KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT ÇUBUKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Abdulkadir CENGİZ

Anabilim Dalı : Makina Eğitimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet UÇAR

KOCAELİ 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT ÇUBUKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Abdulkadir CENGİZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 31 Ekim 2007

Tezin Savunulduğu tarih : 16 Kasım 2007

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Doç.Dr. Mehmet UÇAR	Prof.Dr. İbrahim KILIÇASLAN	Prof.Dr. Mustafa KURT
(.....)	(.....)	(.....)

Üye	Üye
Yrd.Doç.Dr. Cüneyt OYSU	Yrd.Doç.Dr. Yasin KİŞİOĞLU
(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Kompozit malzemeler, yüksek mukavemeti, yüksek elastiklik modülü, yüksek korozyon direnci ve oldukça hafif olmasından dolayı endüstrinin bir çok alanında olduğu gibi otomotiv endüstrisinde de oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde ise yakıt tüketimi en önemli etken olmasından dolayı taşıtların hafif olması önemlidir. Tasarım süreçlerinde ise hafiflik ile yolcu güvenliği çelişen hedeflerdir.

Bu doktora tez çalışmasında özellikle taşıyıcı eleman olarak kullanılan kompozit çubuk malzemelerin enerji sönümleme karakteristiklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik bir dizi deney çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ilk kez bu amaç için kullanılan "çift kollu sarkaç test sistemi tasarlanarak kurulmuştur. Kompozit çubuk malzemelerin enerji performansını artırmak için, "Dar kesit" yöntemi geliştirilmiş farklı konfigürasyona sahip çubuk malzemelerin enerji sönümleme karakteristikleri tespit edilmiş bu metot ile kompozit çubukların enerji sönümleme performanslarında artış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise, dar kesit yönteminin çubuk malzeme içinde farklı bir hasar mekanizmasını oluşturmasıdır. Bu hasar mekanizmasıyla oluşan hasar tipi "2.Tip" hasar oluşumları adıyla tanımlanmıştır. Ayrıca, dar kesit yöntemindeki değişkenlere bağlı olarak, çubuk malzemenin SES oranını tahmin edebilen bir tahmin denklemi oluşturulmuştur.

Bu tezin ortaya çıkmasında tez danışman hocam Doç.Dr. Mehmet UÇAR'a, tez izleme komitesi üyelerinden sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Yasin KİŞİOĞLU'na, sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Cüneyt OYSU'ya, bölüm başkanımız Prof. Dr. İbrahim KILIÇASLAN'a ve Teknik Eğitim Fakültesi yöneticilerine, Makine Eğitimi Bölümü öğretim üyeleri, öğretim görevlilerine ve bölümümüz teknisyenine, ESA KİMYA A.Ş. yetkililerine katkı ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Özellikle; uzun seneler aynı yükü paylaştığımız araştırma görevlisi arkadaşlarım; Arş.Gör.Dr.A.Necati ÖZSEZEN, Arş.Gör.Ali TÜRKCAN, Arş.Gör Ali ÇAVDAR, Arş.Gör. Hakan KÖYLÜ, Arş.Gör.Nida NURBAY ÖZÖN, Arş.Gör.Arif ÖZKAN ve diğer asistan arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Ayrıca verdikleri manevi katkılarından dolayı annem Harika CENGİZ, babam Mehmet CENGİZ, ağabeyim Cem CENGİZ, kardeşim Şahika CENGİZ ve aile büyüklerime, özellikle sabrından ve verdiği güçten dolayı sevgili eşim NAZLI ve biricik oğlum ENİS'e çok teşekkür ederim.

Edinmiş olduğum bütün bilgi ve becerilerimi ülkemizin daha ileri seviyelere yükselmesi için bütün gayretlerimle kullanacağıma söz veriyorum.

Abdulkadir CENGİZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 8
3. KOMPOZİT MALZEMELER 14
3.1. Üretimi ve Mekanik Özellikleri 14
3.2. Kompozit Malzemelerin Hasar Tipleri 16
3.2.1. Katastropik hasar tipi 18
3.2.2. Aşamalı hasar tipi 18
4. DENEY TASARIMI VE ÇALIŞMALARI 24
4.1. Kompozit Malzeme seçimi ve Test numunelerinin Hazırlanması 25
4.1.1. Yarı statik kıvırma testi numune geometrisi 25
4.1.2. Dar kesit yöntemi için hazırlanmış numune geometrisi 26
4.2. Yarı Statik Yüklemeli Deneysel Çalışma 27
4.2.1. Kıvırma test yöntemi ve test aparatlarının hazırlanması 27
4.2.2. Yarı statik yüklemeli test düzeneğinin hazırlanması 29
4.3. Dinamik Yüklemeli Deney Düzeneğinin Hazırlanması 35
4.3.1. Dar kesitli test kalıplarının (nozul) hazırlanması 36
4.3.2. Çift kollu sarkaç ünitesinin tasarımı ve kurulması 37
4.3.3. Dinamik yüklemeli deneysel verilerin analiz yöntemi 45
4.3.3.1. Konum-zaman verilerinin işlenmesi 46
4.3.3.2. Sönümlenen enerji miktarı 47
4.3.3.3. İmpulsif kuvvet ve çarpışma katsayısı 48
4.3.3.4. Spesifik enerji sönümleme oranı 52
4.3.4. Farklı malzemelerin çarpışma deneyleri 52
4.3.4.1. Köpük malzemesi 53
4.3.4.2. Metal malzemesi 54
4.3.4.3. Kompozit çubuk malzemeye ait örnek çalışma 56
5. KOMPOZİT ÇUBUKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİ 58
5.1. Yarı Statik Deney Sonuçları ve Analizi 58
5.1.1. Yarı statik yüklemeli kıvırma testi sonuçları 59
5.1.2. Yarı-statik yüklemeli dar kesit test sonuçları 63
5.2. Dinamik Yüklemeli Deney Sonuçları 70
5.2.1. Reaksiyon kuvveti – Zaman değişimlerinin incelenmesi 72
5.2.1.1. Kesit daralma etkisinin incelenmesi 73

5.2.1.2. Numune iç delik çapının (d) etkisi 78
5.2.1.3. Kalıp delik uzunluğunun (l) etkisi 79
5.2.1.4. Kalıp giriş açısının (β) etkisi 79
5.2.2. Numunelerde oluşan hasar tipleri 81
5.2.2.1. 1.Tip hasar 81
5.2.2.2. 2.Tip hasar 84
5.2.3. Test kombinasyonlarına ait çarpışma karakteristiklerinin belirtilmesi 90
5.2.3.1. SES oranına çubuk çapı ile kalıp delik çapı farkının etkisi 92
5.2.3.2. SES oranına çubuk iç delik çapının etkisi 94
5.2.3.3. SES oranına kalıp kanal boyunun etkisi 95
5.2.3.4. SES oranına kalıp giriş eğim açısının etkisi 96
5.2.4. SES oranı için tahmin denkleminin oluşturulması 97
5.2.5. Çarpışma senaryolarında çarpışma katsayısının (e) etkisi 100
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 102
7. KAYNAKLAR 106
EKLER 112
ÖZGEÇMİŞ 116

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Taşıt hızına bağlı deformasyon bölgeleri 2
Şekil 1.2: Enerji yönetimi açısından önden çarpma durumu 2
Şekil 1.3: İdeal çarpışmaya ait kuvvet-deformasyon eğrisi 3
Şekil 3.1: Pultrusyon metodu ile üretilen profillere ait farklı kesit örnekleri 15
Şekil 3.2: Pultrusyon işleminin şematik gösterimi..... 16
Şekil 3.3: Parçalanma modu..... 20
Şekil 3.4: (Tabaka) eğilme modu..... 21
Şekil 3.5: Gevrek (Kırılgan) hasar modu..... 21
Şekil 3.6: Kısmi Bükülme veya Aşamalı Katlanma..... 22
Şekil 3.7: Yanal sıkıştırma sonucu kesitte oluşan çatlak..... 23
Şekil 3.8: Fiber takviyeli kompozit çubuğun dinamik yük uygulanmasından a)önceki, b) sonraki durumu 23
Şekil 4.1: Yarı statik test için a) numune geometrisi, b) hazırlamanmış örnek numune.....26
Şekil 4.2: Dinamik test için deney numunesi geometrisi.....26
Şekil 4.3: Dar kesit yöntemi için hazırlanmış örnek deneysel çalışma numuneleri 27
Şekil 4.4: Kalıp içinde kompozit numunenin tabakalara ayrılması 28
Şekil 4.5: Yarı statik test için hazırlanmış kalıp 29
Şekil 4.6: Yarı Statik yükleme ünitesinin şematik gösterimi.....30
Şekil 4.7: Yarı Statik yükleme ünitesi: hidrolik presin genel görünümü.....31
Şekil 4.8: Yarı statik yükleme ünitesinde yük hücresi ve kıvırma kalıbının yerleştirilmesi.....31
Şekil 4.9: Yarı statik test düzeneği için hazırlanmış programa ait kullanıcı ara yüzü..32
Şekil 4.10: Yarı statik test düzeneği için hazırlanmış programa ait blok diyagram 34
Şekil 4.11: Sıkı geçme kalıbına ait kesit görünüş 36
Şekil 4.12: Çarpışma test düzeneğinde malzeme tutucu aparat.....37
Şekil 4.13: Sarkaç tip çarpışma test düzeneği şematik görünümü.....38
Şekil 4.14: Çift kollu sarkaç tipi çarpma deney düzeneği.....39
Şekil 4.15: Kol ile gövde bağlantısını sağlayan ara elemanlar 40
Şekil 4.16: Konum algılayıcı ile sarkaç kolu bağlantısı 40
Şekil 4.17: Sarkaç kollarının ana gövde üzerine montajı 41
Şekil 4.18: Programa ait kullanıcı ara yüzü 43
Şekil 4.19: Programa ait blok diyagram.....44
Şekil 4.20: Deneysel olarak elde edilen örnek konum-zaman eğrisi örneği (strafor malzeme) 46
Şekil 4.21: Analitik olarak elde edilen örnek hız-zaman eğrisi örneği (strafor malzeme) 47
Şekil 4.22: Bir cisim için çarpışma anındaki impulsif kuvvetler ve etkileri..... 50
Şekil 4.23: Strafor malzemeye ait çarpışma testi verileri: Konum-zaman grafiği..... 53
Şekil 4.24: Strafor malzemeye ait çarpışma testi verileri: Hız-zaman grafiği 54
Şekil 4.25: Metal-metal çarpışmaya ait test verileri: Konum-zaman grafiği.....55

