka yüzeyinde meydana gelen plastik çökme miktarı alüminyum sistemine göre daha azdır. Alt plakanın çelik olması ile üst kompozit plaka ve yapıştırıcı kalınlık boyunca daha fazla ezilmeye zorlanmıştır. Üst taraftan vurucu, alt taraftan direngen çelik plaka ile sınırlanan kompozit plakada kalınlık boyunca etkin hasarlar oluşmuştur. Yapıştırıcı tabakası hasara uğrar iken yapıştırıcının kompozit plaka tarafında bölgesel kalıntılar bırakarak kırıldığı görülmektedir. Şekil 6.10'da birbirinin devamı üç parça halinde çekilmiştir. Sol üst tarafa vurucu temas etmektedir ve vurucunun temas ettiği orta noktayı temsil etmektedir. Uzun kenara paralel fiber doğrultusunda çekilen bu görüntüde kompozit plaka üzerinde tabakalar arası ayrılma belirgin değildir. Alüminyum-kompozit ile temel farklardan biridir. Alüminyum bağlantıda belirgin plastik deformasyonlar ve çökme oluşması sebebi ile kompozit plakalarda tabakalar arası ayrılmalar ve matriste hasarlar açık bir şekilde görülmektedir. Fakat çelik bağlantıda bu etki azalmıştır.

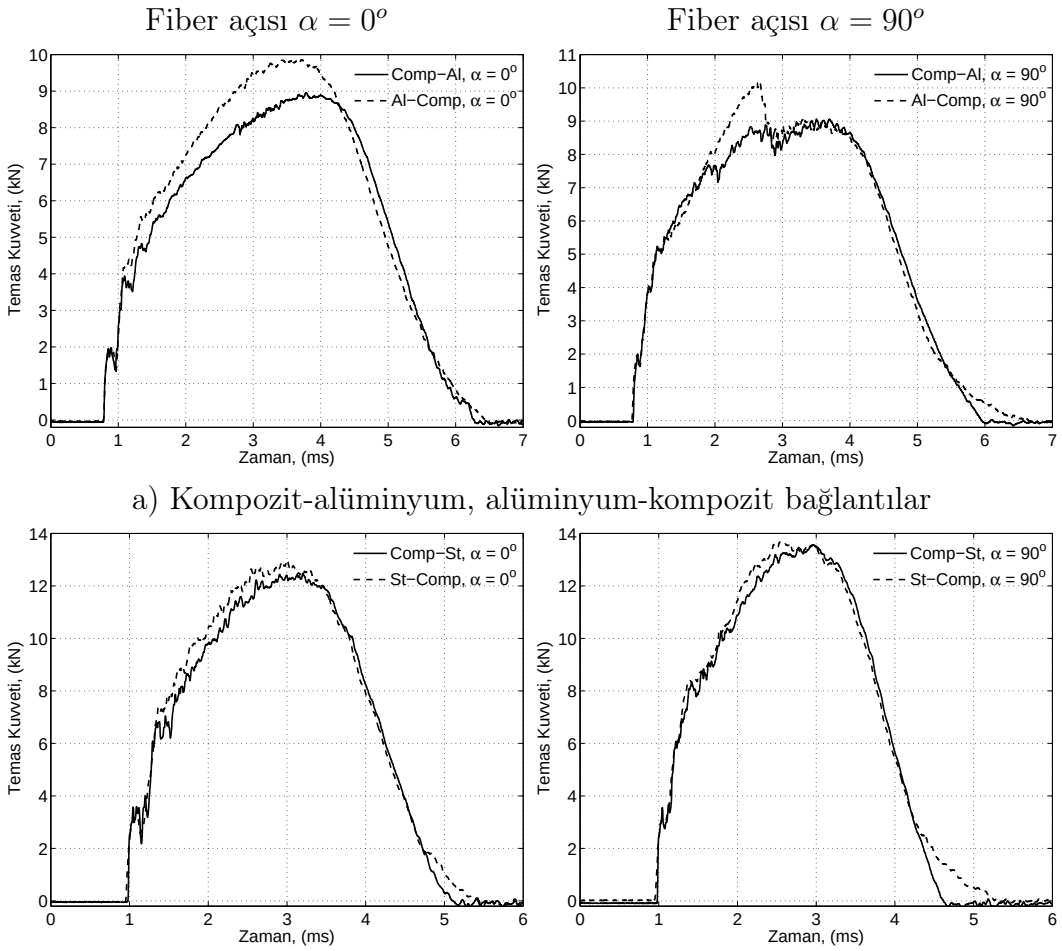
Alt çelik plaka üst kompozit ($\alpha = 90^o$) plaka bağlantının darbe testi sonrası fiber açısına dik doğrultuda uzun kenardan alınan kesitin görüntüsü Şekil 6.11 'de gösterilmiştir. Kısa kenar boyunca yönlenmiş fiberler kompozit plakanın darbeye karşı daha mukavim davranmasına sebep olmuştur. Mukavim bir çelik plaka ile yapıştırılan kompozit bağlantıda daha az hasar görülmektedir. Çökme miktarı daha azdır. Sağ üst köşeden vurucu sisteme temas etmekte, sağ üst köşe vurucunun temas ettiği tam orta noktayı temsil etmektedir.Şekil 6.10 ve 6.11'deki kesit alan resimlerinde kompozit plakanın doku renginin farklı olduğu görülmektedir. Bunun sebebi bahsedilen ilk resmin fibere paralel yönde, ikinci resmin fibere dik yönde olmasıdır.