Şekil 4.26: Metal-metal çarpışmaya ait test verileri: Hız-zaman grafiği 55
Şekil 4.27: Kompozit malzemeye ait çarpışma test verileri: Konum-zaman grafiği 57
Şekil 4.28: Kompozit malzemeye ait çarpışma test verileri: Hız-zaman grafiği 57
Şekil 5.1: Yarı statik yükleme altında tabaka ayrılması hasarı oluşum aşamaları..... 59
Şekil 5.2: Eğimli yüzeyden geçirilen kompozit malzeme davranışı 60
Şekil 5.3: Silindirik kesitli numuneler ve kalıplarına ait kesit görünüşler.....64
Şekil 5.4: Ani daralan kesit girişinde malzeme sıkışması..... 64
Şekil 5.5: Ani daralan kesit girişinde malzeme sıkışması sonucunda ani hasar oluşumu 65
Şekil 5.6: Ani daralan kesitte malzeme hasar tipi: üstten görünüş (Tabaka eğilmesi modu) 65
Şekil 5.7: Ani daralan kesitte malzeme hasar tipi (Tabaka eğilmesi modu).....66
Şekil 5.8: Malzeme içinde oluşan radyal çatlaklar (şekil 6.11'de A bakış yönü)..... 66
Şekil 5.9: Konik kesitten geçirilen malzemede oluşan hasar tipi: yan görünüş.....67
Şekil 5.10: Konik kesitten geçirilen malzemede oluşan hasar tipi: önden görünüş.....68
Şekil 5.11: Silindirik çubuklar için reaksiyon kuvveti-deformasyon değişimi.....69
Şekil 5.12: Numune .apı ve kalıp çapı farklarının şematik gösterimi.....73
Şekil 5.13: t=0.75 mm olan deneylere ait örnek reaksiyon kuvvet-zaman değişim grafikleri.....74
Şekil 5.14: t=1.75 mm olan deneylere ait örnek reaksiyon kuvveti-zaman değişimi grafikleri.....75
Şekil 5.15: t=2.75 mm olan deneylere ait örnek reaksiyon kuvvet-zaman değişimi grafikleri..... 76
Şekil 5.16: Sabit 6_X_5_10 konfigürasyonlarında değişen çap farkının etkisi.....77
Şekil 5.17: Sabit X_18_10_10 konfigürasyonların için değişen numune iç delik çapının etkisi 78
Şekil 5.18: Kanal boyu mesafesinin (l) etkisi 79
Şekil 5.19: Kalıp giriş açısının (β) etkisinin incelenmesi 80
Şekil 5.20: Reaksiyon kuvvetlerinin zamana göre değişimi 81
Şekil 5.21: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar oluşumu genel görünüş: Numune ve kalıbın testten sonraki görünüşü 82
Şekil 5.22: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar oluşumu genel görünüş : Malzeme yüzeyinde oluşan tabaka ayrılmaları 82
Şekil 5.23: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar oluşumu: detay görünüş..... 83
Şekil 5.24: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar oluşumu: Numunenin boyuna kesit görünüşü 83
Şekil 5.25: 2.Tip hasarda ayrılma yüzeyleri oluşumu..... 85
Şekil 5.26: 2.Tip hasarda fibere dik çatlaklar 86
Şekil 5.27: 2.Tip hasar ve tabaka ayrılması hasarı: 0_19_10_10 numunesi..... 87
Şekil 5.28: Dinamik çarpma sisteminde 2.Tip hasar oluşumu: 3_19_10_10 numunesi 88
Şekil 5.29: 0_19_10_10 numunesinin 10 kat büyütülmüş detay görüntüsü 89
Şekil 5.30: Numune konfigürasyonlarına göre SES oranındaki değişim.....91
Şekil 5.31: İmpulsif kuvvetlerin SES oranına göre incelenmesi 92
Şekil 5.32: SES oranında çubuk çapı ile kalıp delik çapı farkı (t) etkisi 93
Şekil 5.33: SES oranına çubuk iç delik çapı (d) etkisi.....94
Şekil 5.34: SES oranına kalıp kanal boyu (l) etkisi 95

Şekil 5.35: SES oranına kalıp giriş eğim açısı (β) etkisi.....96
Şekil 5.36: Deneysel verilerden elde edilen gerçek SES oranı değerlerine karşılık olarak tahmin edilen SES oranı değerleri.....99
Şekil 5.37: Test konfigürasyonları için, gerçek ve hesaplanmış SES oranları 100
Şekil 5.38: Farklı çarpışma katsayısı için çarpışma senaryosu örneği.....101
Şekil 5.39: Kompozit çubuğun taşıt üzerine montajı.....105

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1: Kompozit çubuk malzemelerin mekanik özellikleri.....25
Tablo 4.2: Dinamik yüklemeli test değişkenleri.....36
Tablo 5.1: Yarı statik yüklemeli kıvırma testi sonuçları.....63
Tablo 5.2: Yarı statik yüklemeli dar kesit test sonuçları.....70
Tablo 5.3: Kompozit numune kombinasyonları için elde edilen çarpışma karakteristikleri.....90
Tablo 5.4: Tahmin denkleminde kullanılan parametreler.....97

KOMPOZİT ÇUBUKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdulkadir CENGİZ

Anahtar Kelimeler: Taşıt tasarımı, Enerji Sönümleme, Kompozit çubuk.

Özet: Bu çalışmada, son zamanlarda taşıt gövdesinde sıkça kullanılan kompozit yapıların enerji sönümleme performanslarını artırıcı yeni bir yöntem tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Bu yöntem kompozit çubukların daha dar bir kesitten geçirilmesi esasına dayanmaktadır. Böylece kompozit malzeme içerisinde tabaka ayrılması ve fiber kopmasının birlikte oluştuğu bir hasar mekanizması elde edilmiştir. Bu yöntemin uygulamasında pultrusyon tekniği ile üretilmiş kompozit çubuklar seçilmiştir. Bu yöntemde kompozit çubukların spesifik enerji sönümleme (SES) oranına etki eden 4 parametre belirlenmiş ve etkileri incelenmiştir. Bu değişkenler, çubuk ile delik arasındaki çap farkı (t), kalıp delik boyu (l), delik girişi eğim açısı (β) ve çubuk içindeki delik çapı (d) ölçüsüdür. Bu değişkenlerin dinamik yüklemedeki etkilerini belirlemek için çift kollu bir sarkaç sistemi tasarlanmış ve kurulmuştur. Çubuk yapısının sabit tutulduğu deneylerde, SES oranını t'nin %47 artırdığı, d'nin %23 azalttığı ve aşırı anlık yükleri sönümlediği, l'nin %16 artırdığı ve β'nın %44 artırdığı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda, bu dört adet deney değişkenine bağlı olarak, SES oranını verebilen 0.928 korelasyon katsayısına sahip bir tahmin denklemi elde edilmiştir. Son olarak, tasarımı yapılan enerji sönümleyici sistemin, orta ölçekli taşıt çarpışmalarında birincil sönümleyici eleman olarak kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

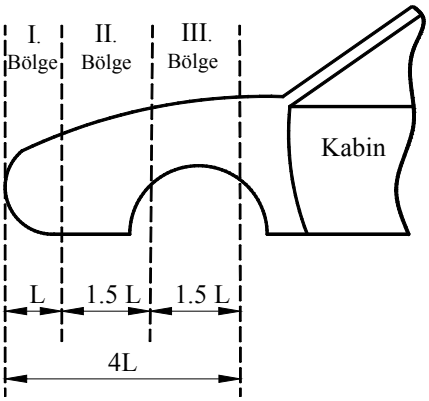
AN INVESTIGATION OF THE ENERGY ABSORPTION CHARACTERISTICS OF THE COMPOSITE BARS

Abdulkadir CENGİZ

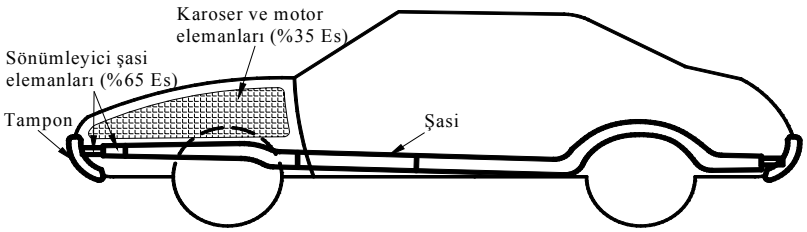
Keywords: Vehicle design, Energy absorption, Composite Bar.

Abstract: In this study, a new method to improve energy absorption performance of composite structures, which is used in vehicle bodies, has been designed and examined. This method is based on pushing composite bars into the narrow cross sectioned nozzle. Hence two fracture mechanisms delamination and fiber fracture were generated within the composite bar at the same time. The pulturised composite bars were used in the application of this method. Four main dimensional parameters and that's effects on specific energy absorption (SEA) of pultruded composite bars have been examined. These dimensional parameters are the clearance between composite bar and nuzzle diameters (t), length of the nuzzle (l), angle of the nuzzle entrance (β) and hole diameter on the center of composite bar (d). Double pendulum test system was designed and applied to determine the effects of these parameters at the dynamic conditions. In the experimental study same type composite bars were used. It was determined that when the t is changed SEA was increased with 47%, when the d is changed SEA was decreased with 16% while the peak loads were prevented, when the l is changed SEA was increased with 16%, when the β is changed SEA was increased with 44%. Finally to design and optimize the energy absorption system, a prediction equation depending on four parameters has been carried out to get a SEA of the bars have different configurations. The prediction equation has been obtained with 0.928 correlations coefficient. At the end of the study, it was shown that this new energy absorption system is suitable for using as an energy absorber at the midscale vehicle crushes.

çarpma enerjilerinin sönümlenmesi ihtiyacına cevap verebilmektedir. Diğer bölgeler ise artan yük seviyelerine göre tasarlanmaktadır. En son bölge olarak maksimum yüke dayanabilecek yolcu kabini gelmektedir.