Kompozit plakaların metal plakalar ile yapıştırılması ile elde edilen bağlantıların darbe testleri sonucu elde edilen temas kuvvetlerinin kompozit plakanın önde ya da arkada olmasına göre değişimi Şekil 6.12 'de verilmiştir. İki farklı fiber açısında ($\alpha = 0^o$ ve 90^o), alüminyum ve çelik plakalar ile kompozit plakaların herbir bindirme bağlantısına ait temas kuvveti değişimleri görülmektedir. Alüminyum plakaların kullanıldığı bağlantıların temas kuvvet değişimleri esas alınırsa, özellikle $\alpha = 0^o$'lik fiber açısında kompozit plakanın üstte yani vurucu ile temas halinde olması durumunda, kompozit plakanın altta olmasına göre temas kuvvetinin %10 arttığı tespit edilmiştir. Fiber açısı $\alpha = 0^o$ için kompozit plaka üstte iken en büyük temas kuvveti 10 kN, kompozit plaka altta iken 9 kN olarak elde edilmiştir. Ancak toplam temas sürelerinin aynı olduğu görülmektedir. Alt alüminyum plakanın şekil değiştirmesinin daha çok çekme gerilmesi altında olduğu açıktır.

Alüminyum plaka kullanılan bağlantılarda temas kuvvetinin, özellikle kompozit



Şekil 6.11. Çelik-kompozit bağlantının $\alpha = 0^o$'lik fiber doğrultusunda kesit görüntüsü (uzun kenardan kesit).



a) Kompozit-alüminyum, alüminyum-kompozit bağlantılar

b) Kompozit-çelik, çelik-kompozit bağlantılar

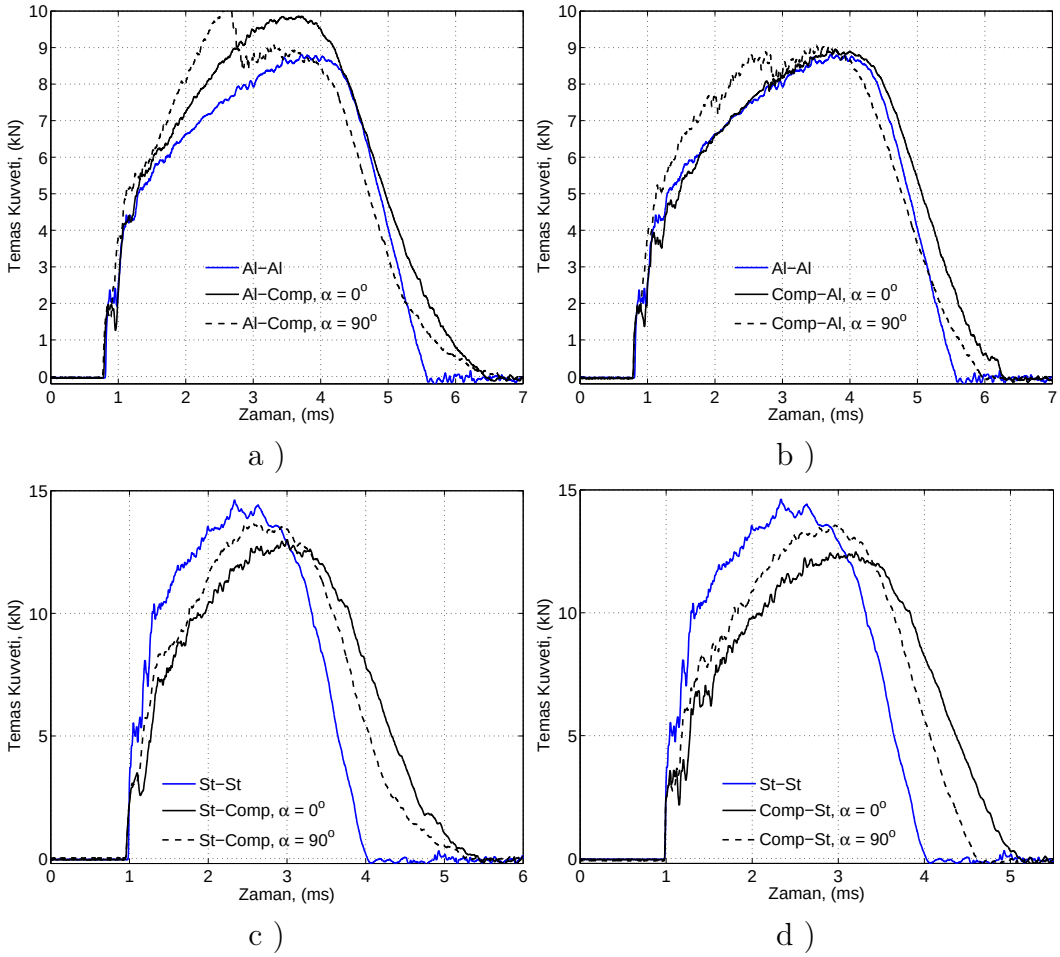
Şekil 6.12. Kompozit ile metal plakaların bağlantılarında kompozit plakanın önde ya da arkada olmasının temas kuvveti üzerine etkileri.