Şekil 1.1: Taşıt hızına bağlı deformasyon bölgeleri



Şekil 1.2: Enerji yönetimi açısından önden çarpma durumu

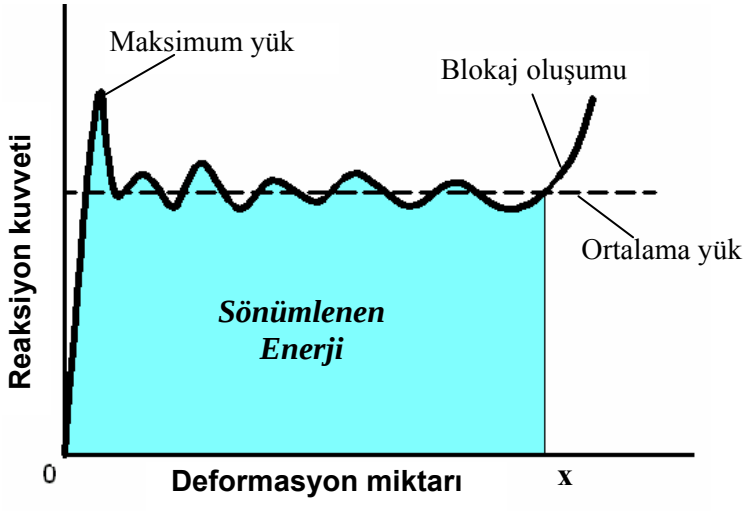
Taşıt gövdesinde kullanılan enerji sönümleyici yapı elemanlarının enerji sönümleme karakteristikleri çarpışma enerjisi yönetimi açısından bir başka önemli faktördür. Enerji sönümleme; malzeme, üretim tekniği, parça geometrisi, mikro yapı, kırılma başlangıç mekanizması ve deformasyon hızı gibi değişkenlerle bağımlı bir olaydır. Malzemelerin enerji sönümleme kabiliyetlerini karakterize eden en önemli parametre, çarpışmaya maruz malzemenin deforme olan kütlesine (W) karşılık sönümlediği enerji miktarı (E_s) olan "Spesifik Enerji Sönümle" (SES) oranıdır.

$$\text{SES oranı} = E_s / W \tag{1.1}$$

Wallentowitz ve Adam [6] 1995 yılında yaptıkları çalışmada bu konuya açıklık getirmişlerdir. Bir yapının SES oranının, malzeme ve tasarım biçimine bağlı olarak o

yapının enerji sönümleme özelliğinin bir ölçüsü olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak SES'in bir yapıya ait; burkulma direnci, titreşim sönümleme, imal edilebilirlik, işlenebilirlik vb. diğer fiziksel büyüklükler hakkında bilgi içermediğini belirtmişlerdir.

Bir yapıya ait SES oranı, yapının deformasyonu esnasında meydana gelen reaksiyon kuvvetlerinin karakteristiği ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 1.3 sönümleme mesafesine göre değişen ideal bir yük eğrisini göstermektedir. Şekil 1.3'den anlaşıldığı gibi, temas anından itibaren yük hızlı bir şekilde maksimum değerine ulaşmakta ardından az bir düşüşle sabit bir değerde kalmaktadır.



Şekil 1.3: İdeal çarpmaya ait kuvvet-deformasyon eğrisi [6]

Bu şekilde bir enerji sönümleme karakteristiğinin gerçekleşmesi durumunda, malzemeye ait SES oranı maksimum değerde gerçekleşir. Birinci aşama olan temas anından itibaren ilk deformasyon oluşuncaya kadar hızlı bir şekilde artan maksimum yükün değerinin, ortalama yük değerinden çok fazla olması istenilmemektedir. Çünkü maksimum yük, ilk deformasyon için gerekli yük miktarını sağlanmakta, Kararlı çökme bölgesi olarak adlandırılan ikinci aşamada görülen ortalama yük ise yapıyı düzenli bir şekilde hasara uğratmaktadır. Böylece oluşan ortalama kuvvet, malzemenin deformasyon uzunluğu kadar bir mesafede, sistemin toplam kinetik enerjisinin sönümlenmesi işini gerçekleştirmektedir.

Yük-deformasyon eğrisini karakterize eden bir başka faktörde maksimum yük değerinin ortalama yük değerine oranı olan "yük oranı" olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır[6];

$$\text{yük oranı} = \frac{\text{Maksimum yük}}{\text{Ortalama yük}} \tag{1.2}$$

1997 yılında Karbhari ve diğerleri [7], yük oranının 1.25 değerinden küçük olması gerektiğini belirtmişlerdir. Ancak yük oranı değeri, malzeme veya sistem açısından bakıldığında tek başına çarpma enerjisini sönümlemenin bir ölçüsü olmamaktadır. Bir yapı düzgün bir yük oranına sahip olmasına karşılık düşük ortalama yük değeriyle yeterli enerji sönümleme kapasitesine sahip olmayabileceği de ifade edilmektedir[8].

Enerji sönümlenmesi açısından bakıldığında, özellikle otomotiv şasi ve gövde tasarımında SES oranına doğrudan etki edecek önemli noktalar arasında, enerji sönümleyecek yapıya ait tasarım değişkenleri ve malzeme seçiminin önemi anlaşılmaktadır. Şasi ve gövde tasarımında kullanılacak olan yapı malzemelerinin; motor elemanlarını, yolcuları, bagaj, kasa ve karoseri yükünü taşımak gibi görevleri yerine getirmesi gerekmektedir. Ayrıca bu yapıların bir kaza oluşması durumunda taşıtın hızından ve kütlesinden kaynaklanan mevcut kinetik enerji miktarlarını da sönümleyebilmesi gerekmektedir. Sönümlenmesi gereken bu kinetik enerji (E_k), 1000 kg kütleli ve 36 km/h (10 m/s) hız ile seyir halindeki standart bir binek taşıt modeli için şu şekilde hesaplanabilir;

$$E_k = 0.5mV^2 = 0.5x1000x10^2 = 50\,\text{kJ} \tag{1.3}$$

Burada m taşıt kütlesi, V ise taşıt hızıdır. 50 kJ olan kinetik enerjiyi sönümleyecek olan malzeme miktarı ise Denklem 1.1'den hesaplanabilir. Örnek olarak SES oranı, klasik yöntemlere göre 42 j/g [5] olan E-Cam fiber takviyeli kompozit malzeme için kullanılması gereken malzeme miktarı 1220g olarak hesaplanabilir. Bu ise 1.8 g/cm^3 olan bu malzeme için 678 cm^3'lük hacme sahip yapının veya yapıların taşıtın uygun bölgelerine yerleştirilmesi anlamına gelmektedir. Bu hacim genişlemesi durumunun,

Denklem 1.3’te belirtildiği gibi hız miktarındaki artışın karesiyle orantılı olarak konstrüksiyon aşamasında ciddi problemlere yol açacağı açıktır. Bu nedenle yeni sönümleme yapıların araştırılmas□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ ıların araştırılmas□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

malzemelerin enerji sönümleme karakteristiklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesine yönelik bir dizi çalışma yapılmıştır. Literatüre geçmiş çalışmalara ek olarak bu malzemeye ait SES oranını artıracak farklı bir yöntem içeren deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada malzeme özellikleri sabit tutulmuştur. Buna karşılık dış etkenlerden olan boyut farkından faydalanma metodu seçilmiştir. Bu metot ile kompozit malzemelerin dar kesitlerden zorlamalı olarak geçirilmesi esnasında fiber yönüne dik, yüksek radyal sıkıştırma kuvvetleri oluşturulmaktadır. Radyal baskı kuvvetleri, dar kesit boyunca içeride sıkışan malzemede poison etkisi sonucu fiber yönünde nominal gerilmeler oluşturmakta bu durum ise çubuk malzemede fiber yönünde çekme etkisi meydana getirmektedir. Bu etki sonucu sıkışan kesitte ki kompozit malzemede, fiber kırılmaları ile matris içerisinde deformasyonlar sağlanarak yüksek reaksiyon kuvvetleri oluşturulmuştur.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümde genel olarak çarpma enerjisinin sönümlenmesi hakkında bilgi verilmektedir. Literatür tarama bölümünde ise konuyla ilgili yapılmış çalışmalara ait geniş bir inceleme yapılmıştır. Üçüncü bölümde incelenilen kompozit çubuk malzemelerinin üretim yöntemi olan pultrusyon işlemi tanıtılarak kompozit yapıların aşamalı ve katastropik hasar durumlarında malzeme içerisinde oluşan hasar mekanizmaları açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan araştırma yöntemleri tanıtılmıştır. İlk olarak yarı statik test ünitesi, test malzemesinin özellikleri ve geometrik büyüklükleri, kıvırma (curling) test metodu, test donanımları ve hazırlanan test yazılımı tanıtılmıştır. Beşinci bölümde ayrıca dinamik yüklemeli testlerde kullanılan, numune ve nozullara ait geometrik büyüklükler verilmiş, literatürde bu amaçla ilk kez kullanılan çift kollu sarkaç ünitesi tanıtılmıştır. Çarpma test ünitesiyle birlikte kullanılan deneysel cihaz ve ekipmanlar ile bu ekipmanlardan sağlanan verileri kayıt altına almak için yazılan bilgisayar programı anlatılmıştır. Çalışmanın temelini oluşturan dinamik yüklemeli test verilerinin işlenmesinde kullanılan matematiksel ifadeler açıklanarak, deney verilerinin analiz yöntemleri de uygulamalı örnekler yapılmak suretiyle anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, yarı statik testlerden elde edilen verilere ait grafiklere ve malzemelerde oluşan hasar yapılarına ait fotoğraflara ait incelemeler yapılmıştır. Kompozit malzemelerin, yarı statik test koşulları altında, kıvırma test metodu ve dar deliklerden geçirilme metoduyla tespit edilen enerji sönümleme karakteristikleri sunulmuş ve analiz edilen bütün veriler tablolarda belirtilmiştir. Daha sonra, dinamik yüklemeli test verileri incelenmiştir. İlk olarak reaksiyon kuvvet değişim eğrileri, her bir parametrenin enerji sönümleme karakteristiklerine etkilerinin anlaşılması için ayrı başlıklarda incelenmiştir. Hasar tipleri, dinamik yükleme koşullarında oluşan deformasyon karakteristikleri ve hasar mekanizmaları fotoğraflarla gösterilmiş, bulgular 1.Tip ve 2.Tip hasar oluşumu olmak üzere iki alt başlıkta incelenmiştir.

Devamında ise dinamik testlerden alınan konum zaman verilerinin işlenmesiyle elde edilen verilere ait incelemelere yer verilmiştir. Yapılan incelemede, deney parametrelerindeki (t= kesit çap farkı miktarı, d= çubuk iç delik çapı, l = kalıp içi kanal boyu, β= kalıp kanal giriş eğim açısı) değişimin numune konfigürasyonları için tespit edilen SES oranı değerleri üzerine etkileri gösterilmiştir. İncelenen parametrenin haricindeki değişkenlerin sabit tutulması halinde SES oranında oluşan değişimler grafik gösterimleriyle sunulmuştur. Son olarak bu tip çalışmaların bir ürünü olarak, kullanılacak sistemlerin tasarımı aşamasında kullanılmak üzere, tasarım değişkenlerine bağlı olarak malzemenin SES oranını tahmin etmek amacıyla bir tahmin denklemi oluşturulmuştur. Ayrıca enerji sönümleme karakteristiklerinden olan çarpışma katsayısının farklı olduğu örnek iki çarpışma senaryosu hesaplamalı olarak gösterilmiştir.

Son olarak altıncı bölüm olan sonuç bölümünde ise yapılan deney çalışması ve elde edilen sonuçlara ait değerlendirmelere ve ileride yapılabilecek çalışmalara ait önerilere yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Birçok araştırmacı kompozit malzemelerin enerji sönümleme karakteristiklerinin tespit edilmesine yönelik bir çok teorik ve deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu çalışmalarda kolay ve ucuz üretim yöntemleri ve yüksek çekme basma dayanımlarına sayıp olmalarından dolayı taşıyıcı sistem elemanı olarak kullanılan pultrusyonla üretilmiş kompozit çubuk ve boru kesitli yapılar ile çapraz sarımlı silindirik veya farklı geometrilerde kesit alana sahip çubuk ve profiller, enerji sönümleyici sistemler olarak rağbet görmüştür.

Kompozit yapıların, mekanik özellikleri gibi enerji sönümleme karakteristikleri de bazı parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Literatürde kompozit yapıların mekanik özelliklerini ve enerji sönümleme karakteristiklerini etkileyen parametreler olarak; fiber tipi [19], matris malzemesi [20-22], fiber yönü (örgü yapısı) [23-25], parça geometrisi [23,25,26], işlem koşulları [27], yük uygulama hızı [28-30], yükleme koşulları [31], çevresel etkenler [32,33] vb. faktörler belirtilmiştir.

Warrior ve diğerleri [21], 2003 yılında yaptıkları çalışmada Reçine Transferi ile Kalıplama (RTM) metoduyla üretilen kompozit malzemelerde, matris malzemesi olan reçine özelliklerinin ve reçine işlem değişkenlerinin, malzemelerin çarpışma davranışlarına olan etkisini ortaya koymuşlardır. Rasgele yönlendirilmiş liflerin spesifik enerji sönümleme oranını arttırdığını, Epoksinin vinilesterden daha çok enerji sönümlediğini, vinilesterin de polyesterden daha çok enerji sönümlediğini belirtmişlerdir.

Hamada ve diğerleri [23] yaptıkları çalışmada örgü tipinin ve yönlendirme açılarının I kesitli profillerde enerji sönümleme karakteristiklerini iyileştirdiğini göstermişlerdir. Ayrıca bu tarz kiriş yapıların hasar başlangıcı başlatan geometrik yapılara ihtiyaç duyduğunu belirtmişlerdir. Kendi çalışmalarında da parça uçlarına pah kırarak bu ihtiyacı tedarik etmişlerdir.

Karayaka ve Kurath [24] çalışmalarında grafit takviyeli ve epoksi matris malzemeli kompozit tabakaların, 0/90 yönlenmiş durumları için yarı statik çekme ve basma yönlerinde yükleme yaparak malzeme içerisinde oluşan kırılma mekanizmalarını dört farklı şekilde tarif etmişlerdir.

Mahdi ve diğerleri [26] iki yarım koninin dar kesitli uçlarından birleşmiş hallerine benzeyen bir yapıyı, fiber sarma teknolojisiyle üreterek, fiber tipi ve parça konikliğinin etkisini incelemişlerdir. 10,15,20 ve 25 derecelik koniklik açıları için profil yapının çarpışma karakteristikleri ve oluşan hasar tiplerini göstermişlerdir. Sonuçlar cam fiberli ve karbon fiberli malzemeler olarak iki sınıfta incelenmiştir. En iyi performansı 25 derecede yakaladıklarını ifade etmişlerdir.

2005 yılında Turner ve diğerleri [27], kompozit silindirlerin üretim prosesi değişkenlerinin enerji sönümleme karakteristikleri üzerine nasıl etkidiğine dair bir araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında, bağlayıcı maddenin etkisi ve proses değişkenleri ile değişen spesifik enerji sönümleme oranlarını kıyaslamışlardır. Oluşan değişimin sebebinin mikro yapıdaki boşluklara bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Lee ve diğerleri [28], 2000 yılında kompozit yapıların darbe enerjisi sönümleme kabiliyetlerine yönelik yaptıkları araştırmada, cam elyafı takviyeli kompozit malzemeleri, otomobil çarpışmalarındaki deformasyon oranına denk gelen 1-200s^{-1} lik deformasyon hızlarında çekme ve basma testlerine tabi tutmuşlardır. Böylelikle enerji sönümleme karakteristiklerine yönelik, deformasyon sertleşmesine benzer davranışların da etken olduğunu gösteren sonuçlar almışlardır. Böylece dinamik şartlar+da oluşan maksimum yük değerlerini daha net vurgulayabilmişlerdir.

2005 yılında Mamalis ve diğerleri [30] karbon fiber takviyeli plastik (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) kompozitlerin, ince cidarlı kare profillerin statik ve dinamik sıkıştırma yükleri altındaki hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Dinamik yüklemedeki pik yüklerin statik yüklere nazaran daha yüksek olduğunu vurgulamışlardır.

2002 Song ve Du [31] Cam fiber takviyeli plastik (GFRP :Glass Fiber Reinforced Plastics) kompozit yapıların, eksenel yönden kaçık bir şekilde deformasyona tabi tutularak ne tür bir kırılma mekaniği sergilediğini ortaya koymuştur. Kompozit malzemelerin sadece eksenel yöndeki çarpışmalarda değil, aynı zamanda eksenden kaçık çarpışmalarda dahi kararlı bir çökme gösterdiğini belirtmişlerdir.

2002 yılında Saito ve diğerleri [34] pultrusyon yöntemiyle üretilmiş, dışı sarımlı, yuvarlak kesitli, içi dolu, kompozit çubukların spesifik enerji sönümleme karakteristiklerini ortaya koymuşlardır. Çalışmasında, çubukların ilk hasar bölgelerindeki uca açılmış konik yapının açısının ilk yüke (peak load) etkisini incelemişlerdir. Ayrıca çubukların çevrelerinin farklı fiber tipleriyle sarılması ile enerji sönümleme kabiliyetlerindeki değişimleri ortaya koymuşlardır. Bu yapıların yaklaşık olarak kevlar fiberli, alüminyum ve çelikten yapılmış yapılardakine yaklaşık bir spesifik enerji sönümleme oranına sahip olduklarını tespit etmişlerdir.

1997 yılında ise Kuo ve diğerleri [35], üç boyutlu örülmüş kompozit çubukların elastik modüllerinin tespitine ve bu sistemlerin hasar mekanizmalarının araştırılmasına yönelik teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kevlar ve karbon elyafın çoğunlukla kullanıldığı çalışmada yük deformasyon eğrilerine yer verilmiş ve oluşan hasarlar belirlenmiştir.

Warrior ve arkadaşları [36] 2004 yılında yaptıkları çalışmada kompozit tüplerde laminalar arası bağlayıcı yapıların tokluğa etkisini mikro yapı düzeyinde incelemişler ve bu yapıların enerji sönümleme oranlarını belirtmişlerdir. Genelde reçine katkılarının tokluğu arttırdığı ancak SES oranında çok küçük bir değişim sağladığını belirtmişlerdir.

Literatürde taşıyıcı eleman olarak sıklıkla kullanılan I profil malzemelerin yarı statik yüklemeli olarak mekanik özelliklerini Bank ve diğerleri [37] incelemişler aşırı yükler altında oluşan yerel burkulma bölgelerini göstermişlerdir. Yine I profiller için Hamada ve diğerlerinin [23] yaptıkları çalışmada yarı statik ve dinamik yükler altında gösterdikleri hasar mekanizması oluşumlarını incelemişlerdir. Khalid ve diğerleri [38] kalıplama yöntemiyle üretilmiş I profil yapıların farklı tabaka

sayılarına göre mekanik özelliklerindeki değişimlerini deneysel olarak tespit ederek sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak modellemişlerdir. Deney ve simülasyon sonuçları arasında %1-10 arasında uyum gözlemlemişlerdir.

Velmurugan ve diğerleri [39] çalışmalarında bir diğer taşıyıcı eleman olan silindirik yapılı kompozit profillerin eksenel deformasyonları esnasında gösterdikleri ortalama reaksiyon kuvvetin, malzeme parametrelerine bağlı olarak hesaplanmasına yönelik teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kurdukları model ile hesaplanan ortalama yük değerleri deneysel olarak tespit edilen değerden %10-20 arasında düşük çıktığı görülmüştür. Solaimurugan ve Velmurugan [40] silindirik kesitli cam fiber takviyeli polyester matrisli silindirik profillerin kırılma tokluklarına bağlı olarak SES oranlarındaki değişimleri deneysel olarak göstermişlerdir. Tokluğa bağlı olarak malzemenin SES oranında %22 lik artış görülebileceğini ifade etmişlerdir.

Mamalis ve diğerleri [41] ise yaptıkları çalışmada, kare kesitli karbon fiberi takviyeli kompozit profil yapıların statik yükleme altında enerji sönümleme karakteristikleri ve oluşan hasar tiplerini incelemişlerdir. Çalışmalarında malzeme içerisinde oluşan hasar tiplerini sınıflandırmışlardır. Mamalis ve diğerleri [30] yaptıkları bir diğer çalışmada, dinamik yükleme altında karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin, tabaka sayısı ve fiber doluluk oranı değişkenlerine bağlı olarak sergiledikleri enerji sönümleme karakteristiklerini tespit etmişler deformasyon oranı etkisini, maksimum yük oluşumunu %50-90 oranında artırdığı sönümlenen enerjide ise %30-70 arasında değiştiğini göstermişlerdir.

Yine silindirik kesitli kompozit profiller üzerine Anghileri ve arkadaşları [42] tarafından sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmış bir çalışmada, profile ait maksimum çarpma performansı için geometrik değişkenlerin optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Mamalis ve diğerleri [43] yaptıkları çalışmalarında karbon fiber takviyeli ve kare kesitli kompozit profilleri, sonlu elemanlar yöntemiyle modelleyerek çarpma testi simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Deneysel verilerle sonlu elemanlar analizi sonuçları arasında %4.5 gibi bir sapma olduğunu belirtmişlerdir.