plakanın ($\alpha = 90^o$) vurucu ile temas halinde olduğu durumda, önce 10 kN seviyesine çıktığı sonra ani bir şekilde 9 kN seviyesine düştüğü görülmektedir. Testlerden sonra yapılan görsel incelemede metal plakada hasar olmaması, bu ani düşüşün kompozit plaka üzerinde meydana gelen fiber ya da matris hasarlarından kaynaklandığına işarettir. Önceki metal-metal bağlantıların testlerinde ani düşüşlerle karşılaşılmamıştır. Metal-kompozit ($\alpha = 90^o$) bağlantıların testinde ani kuvvetteli düşüşün ana sebebi kompozitin davranışıdır. Meydana gelen makro ölçekte hasar, kompozit üzerinde bir çatlak ya da yırtılmadır. Bu çatlak Şekil 6.1 'de $\alpha = 90^o$ fiber açısında darbe sonrası çekilen resimde vurucunun temas ettiği orta noktada, fiber doğrultusuna dik yönde hasar olarak görülmektedir. Hasarların matris hasarı ve fiber kırılması şeklinde olduğu hem kesit fotoğraflarından, hem de temas kuvvetleri grafiklerinden açıklanabilir. Ankastre kenar şartlarından

dolayı daha direngen yapıya sahip olan kompozit plaka ($\alpha = 90^o$) arka taraftan alüminyum plakanın destek olmasına rağmen, alüminyum plakadaki plastik şekil değiştirmelerden dolayı, darbe enerjisini taşıyamamış ve hasara uğramıştır.

Kompozit ve çelik plaka bağlantılarının darbe testleri sonrası temas kuvvetleri değişimlerinde en büyük temas kuvveti $\alpha = 90^o$ fiber açısında ve kompozit plakanın önde olduğu bağlantıda ~ 14 kN'dur. En büyük temas kuvveti böyle olmasına karşılık, alüminyum plaka ile yapılan bağlantılarda olduğu gibi çelik plaka ile yapılan bağlantılarda kompozit plakanın önde ya da arkada olması temas kuvveti üzerinde değişime sebep olmamıştır. Özellikle $\alpha = 90^o$'fiber açılı plakalarda temas kuvvetleri arasındaki farklar çok az iken, $\alpha = 0^o$ fiber açılı plakalarda $\sim$ %6 değişim tespit edilmiştir. Alüminyum-kompozit bağlantılarda olduğu gibi çelik-kompozit bağlantılarda da kompozit plakanın önde olması temas kuvvetinin artmasına neden olmuştur. $\alpha = 90^o$ fiber açısında kompozit plakanın üstte olduğu durumda temas kuvveti değişiminden, temasın kesilmesine yakın çelik plakanın üstte olduğu durumdaki gibi temasın aniden kesilmediği, kompozit elastik olarak geri dönme eğiliminde olduğu, vurucuya baskı yaptığı ve teması kesmediği görülmektedir. Bu noktada oluşan ortalama temas kuvvvetinin 1 kN olduğu ve toplam temas süresini 1 ms uzattığı tespit edilmiştir (Şekil 6.12).