El-Hage ve diğerleri [44] yaptıkları sonlu elemanlar analizinde, E-cam takviyeli kompozit profillerin alüminyum profiller ile birlikte kullanılması yönünde çalışmışlardır. Yaptıkları bir dizi simülasyon çalışmasında, hibrit yapıların değişkenlerine bağlı olarak ortalama çarpma reaksiyon kuvvetinin tahmin edilmesini sağlayan bir ampirik denklem elde etmişlerdir. Shin ve diğerlerinin [45] hibrit sistemleri otomobil yan barlarına adapte etme çalışmaları olmuştur.

Güden ve diğerleri [46] cam fiber takviyeli silindirik kesitli kompozit profil yapılarının enerji sönümleme karakteristiklerini incelemiş, sonra aynı yapının alüminyum profiller ile hibrit kullanımı durumunda gösterdikleri karakteristikleri belirtmiş daha sonrasında ise kompozit-alüminyum hibrit yapısının içinin alüminyum köpüğü ile doldurulması durumundaki enerji sönümleme karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmanın sonucunda tek başına kompozit yapıların en yüksek SES oranına sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Han ve diğerlerinin [47] çalışmasında, 45 derece sarım açısıyla sarılmış silindirik çekme kompozit profillerin eksenel çarpma karakteristiklerini sonlu elemanlar yöntemiyle tespit etmişlerdir. Çalışma cam ve karbon elyafı için, farklı kalınlıklarda ve yarı statik ve dinamik yüklemeler altında gerçekleştirilmiştir.

Kompozit tabaka malzemeler darbe mukavemetiyle de ilgi çekmektedir. Luo ve diğerleri [48] kompozit tabakaların darbe enerjisi sönümleme özellikleri üzerine çalışarak, üç farklı kırılma hasar şeklinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada bu yapının sonlu elemanlar modellemesine de yer vermişlerdir. Tabakalar ile ilgili günümüze kadar bir çok çalışma yapılmıştır. Hossseinzadeh ve diğerleri [49] ise karbon ve cam elyafı takviyeli çeşitli kombinasyonlarda oluşturulmuş tabaka komzit yapıların darbe enerjisini sönümleme karakteristiklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında sonlu elemanlar modellemesine de yer vermiş ancak hasar mekanizmasının tam olarak modelde gerçekleşmediğini buna karşılık reaksiyon kuvveti verilerinin deneysel verilerle uyum gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Yine Mamalis ve diğerleri 2005 [50] yılında Fiber takviyeli kompozitlerin, düzlem ayrılması hasar modundaki enerji sönümleme özelliklerine dair deneysel bir analiz

yapmışladır. Çalışmalarında kompozit plakaların, yönlendirilmiş eğrisel bir kanaldan geçirilerek enerji sönümleme kapasitesini tanımlayan "Kıvırma (Curling) Testi" metodunu geliştirmişlerdir. Bu metotla on iki farklı kombinasyondan oluşan fiber plakalarının testlerini yaparak enerji sönümleme karakteristikleri açısından birbirleriyle kıyaslamışlardır.

Ancak tüm bu literatüre rağmen, farklı fiber ve matris tiplerinde imal edilmiş profil yapıların radyal baskı yüklerine (fiber yönüne dik) tabi tutulduğunda enerji sönümleme karakteristikleri açısından nasıl davranacağı ve bu durumda oluşacak olan hasar mekanizması şekillerinin belirlenmesine göre detaylı araştırmalara rastlanılmamaktadır. Sadece Salvadurai [51] yaptığı teorik çalışmasında, sınır eleman metoduyla, tek bir fiber için, fiber-matris arasındaki sürtünme davranışını incelerken, fibere dik yönde sıkıştırılan matris malzemesinin uzayacağını ve bu uzamadan dolayı da fiberde çekme kuvvetlerinin oluşacağını belirtmiştir. Bunun sonucunda fiber-matris arasındaki sürtünme kuvvetine bağlı olarak iki tip hasarın oluşabileceğini; birincisi sürtünmenin çok olması durumunda fiberin kırılacağı ikincisi ise, fiber kırılmadan matris malzemesinin fiber yüzeyinden ayrılacağı savını sunmuştur.

Ayrıca literatürdeki, çarpma enerjisini sönümlemeye yönelik yapılan ve genellikle cam fiberi ve karbon fiberi takviyeli kompozitlerde ve fiber sarma yöntemiyle üretilen kompozit profil malzemelerin kullanıldığı deneyler prototip aşamasında olup henüz taşıtlara adapte edildiği etkili bir uygulama yapılamamış olduğu [52], adaptasyonun sağlanması halinde ise bu yapıların, maksimum yavaşlama ivmesi olan 20g ivmeye maruz bir deformasyonun yaklaşık olarak 0.08 saniyede tamamlanması gerektiği [53] belirtilmiştir.

Yine yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır ki; kompozit yapılarda enerjiyi sönümleyen en önemli faktörler, tabakalar arası ayrılmaların (delaminasyon) gerçekleşmesi ve ayrılma yüzeylerindeki yapıştırma maddelerinin gösterdikleri dirençtir [54].

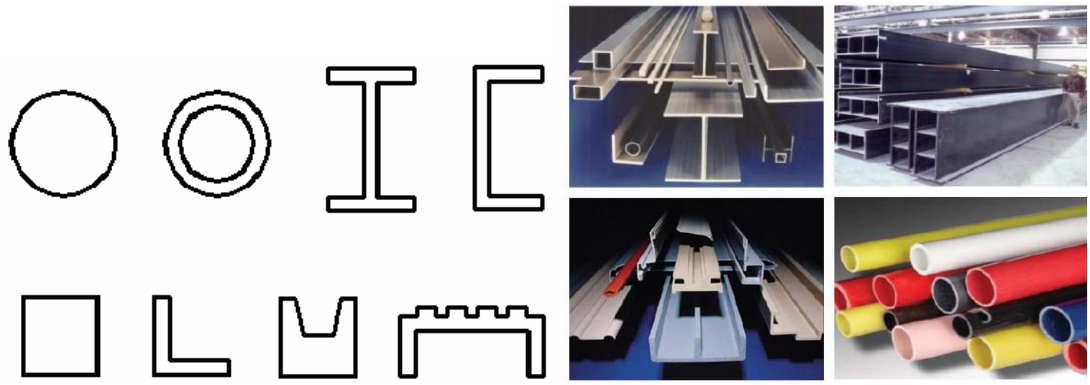
3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler fiber tipleri, matris malzemeleri ve üretim teknikleri itibariyle geniş bir çeşitliğe sahiptir. Bu faktörlere bağlı olarak kompozit malzemeler, farklı mekanik özelliklere sahip olmaktadırlar. Aynı şekilde, farklı enerji sönümleme karakteristikleri ve kırılma hasar tipleri gösterebilmektedirler. Bu çalışmada kullanılan pultrusyon tekniği ile üretilmiş kompozit çubukların üretim teknikleri ve kırılma hasar tipleri anlatılmıştır.

3.1. Üretimi ve Mekanik Özellikleri

Cam fiberler, üretim aşamasında yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmalarından sonra biraz kristalleşmenin oluşmasına rağmen genellikle amorf yapıdadırlar [55]. En çok kullanılan E-Cam (E – Elektriksel) yüksek mukavemete sahip olup hafiflik, tokluk, elektrik yalıtkanlığı ve atmosferik koşullarda istenilen kıstaslara sahiptir. C-Cam (Corrosion-Korozyon) ise E-cama göre korozyona karşı daha dayanıklı olmakla birlikte mukavemeti daha azdır. Bir başka tip olan S-Cam (Strength-mukavemet) E-Cama göre daha pahalı olup yüksek mukavemete ve ısıl dayanıma sahiptir [55,56].

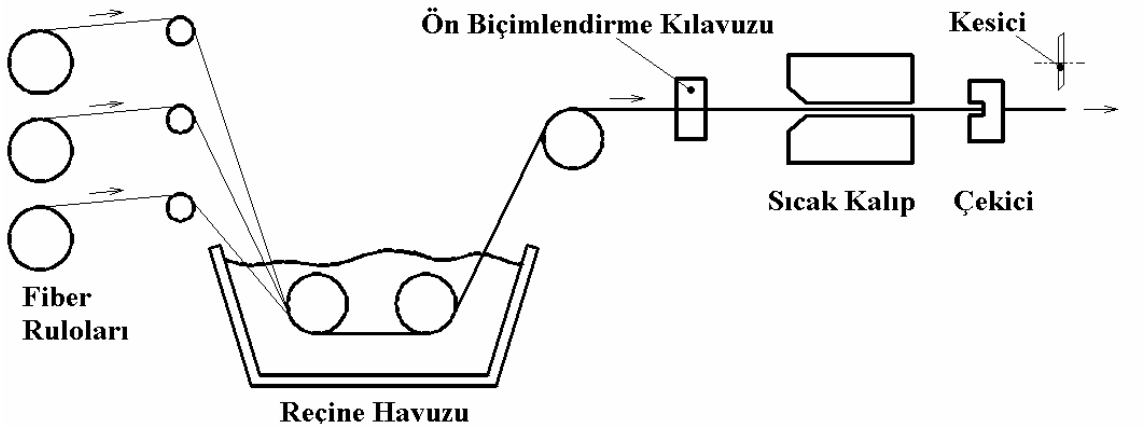
Kompozit malzemelerde, üretim tekniği mukavemeti etkileyen önemli bir faktördür. Farklı üretim teknikleri [57] içinden Pultrusyon tek eksenli bir üretim tekniğine sahip olması açısından diğerlerine göre daha az maliyetli olan hızlı bir üretim tekniğidir. Cam ve Karbon elyafının sonsuz uzunlukta üretilebilirlikleri bu elyaf tiplerini pultrusyon işlemi için çok uygun hale getirmektedir. Bunun yanı sıra, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi çekme ekseni doğrultusunda, eksenel yönde kesitleri değişmeyen çeşitli profil tipleri hızlı ve çok miktarda üretilebilmektedir.



Şekil 3.1: Pultrusyon metodu ile üretilen profillere ait farklı kesit örnekleri

Kompozit malzemelerin üretimi, zaman almalarından dolayı dezavantaja sahiptirler. Yüksek üretim hacmi gerektiren yapı elemanlarının üretimlerinde çok hızlı üretim döngülerine sahip işlemler tercih edilir. Bu işlemlerden biri de pultrusyon ile üretimdir.

Pultrusyon işlemi [57] (Şekil 3.2), fiberlerin fiber bobinlerinden veya sepetlerden çekilmesiyle başlamakta, bir araya gelen fiber demetinin reçine havuzuna daldırılarak reçine emdirilmesiyle devam etmektedir. Reçine emdirilmiş fiberler, çekileceği profil kesitine kabaca uyacak biçimde ön şekillendirilerek kalıba yaklaştırılır. Böylece elyafların kalıptan geçmesi esnasında üretilecek malzemenin kesit alanındaki bölgesel elyaf yığılmaları önlenmiş olmaktadır. Daha sonra henüz katılaşmamış bu kompozit malzeme ürüne son şeklini veren hassas işlenmiş sıcak çelik kalıptan geçirilir. Isı sonucu eksotermik bir reaksiyon başlatmakta böylece termoset reçineli matris malzemesi sertleşerek kalıptan çıkmaktadır. Profil, sürekli olarak çekilmekte ve kalıptan sabit kesitli ve sıcak olarak çıkmaktadır. Profil, doğal veya zorlamalı havayla, gerekli görüldüğünde ise su soğutmalı olarak soğutula bilmektedir. Ürün, çekici mekanizmadan (puller) çıkar ve istenilen boyda ayarlanarak kesilmek veya uygun çaplardaki makaralara sarılmak suretiyle depolanabilmektedir. Ancak malzemenin rijitliğinden dolayı, makaralara sarılarak depolama işlemi sadece ince cidarlı düz profiller veya çok küçük çaplı çubuklar için gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3.2: Pultrusyon işleminin şematik gösterimi.

Pultrusyonla üretimde en çok kullanılan fiber türü E-Cam fiberlerdir. E-Cam fiberler ortalama 3500 MPa olan çekme mukavemetleri ve 50-70 GPa olabilen Elastik modülleri [56,58] sayesinde en çok kullanılan fiber malzemesidir. Buna karşılık % 3-4 gibi düşük uzama yüzdelerine ve reçineli haliyle 175^{o}C ısıl dayanıma sahiptirler [56,58]. Farklı uygulamalara yönelik olarak farklı fiber çaplarında üretilebilirler. Cam fiberlerin diğer avantajları ise yüzey yapısından dolayı optimum reçine emulsiyonu yapabilmesi ve fiber ile matris malzemesi arasında kimyasal bağın maksimum seviyede sağlanmasıdır. Bu ise maksimum mukavemeti ve tutunmayı sağlamaktadır. Ayrıca proses değişkenlerine müdahale edilerek malzemeye ait mekanik özelliklere müdahale etmek de mümkün olmaktadır [59].

3.2. Kompozit Malzemelerin Hasar Tipleri

Metal malzemelerde enerji sönümleme plastik deformasyon içerisinde gerçekleşmekte olmasına rağmen, bir çok fiber takviyeli kompozit malzeme çarpma enerjisini, kırılma ve iç sürtünme ile sönümlemektedir [60]. Ancak her iki durumda da metal ve kompozit yapıların enerjiyi düzgün sönümleyebilmesi kararlı bir çökmenin oluşmasına bağlıdır. Düzgün aşamalı bir çökme, yükün doğrultusu boyunca, parça üzerinde yerel bir hasarla başlayıp, ani bir çökme olmaksızın parçanın sonuna kadar varması şeklinde tanımlanmaktadır [61]. Kararlı bir çökmenin sağlanabilmesi için, metal ve/veya kompozit yapıların tümünde, gerilme yığılması oluşturarak ilk yerel hasarı başlatacak bir mekanizma gereklidir. Kararlı çökmenin

sağlanamadığı durumlarda, parça ani hasara uğramakta, bu durumda yük oranı artmaktadır. Bu ise çarpışma enerjisi yönetimi açısından istenilmeyen bir durumdur.

Farley ve Jones [62], ve Hull [63] yaptıkları çalışmalarda, farklı çarpışma modlarını ve mikro mekanizmalarını sınıflandırmışlardır. Farley ve Jhons, sürekli fiber takviyeli kompozitlerin dört farklı çarpışma modunu; enine makaslama (transverse shearing), gevrek kırılma, düzlemsel eğilme (lamina bending) ve yerel burkulma (lokal buckling) olarak tanımlamışlardır. Düzlem içi çatlak ilerlemesi ve tabaka ayrılması hasarı (lamina bundle fracture), enine makaslama modunu kontrol eden mekanizmalardır. Diğer yandan tabakalar arası, tabaka içi ve fibere paralel çatlak ilerlemeleri ile iç sürtünme tabaka eğilmesi hasarını kontrol etmektedirler. Grafit ve cam fiber gibi kırılgan fiber takviyeli kompozitlerde çoğunlukla gevrek kırılma meydana geldiği görülürken, Kevlar gibi sünek fiberli ve bir kısım gevrek fiber takviyeli kompozitlerde ise kısmi burkulma (local buckling) modu görülmüştür. Kısmi burkulma modu metallerin hasar modlarıyla benzerlik göstermiştir. Kısmi burkulma modunun görülmesi için, fiber yada matris veya her ikisinin de akma sınırına gelmesi gerektiği belirtilmiştir.

Hull [61], aşamalı kırılmayı fiber yayılması (splaying) ile eğilmesi (bending), fiber splaying ile eksenel ayrılma (tearing) ve mikro parçalanma olarak sınıflandırmıştır. fiber splaying ile bending, Farley ve Jhons'un tabaka eğilmesi modu ile benzerlik göstermektedir. Fiber splaying ile eksenel tearing modu, bazı katmanların dışa bazılarının içe bükülmesiyle ve bu katmanların yaprak şeklinde yırtılmalarıyla karakterize edilmiştir. Fiber splaying in her iki biçiminde de debris kamasının, içe ve dışa bükülen katmanlar arasında ve ön tarafta olduğu belirtilmiştir. Kompozitin toz veya küçük parçacıklardan oluşması durumunda, bu olay mikro-parçalanma olarak tanımlanmıştır.

Hull [63], kare kesitli gevrek kompozit tüpler için üç farklı hasar modunu belirtmiştir. Bu modlar kolayca önlenebilen; Euler bükülmesi, kabuk bükülmesi ile aşamalı katlanma ve gevrek kırılmalardır. Gevrek kırılma modu daha sonra katastropik hasar olarak sınıflandırılmış, Aşamalı kırılma (progressive crushing) ise yayılma (splaying) ve parçalanma (fragmentation) olarak sınıflandırılmıştır.

Parçalanma, ezilme ve ardından yapının iç ve dış kenarının süreksiz küçük parçalara ayrılması şeklinde karakterize edilmiştir.

Yapılan bir diğer çalışmada karbon, cam, Kevlar ve hibrit (birden fazla fiberden oluşan sistemler) fiber kompozitlerin tümü enerji sönümleme kabiliyetleri açısından incelenmişlerdir. Karbon fiber kompozitler genellikle benzer fiber dizilişine sahip cam veya kevlar takviyeli kompozitlerden daha yüksek bir spesifik enerji sönümleme oranına sahiptir [64].

3.2.1 Katastropik hasar tipi

Katastropik hasar, iyi enerji sönümleme karakteristiği için istenmeyen bir durumdur. Bu hasar tipi; Düzlemler arası veya düzlem içi kararsız çatlak ilerlemesi oluştuğunda, uzun ve ince cidarlı yapılarda burkulma sonucunda, gevrek fiber takviyeli kompozit profillerin tabakalarının büzülmemesinden dolayı bükümün veya hasarın düzlemler arası çatlaklara bağlı olarak bir anda gelişmesi sonucunda görülür.

Çarpma maruz sistemlerde katastropik hasarın oluşması, ani bir pik yükü ve düşük bir ortalama yük değerine neden olmaktadır. Bunun sonucu olarak sönümlenen enerji miktarı çok düşük kalmaktadır. Bu ise istenmeyen bir durum olmakla birlikte, katastropik çökmeyi önlemek için yapılan ek tasarımlar ve ek yapılar, aşamalı olarak hasar gören enerji sönümleyicilerden daha ağır ve maliyetli olmaktadırlar.

3.2.2 Aşamalı hasar tipi

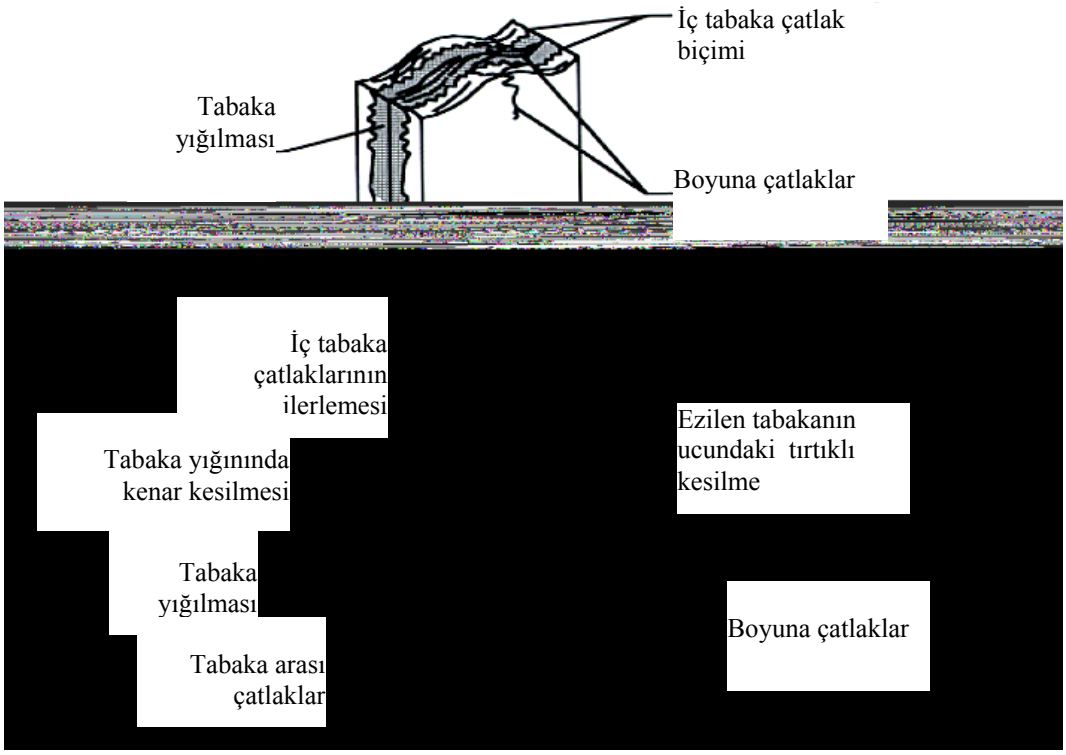
Aşamalı hasar, aşırı anlık yükler oluşmaksızın ortalama bir yük değerinin tüm deformasyon boyunca devam ederek en iyi enerji sönümleme karakteristiğinin sağlandığı hasar tipidir. Genellikle katastropik hasar karakteri sergileyen kompozit profil yapıların uç kısımlarında tetikleyici mekanizma ile gerilme yığılması oluşturularak yapının o bölgesinde özel bir noktadan hasarın başlatılması sağlanmaktadır. Hasar o bölge üzerinden kontrol edilebilir bir tarzda her bir yükleme adımında gövdeye doğru ilerlenmesi sağlanır.