Kompozit-metal bağlantıların Al-Al ve St-St bağlantılar ile temas kuvvetleri bakımından kıyaslanması Şekil 6.13 'te görülmektedir. Alt alüminyum plakanın üst kompozit plakanın olduğu ve kompozit plakanın farklı iki fiber açısına sahip olduğu bağlantı ile Al-Al bağlantı kıyaslarsa (Şekil 6.13-a), bağlantıda kompozit plakanın varlığı daha direngen ve daha elastik bir bağlantıya sebep olmuştur. Özellikle $\alpha = 0^o$ fiber açısında oluşan temas kuvvetleri Al-Al bağlantısına göre %12 kadar daha yükselmiştir. Ayrıca toplam temas süresi Al-Al bağlantıya göre %17 kadar uzundur. $\alpha = 0^o$'lik fiber açılı bir kompozit plakanın varlığı, bağlantının direngenliğini arttırmakla birlikte, elastik enerji depolama kabiliyetini de iyileştirmiştir. Kompozit plakanın yoğunluğunun daha düşük olması ayrı bir avantajdır. $\alpha = 90^o$'lik fiber açılı kompozit plakanın yüksek enerji seviyelerinde ancak hasara uğramasından dolayı temas kuvvetlerinde ani değişimler aynı diyagramda görülmektedir.



Şekil 6.13. Kompozit-metal ve metal-metal bağlantıların temas kuvvetleri bakımından kıyaslanması, a) Alt alüminyum plaka-üst kompozit plaka ve Al-Al bağlantılar, b) Alt kompozit plaka-üst alüminyum plaka ve Al-Al bağlantılar, c) Alt çelik plaka-üst kompozit plaka ve St-St bağlantılar, d) Alt kompozit plaka-üst çelik plaka ve St-St bağlantılar.

Şekil 6.13-b üst plakanın alüminyum ve alt plakanın farklı iki fiber açısına sahip kompozit malzeme olduğu bağlantının Al-Al bağlantı ile temas kuvvetlerini mukayese etmektedir. Alt plakanın kompozit olması, testleri gerçekleştirilen enerji seviyelerinde arka kompozit plakalarda matris ve fiber hasarlarının fazla olması, oluşan hasarlardan dolayı bağlantının direngenliğinin düşmesinden dolayı en büyük temas kuvveti seviyeleri Al-Al bağlantılardakine benzerlikler göstermektedir. Kompozit plakanın varlığı ile bağlantının direngenliği artmakta, dolayısı ile toplam temas süresi ve elastik enerji depolama kabiliyeti artmaktadır. Alt plakanın kompozit üst plakanın alüminyum olduğu bağlantı Al-Al bağlantıya göre %10 kadar daha uzun bir toplam temas süresine sahiptir.

Çelik ile kompozit plakaların yapıştırılmasından elde edilen bağlantılarda alt plakanın çelik, üst plakanın kompozit olduğu ve kompozitin farklı iki fiber açısına sahip bulunduğu bağlantı ve St-St bağlantı ile temas kuvvetleri bakımından Şekil 6.13-c 'de kıyaslanmıştır. Çelik-çelik bağlantıya göre çelik-kompozit bağlantı daha zayıf direngenliğe sahip olduğundan en büyük temas kuvveti seviyeleri çelik-kompozit bağlantıda daha düşüktür. Çelik-çelik bağlantıda 14.5 kN olan en büyük temas kuvveti, $\alpha = 90^o$ fiber açısına sahip çelik-kompozit bağlantıda 13.2 kN, $\alpha = 0^o$ fiber açısına sahip çelik-kompozit bağlantıda ise 12.5 kN olarak tespit edilmiştir. Kompozit plakanın varlığı daha elastik bir yapıya neden olduğundan toplam temas süresi St-St bağlantıya göre %30 uzamıştır.

Çelik (ön) plaka ile kompozit (arka) plakanın kullanıldığı, kompozit-çelik bağlantının çelik-çelik bağlantıdaki temas kuvvetleri kıyası Şekil 6.13-d 'de verilmiştir. Kompozit plakanın altta ya da üstte olmasının çelik plaka ile yapılan bağlantılarda temas kuvvetlerinde daha etkili olmadı tespit edilmişti. Alt kompozit plaka üst çelik plaka bağlantılarda en büyük temas kuvveti $\alpha = 0^o$'lik fiber açısında 12.5 kN, $\alpha = 0^o$'lik fiber açısında 13.2 kN seviyesinde gerçekleşmiş, St-St bağlantıda ise 14.5 kN olarak tespit edilmiştir. Kompozit plakanın varlığı bağlantıda en büyük temas kuvveti seviyesinde azalma, toplam temas süresinde artışa neden olmuştur.