Tetikleyici mekanizma pik yükünü azaltmakta akabinde kararlı bir çökmenin oluşmasını sağlamaktadır. En çok kullanılan tetikleme metotları, profilin uç kısmına pah kırılmasıdır. Diğer metotlar ise, yapının konikliği, zorlamalı olarak malzemenin geçirildiği eğimli yüzeyler ve profil yapılar üzerine açılan deliklerdir.

Aşamalı çökme ile şu avantajlar sağlanabilmektedir; aşamalı çökme ile sönümlenen enerji miktarı katastropik hasara uğrayan yapılarınkinden çok daha yüksektir. Aşamalı olarak hasar gören enerji sönümleyiciler, aynı enerji seviyesi için tasarlanan katastropik çökmeye maruz yapılardan daha hafiftir.

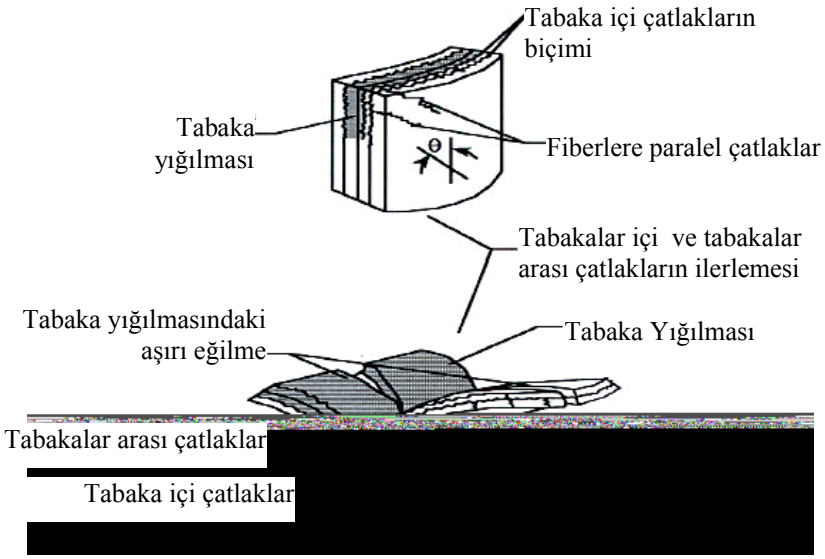
Aşamalı çökmeye maruz sistemlerde malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak oluşan dört farklı çökme karakteristiği görülmektedir. Birincisi; Enine Makaslama veya parçalanma Modu (Şekil 3.3) (Transvers shearing/Fragmentation) olup, bir veya daha çok tabakalar arası ve boyuna çatlakları olan tabaka kesitiyle karakterize edilirler. Kırılgan fiber takviyeli profillerde görülürler.

Enerji sönümleyici ana etken tabakalar arası bağların hasara uğramasıdır. Dağılma oluşumunda, fiber doğrultusunda oluşan tabakalar arası çatlakların uzunlukları tabakanınkinden daha azdırlar. Tabakalar arası çatlak oluşturma mekanizmaları ve tabaka bağı hasarları, dağılma modu kırılmalarını kontrol eden unsurlardır.



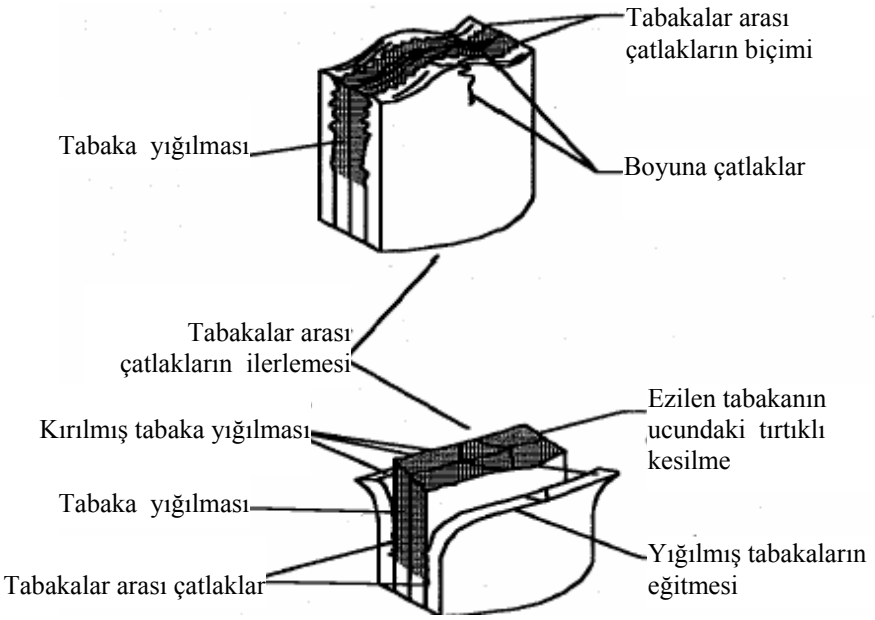
Şekil 3.3: Parçalanma modu

Tabaka eğilmesi Modu (Şekil 3.4) (Lamina Bending/ Splaying) modu ise; Fiber yönüne paralel, tabakalar arası ve tabaka içlerinde uzun çatlaklarla karakterize edilir. Tabaka bağları hasar görmez. Gevrek fiber takviyeli profillerde görülür. Enerji sönümlenme mekanizmasında ana etken, matris malzemesi içindeki çatlak oluşumlarıdır. İkinci etken ise eğilme esnasında tabakalar arası oluşan sürtünme kuvvetleridir. Tabakalar arası, tabaka içi ve fiber yönündeki çatlak oluşumları hasarı kontrol eden mekanizmalardır.



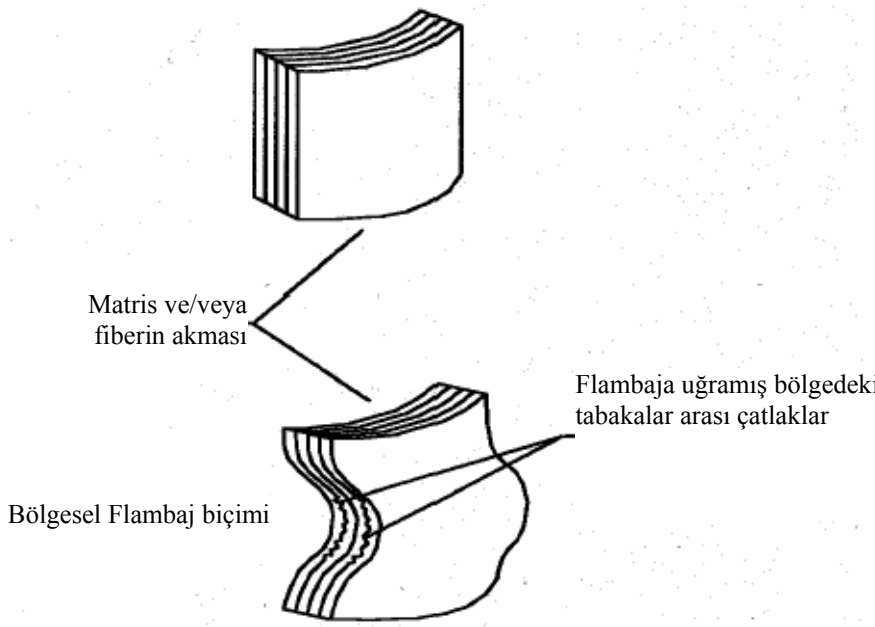
Şekil 3.4: (Tabaka) eğilme modu

Kırılgan hasar (Brittle Fracturing) modu (Şekil 3.5), dağılma moduyla eğilme modlarının bir karışımıdır. Gevrek fiber takviyeli profillerde görülür. Enerji sönümlemesindeki ana etken tabaka bağı hasarlarıdır. Gevrek kırılma oluştuğu zaman tabakalar arası çatlaklar bir kaç tabaka kalınlığı kadardır.



Şekil 3.5: Gevrek (kırılgan) hasar modu

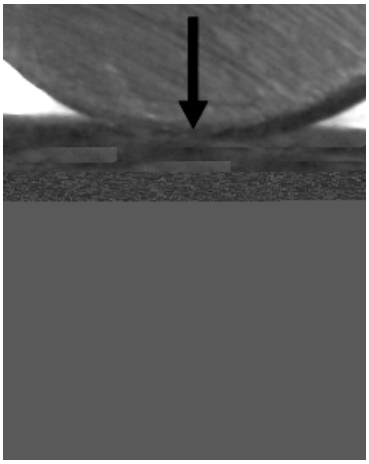
Kısmi Bükülme veya Aşamalı Katlanma (Local Buckling/Progressive Folding) hasar modu (Şekil 3.6) ise kısmi katlanmalar şeklinde oluşur. Bu mod, sünek veya gevrek her iki fiber tipinde de görülebilmektedir. Fiber ve/veya matrisin plastik deformasyon karakteristikleri hasarı kontrol eden faktörlerdir.