7. BÖLÜM

SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

7.1. Sonuç, Tartışma ve Öneriler

Bu tez çalışmasında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş metal-metal, kompozit-kompozit ve metal-kompozit plakaların darbe davranışları sayısal ve deneysel incelenmiştir. Metal-metal bağlantıların sayısal analizlerinde sabit yapıştırıcı kalınlığında vurucu hızı, vurucu kütlesi ve vurucu yarıçapının vede bu üç özelliğe bağlı olarak darbe enerjisi değişimlerinin etkileri araştırılmıştır. Ayrıca üç farklı enerji seviyesinde yapıştırıcı kalınlığının metal-metal sistemlerin düşük hızlı darbe davranışları üzerine etkileri irdelenmiştir. Metal-metal bağlantıların düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiş, sayısal ve deneysel sonuçlar metal-metal bağlantılarda elastikiyet bozunum modellerinin sayısal analizlerde kullanılmasına işaret etmiştir.

Benzer yöntem ile kompozit-kompozit bağlantıların sayısal analizleri ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Metal-metal, kompozit-kompozit ve metal-kompozit bağlantıların darbe davranışları ve darbe yükü altında performansları teorik ve deneysel mukayese edilmiştir. Elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

» Metal-metal bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarının sayısal analizleri vurucu yarıçapnın ($r = 8$ ve 12.5 mm) değerleri için etkisinin ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. Sayısal analizlerde ve testlerde $r = 12.5$ mm'lik vurucu yarıçapı kullanılmıştır.

» Metal-metal bağlantıların tüm enerji seviyelerinde en düşük temas kuvveti Al-Al bağlantıda, en büyük temas kuvveti St-St bağlantıda meydana gelmiştir. Farklı

(Al-St ve St-Al) metal plakaların bağlantılarında şekil değiştirme değerleri hariç benzer darbe davranışı sergilemişlerdir.

» St-Al bağlantıda üst plakada kalıcı deformasyonlar kalınlık boyunca plakanın daralması ve sıkıştırılması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Alt plakanın çelik olması sebebi ile üst alüminyum plaka kalınlık boyunca sınırlı hareket edebilmiş, yapıştırıcı tabakasını sıkıştırmış, arta kalan enerjiyi de yanlara doğru yığılma ve kalınlık boyunca daralma tarzında kalıcı deformasyonlara harcamıştır. Alt plakanın çelik olması, yapıştırıcı ve üst alüminyum plakada oluşan kalıcı deformasyonların artışına neden olmuştur. Yapıştırıcı tabakasının en çok zorlandığı ve kalıcı deformasyonların en büyük değerlere sahip olduğu bağlantı her iki plakanında çelik olduğu bağlantıdır.

» Çelik plakanın varlığı (Al-St, St-Al ve St-St) bağlantının toplam direngenliğindeki etkisi ve yapıştırıcıya göre çok daha direngen ve mukavim olması, yapıştırıcı kalınlığının bu bağlantıların darbe davranışlarındaki etkisini azaltmıştır.

» Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda plaka malzemelerinin direngenlikleri arttıkça, yapıştırıcı tabakasında oluşan plastik deformasyonlar artmaktadır. Daha direngen plakalar arasından kalan yapıştırıcı tabakası yükü taşımada zorlanmakta ve plakalar arasında ezilerek ciddi plastik deformasyona uğramaktadır. Böylece oluşan hasar alanları genişlemektedir. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırıcının hacmi artmakta, darbeden dolayı birim hacim başına enerji miktarı azalmakta ve kalıcı deformasyona uğramış bölge alanları daralmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığında bir üst sınır mevcuttur. Şöyle ki, kalın yapıştırıcı tabakası boyunca alt ve üst plakaların kayması ve kayma deformasyonlarının etkinleşmesi muhtemeldir.

» CNC tezgahı kullanılarak yüzey tarama yöntemi ile tespit edilen deformasyon yüzeyleri, Al-Al metal bağlantılarda en fazla, St-St metal bağlantılarda en az deformasyona işaret etmektedir. Al-St ve St-Al bağlantıların sayısal ve deneysel en büyük çökme değerleri birbirlerine yakın bulunmuştur.

» Metal bağlantıların darbe testleri sonrasında numuneler kesitleri incelenmek üzere hazırlanmış ve makroskop altında görüntüleme işlemleri yapılmıştır. Al-Al

bağlantıda kesitin makro görüntüsünde vurucu ile temas eden üst plakada vurucu izi belirgin görülmektedir. Yüksek enerji seviyesinde (60 J) bu deformasyonlar daha da belirginleşmektedir. Düşük ve yüksek enerji seviyelerinde yapıştırıcı ile plakalar arayüzeyinde ayrılma görülmektedir. Düşük enerji seviyesinde vurucunun hizasında alt plaka ile yapıştırıcı arayüzeyinde ve vurucunun yanal yüzeylerine denk gelen kısımlarda üst plaka-yapıştırıcı arayüzeyinde ayrılma tespit edilmiştir. Yüksek enerji seviyesinde ise vurucunun hizasında yapıştırıcı tabakasının alt ve üst plaka arayüzeylerinde ayrılma görülmektedir.

» St-Al bağlantının yüksek enerji seviyesinde darbe bölgesinin tümünde yapıştırıcının alt ve üst plaka ile arayüzeyinde ayrılmalar olmuştur. Vurucunun hizasında ve vurucu çapına sahip dairesel alanda yapıştırıcının her iki plaka ile arayüzeyi tamamen ayrılmıştır. Bu bölgede aynı zamanda normal gerilmenin yön değiştirdiği kısımlarda yapıştırıcı tabakası üzerinde çok büyük kırılma ve parçalanmaların olduğu görülmektedir. Bu kırılmalar yaklaşık 45^o açı ile yapıştırıcı tabakası üzerinden geçmektedir.

» Elastikiyet bozunum modellerinin kullanımı ile elde edilen teorik temas kuvveti değişimlerinin deneysel temas kuvveti değişimlerine yaklaştığı tespit edilmiştir. Plastik şekil değiştirme çok dar bir aralıkta değişmekte ve bu aralıkta elastiklik modülü ana değerinin %5'ine düşürülmüştür. Yapılan teorik analizlerde uygulanan elastikiyet bozunumundan "teorik temas kuvvetinin deneysel temas kuvvetine yaklaşması için plastik bölgede belirli bir şekil değiştirme değerinden sonra çok kısa zaman aralığında malzemenin direngenliğinin aniden düşmesi gerektiği" sonucu çıkarılabilir.

» Uygun hasar kriterlerinin kullanımı, düşük hızlı darbe sonrası kompozit plakalardaki hasar tiplerinin en etkini çekme gerilmesinden kaynaklanan matris hasarları olduğunu, daha sonra sırasıyla çekmeden kaynaklanan fiber hasarı ve tabakalar arası ayrılma olduğunu işaret etmiştir. Alt plakada özellikle matrisin çekmeye zorlandığı, hasarın çekmeden kaynaklandığı, matriste hasar gelişiminin fiber yönü ile ilişkili geliştiği belirlenmiştir. Çekme altında matriste üst plakada oluşan hasar fiber açısına dik yönde gelişirken alt plakada oluşan hasar fiber ile aynı yöndedir.

» Yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit plakaların sayısal analizleri ve düşük hızlı darbe testleri benzer hasar tiplerinde uyuşmuştur. Sayısal ve deneysel temas kuvvetleri arasındaki farkların nedeninin araştırılması gerekmektedir.

» Kompozit-metal, metal-kompozit bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarının metal-metal ve kompozit-kompozit bağlantıların darbe davranışlarından tamamen farklı olduğu tespit edilmiştir. Üst plakanın metal yada kompozit olmasının bağlantının darbe davranışı, özellikle oluşan hasarlar üzerinde etkin olduğu görülmüştür. Alt plakanın kompozit seçilmesi kompozit plakada çok büyük miktarda çekmeden kaynaklanan çatlak ve kırılmalara neden olmuştur. Ayrıca yapıştırıcı tabakasında meydana gelen deformasyonlar en yüksek seviyelere ulaşmıştır. Üst plakanın kompozit seçilmesi ile kompozit plaka ve yapıştırıcı tabakası alttan metal plaka üstten vurucu ile sıkıştırılmış, kalınlık boyunca basma altında kalmışlardır. Kompozit plakada vurucu hizasında basmadan kaynaklanan fiber ve matris kırılması tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Definition of Terms Relating to Adhesive, 1974. ASTM.

2. Hashim, S., Cowling, M., and Winkle, I., 1990. Design and assessment methodologies for adhesively bonded structural connections, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, **10**(3):139 – 145.

3. Adams, R. and Wake, W., 1984. Structural adhesive joints in engineering, Elsevier Applied Science, London, UK.

4. Adams, R., Comyn, J., and Wake, W., 1997. Structural adhesive joints in engineering, Chapman & Hall, London, UK.

5. Kinloch, A., 1987. Adhesion and Adhesives, Chapman & Hall, London, UK.

6. Tong, L. and Steven, G., 1999. Analysis and Design of Structural Bonded Joints, Kluwer Academic, Boston, USA.

7. Vaidya, U.K., Gautam, A.R., Hosur, M., and Dutta, P., 2006. Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, **26**(3):184–198.

8. Anon, 2009, http://www.roymech.co.uk.

9. Zachary, L.W. and Burger, C.P., 1980. Dynamic wave propagation in a single lap joint, **Experimental Mechanics**, **20**(5):162–166.

10. Steeves, C. and Fleck, N., 2004. Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-point Bending. Part I: Analytical Models and Minimum Weight Design, **International Journal of Mechanical Science**, **46**:561–583.

11. Xu, L.R. and Rosakis, A.J., 2009. Real-Time Experimental Investigation on Dynamic Failure of Sandwich Structures and Layered Materials in Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures, 571–603, Springer Netherlands.

12. Xu, L.R. and Rosakis, A.J., 2002. Impact failure characteristics in sandwich structures: Part I: Basic failure mode selection, **International Journal of Solids and Structures**, **39**(16):4215 – 4235.

13. Abrate, S., 1998. Impact on Composite Structures, Cambridge University Press.

14. Fuoss, E., Straznicky, P.V., and Poon, C., 1998. Effects of stacking sequence on the impact resistance in composite laminates – Part 1: parametric study, **Composite Structures**, **41**(1):67 – 77.

15. Fuoss, E., Straznicky, P.V., and Poon, C., 1998. Effects of stacking sequence on the impact resistance in composite laminates. Part 2: prediction method, **Composite Structures**, **41**(2):177 – 186.

16. Boeing Company, Advanced compression tests, Boeing Specification Support Standard BSS 7260 (1988) Revision C, Seattle, WA, USA.

17. Engineering Mechanics Research Corporation (EMRC). In: NISA II User's Manual Version 94.0, EMRC, Troy, MI, USA, 1994.

18. Choi, H.Y. and Chang, F.K., 1992. Model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact, **Journal of Composite Materials**, **26**(14):2134–2169.

19. Tiberkak, R., Bachene, M., Rechak, S., and Necib, B., 2008. Damage prediction in composite plates subjected to low velocity impact, **Composite Structures**, **83**(1):73 – 82.

20. Pang, S.S., Yang, C., and Zhao, Y., 1995. Impact response of single-lap composite joints, **Composites Engineering**, **5**(8):1011 – 1027.

21. Aslan, Z., Karakuzu, R., and Okutan, B., 2003. The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading, **Composite Structures**, **59**(1):119 – 127.

22. Aktaş, M., Ataş, C., İçten, B.M., and Karakuzu, R., 2009. An experimental investigation of the impact response of composite laminates, **Composite Structures**, **87**(4):307 – 313.

23. İçten, B.M., Ataş, C., Aktaş, M., and Karakuzu, R., 2009. Low temperature effect on impact response of quasi-isotropic glass/epoxy laminated plates, **Composite Structures**, **91**(3):318 – 323.

24. Park, H. and Kim, H., 2010. Damage resistance of single lap adhesive composite joints by transverse ice impact, **International Journal of Impact Engineering**, **37**(2):177 – 184.

25. Kim, K.S., Yoo, J.S., Yi, Y.M., and Kim, C.G., 2006. Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods, **Composite Structures**, **72**(4):477 – 485.

26. Tsai, M.Y. and Morton, J., 1995. The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints, **Composite Structures**, **32**(1-4):123 – 131.

27. Kairouz, K. and Matthews, F., 1993. Strength and failure modes of bonded single lap joints between cross-ply adherends, **Composites**, **24**(6):475 – 484.

28. Cheuk, P.T. and Tong, L., 2002. Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack, **Composites Science and Technology**, **62**(7-8):1079 – 1095.

29. Kim, J.K., Kim, H.S., and Lee, D.G., 2003. Investigation of optimal surface treatments for carbon/epoxy composite adhesive joints, **Journal of Adhesion Science and Technology**, **17**:329–352.

30. Potter, K.D., Guild, F.J., Harvey, H.J., Wisnom, M.R., and Adams, R.D., 2001. Understanding and control of adhesive crack propagation in bonded joints between carbon fibre composite adherends I. Experimental, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, **21**(6):435 – 443.

31. Tong, L., 1998. Failure of Adhesive-Bonded Composite Single Lap Joints with Embedded Cracks, **AIAA Journal**, **36**:448–456.

32. Qin, M. and Dzenis, Y.A., 2003. Analysis of single lap adhesive composite joints with delaminated adherends, **Composites Part B: Engineering**, **34**(2):167 – 173.

33. Kayupov, M. and Dzenis, Y.A., 2001. Stress concentrations caused by bond cracks in single-lap adhesive composite joints, **Composite Structures**, **54**(2-3):215 – 220.

34. Kim, K.S., Yi, Y.M., Cho, G.R., and Kim, C.G., 2008. Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints, **Composite Structures**, **82**(4):513 – 520.

35. Mitrevski, T., Marshall, I., Thomson, R., Jones, R., and Whittingham, B., 2005. The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates, **Composite Structures**, **67**(2):139 – 148.

36. Mitrevski, T., Marshall, I., and Thomson, R., 2006. The influence of impactor shape on the damage to composite laminates, **Composite Structures**, **76**(1-2):116 – 122, fifteenth International Conference on Composite Materials - ICCM-15.

37. Stronge, W.J., 2000. Impact Mechanics, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

38. Ceyhun, V. and Turan, M., 2003. Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, **Mühendis ve Makina Dergisi**, **516**.

39. Sjoblom, P.O., Hartness, J.T., and Cordell, T.M., 1988. On low-velocity impact testing of composite materials, **Journal of Composite Materials**, **22**(1):30–52.

40. Shivakumar, K., Elber, W., and Illg, W., 1985. Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates, **AIAA Journal**, **23**:442–449.

41. Cantwell, W. and Morton, J., 1989. Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP, **Composite Structures**, **12**(1):39 – 59.

42. Abrate, S., 1991. Impact on laminated composite materials, **Applied Mechanics Reviews**, **44**(4):155–190.

43. Robinson, P. and Davies, G., 1992. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites, **International Journal of Impact Engineering**, **12**(2):189 – 207.

44. Radice, J. and Vinson, J., 2006. On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: Analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation, **Composites Science and Technology**, **66**(14):2528 – 2547.

45. Kihara, K., Isono, H., Yamabe, H., and Sugibayashi, T., 2003. A study and evaluation of the shear strength of adhesive layers subjected to impact loads, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, **23**(4):253–259.

46. Sato, C., 2005. Impact behaviour of adhesively bonded joints, Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications, 164–188, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.

47. Sato, C., 2008. Impact, Impact behaviour of adhesively bonded joints, Modeling of Adhesively Bonded Joints, 279–300, Springer-Verlag, Berlin.

48. Harris, J. and Adams, R.D., 1999. An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, **199**(C2):121–131.

49. Adams, R.D. and Harris, J.A., 1996. A critical assessment of the block impact test for measuring the impact strength of adhesive bonds, **International Journal of Adhesion and Adhesives**, **16**(2):61 – 71.

50. Goglio, L. and Rossetto, M., 2008. Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations, **International Journal of Impact Engineering**, **35**(7):635 – 643.

51. Laura, P.A.A. and Rossit, C.A., 2001. The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials, **Ocean Engineering**, **28**(10):1437–1438.

52. He, X. and Oyadiji, S.O., 2001. Influence of adhesive characteristics on the transverse free vibration of single lap-jointed cantilevered beams, **Journal of Materials Processing Technology**, **119**(1-3):366–373.

53. Rossum, G., 1990-2007, Python Programming Language, http://www.python.org/.

54. ASTM D 7136/D 7136M-05, Standard test method of measuring the damage resistance of a fiber-reinforced plolymer matrix composite to a drop-weight impact event.

55. Hashin, Z., 1980. Failure criteria for unidirectional fiber composites, **Journal of Applied Mechanics**, **47**(2):329–334.

56. Greszczuk, L., 1974. Microbuckling of lamina reinforced composites, in Composite Materials: Testing and Design (Third Comference), volume 546, 5–29, ASTM STP.

57. , 2005, Anon, Properties for graphite/epoxy IM-6/3501-6, fiber volume = 63.5%, University of California, San Diego, http://casl.ucsd.edu/oldindex.html.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yıldırım 1977 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri'de, lise eğitimini Kocaeli Körfez Fen Lisesinde tamamladı. Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde 2003 yılında, yüksek lisans eğitimini Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2006 yılında tamamladı ve aynı yıl aynı anabilim dalında Doktora programına başladı. Evli ve iki çocuk babası olan Mustafa Yıldırım Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 2005 yılında araştırma görevlisi olarak başladığı görevine devam etmektedir.

Adres	:	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 38039 - KAYSERİ
Telefon	:	0 352 437 49 01 - 32155
Belgegeçer	:	0 352 437 57 84
e-posta	:	my@erciyes.edu.tr