Şekil 3.6: Kısmi bükülme veya aşamalı katlanma

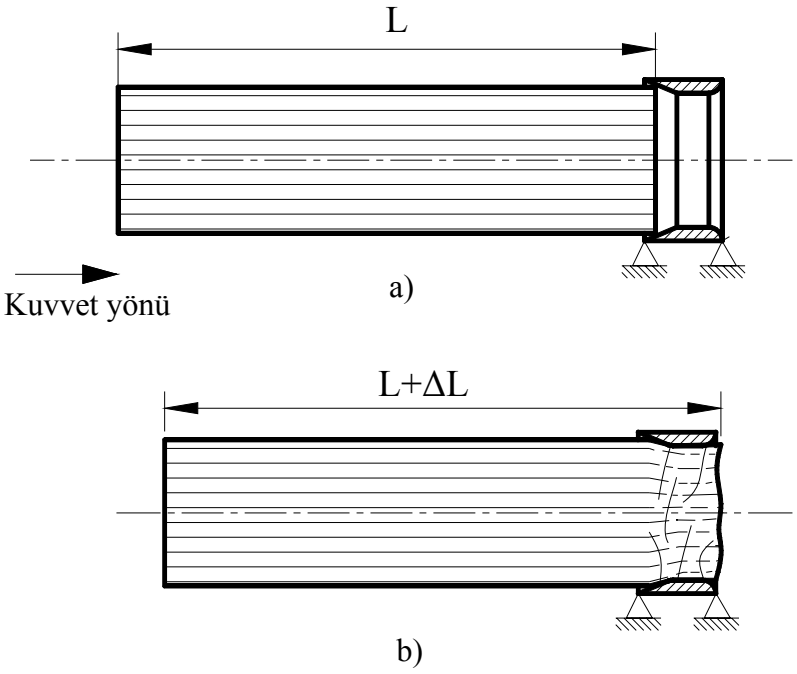
Gerek ani (katastropik) gerekse aşamalı hasar modunda olsun, en çok enerji sönümleyici hasar tipi, tabakalar arası bağların hasar görmesine veya matris malzemesini teşkil eden plastik tabanlı matris malzemesinin dağılmasına (bu aşamada nadiren kısmi fiber kopmaları gözlenebilmektedir) bağlı olarak oluşan hasar tipleridir. ayısıyla fiber malzemesinin fibere dik yönde doğrudan zorlanabildiği ve aşamalı olarak kırılabildiği bir hasar tipine rastlanılmamıştır.

Bu amaçla, fiberlerin mikro burkulmalar ile kırılması veya çubuk malzemenin başından sonuna kadar, bölge bölge çekme yönünde zorlayıcı kuvvetlere maruz tutularak fiberlerin kopması sağlanabilir. Bu amaçla yapılmış E-cam takviyeli çekme yöntemiyle imal edilmiş, dikdörtgen kesitli bir çubuğun yanal (fiber yönüne dik) kompresyona tabi tutulması halinde, sıkıştırılan kesit alanında meydana gelen çatlak Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7: Yanal sıkıştırma sonucu kesitte oluşan çatlak

Şekil 3.8' de ise eksenel yönde uygulanmış F yükü ile dar kesitten geçirilmeye zorlanan çubuk ve lif yapısında meydana gelebilecek hasarlar simüle edilmiştir.



Şekil 3.8: Fiber takviyeli kompozit çubuğun yük uygulanmasından a) önceki, b) sonraki durumu

4. DENEY TASARIMI ve ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışmasında kompozit malzemelerin SES oranını artırıcı yeni bir metot tayin edilmesi amaçlandığı için deney numuneleri olarak kullanılan kompozit çubuk malzemesine ait kimyasal ve fiziksel özellikler çalışmada kullanılan test yöntemlerinde sabit tutulmuştur. Dış faktörlerden olan geometrik boyutların enerji sönümlemeye etkisini araştırmak ve malzemelerin enerji sönümleme miktarlarının ve kırılma hasar tiplerinin tespit edilmesine yönelik olarak tasarlanmış farklı prensiplerle çalışan deneysel düzenekler mevcuttur. Statik ve yarı statik yüklemeli test düzeneklerinde, sabit bir zemin ile hareketli bir başlık arasında, deney numunesi üzerine istenilen hızda ve yüksek miktarda yük uygulanmaktadır. Bu testlerde, malzemelerin deformasyon miktarına karşı gösterdikleri reaksiyon kuvvetleri ölçülmektedir. Elde edilen ölçüm değerlerinin analitik olarak analiz edilmeleri sonucunda test süresince sönümlenen enerji miktarı ve enerji sönümleme karakteristikleri tespit edilmektedir.

Uygulanmakta olan bir diğer yöntem ise; malzemelerin gerçek çarpma koşullarındaki davranışlarının tespit edilmesine yönelik olarak hazırlanmış dinamik yüklemeli testler olup cismin deformasyon miktarına karşılık reaksiyon kuvvetleri tespit edilmektedir. Bu testlerde test numunesi, hız kazandırılmış kütleye sahip bir cisim ile rijit zemin arasında deforme edilmektedir. Bir diğer dinamik yüklemeli yöntem ise; aralarına sönümleme elemanı konulmuş ve hız kazandırılmış serbest kütleli iki cismin çarptırılarak, çarpışma öncesi, esnası ve sonrasındaki zaman ve hız gibi verilerinin momentum yasalarına göre incelenmesidir. Bu yöntemde, kinetik enerjiye sahip birinci cismin, durur vaziyetteki ikinci bir cisim ile çarpışması sonucu değişen hız bilgileri incelenmektedir. Çarpışma öncesinde cisimlerin sahip oldukları toplam kinetik enerji miktarıyla, çarpışma sonrasındaki toplam kinetik enerji miktarı arasındaki fark sönümlenen enerjiye eşit olmaktadır. Bu metot geçerli bir metot olmasına rağmen literatürde bu yöntemle çalışır bir düzeneğe rastlanmamıştır.

Bu deneysel çalışmanın amacına yönelik olarak, yarı statik ve dinamik yükleme şartlarının sağlanması amacıyla iki farklı test düzeneği hazırlanmıştır. Yarı statik yüklemeli testlerde, itici kuvvetlerin oluşturulması amacıyla standart bir hidrolik pres kullanılırken, dinamik yüklemeli testleri gerçekleştirmek için çift kollu sarkaç prensibine sahip bir deney düzeneği projelendirilerek inşa edilmiş ve testler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Kompozit Malzeme Seçimi ve Test Numunelerinin Hazırlanması

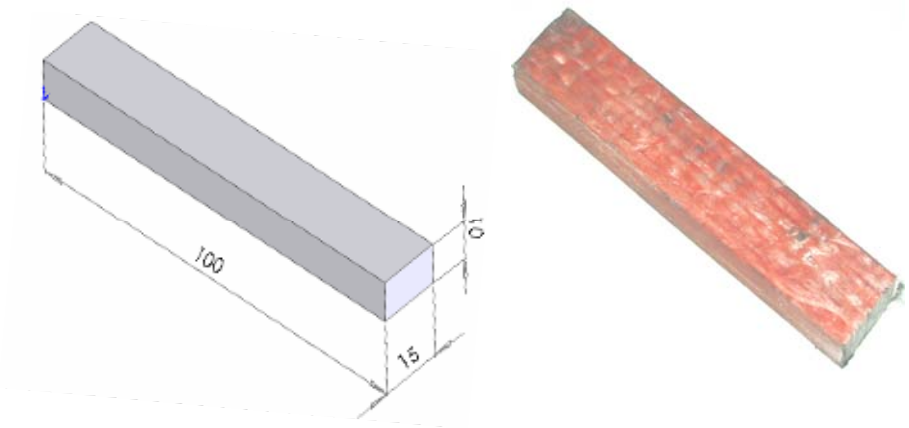
Deneylerde pultrusyon metoduyla üretilen kompozit çubuk malzemeler kullanılmıştır. Deney amaçlı kullanılan kompozit malzeme numuneleri, üretici bir firmadan temin edilmiştir. Deneyde kullanılan malzemeler ilgili firma tarafından iç ve dış piyasaya sürülen tanımlı bir malzemedir. Kompozit malzeme içerisinde, matris malzemesi olarak termoset tabanlı polyester malzeme kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak E-Cam Fiber malzemesi kullanılmıştır. Numunelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri yarı statik ve dinamik yüklemeli test numunelerinin hepsinde aynı tutulmuştur. Kompozit malzeme bileşenlerine ait firma katalog bilgileri Tablo 4.1'de belirtilmiştir.

Tablo 4.1: Kompozit çubuk malzemelerin mekanik özellikleri

Yapı Türü	Yoğunluk (gr/cm^3)	Elastiklik Modülü (GPa)	Poison Oranı (ν)
Matris (Polyester)	1.35	3.3	0.38
Fiber (E-Cam)	2.56	70	0.22
Kompozit Malzeme	1.80	E_1: 39.0 E_2: 9.6	0.27

4.1.1 Yarı statik kıvırma testi numune geometrisi

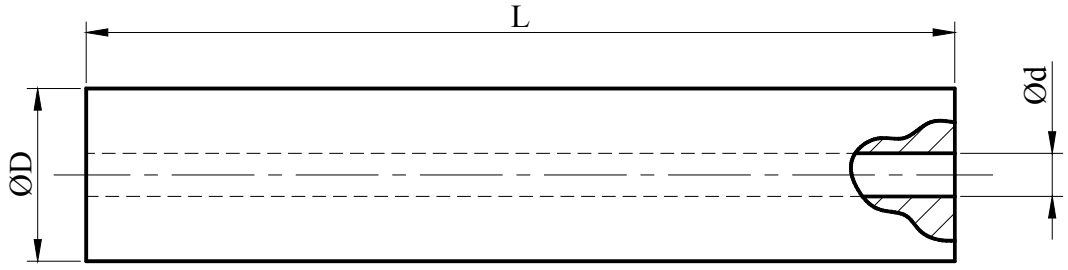
Üretici firmadan temin edilen deney numuneleri, Şekil 4.1. de verilen ölçülerde hazırlanmışlardır. Bu numune geometrileri kıvırma metodunda deformasyona tabi tutulacakları için dikdörtgen kesitli olarak 100 mm boyunda hazırlanmıştır



Şekil 4.1: Yarı statik kıvırma testi için a) numune geometrisi, b) hazırlanmış örnek numune

4.1.2 Dar kesit yöntemi için hazırlanmış numune geometrisi

Tedarikçi firmadan uzun boylarda temin edilen numunelerin, önce dış yüzeyleri hassas tornalanmak suretiyle yüzeyinde kaplı olan hasır tabaka temizlenmiştir. Dış çapları istenilen ölçüye getirilen numuneler 100 mm'yi geçkin olarak kesilip alın tornalama ile alın yüzeyleri temizlenerek tam boylarına getirilmiştir. Numuneler, içi delikli ve deliksiz olarak hazırlanmışlardır. Son alın tornalama işlemi esnasında, delikli olması gereken numunelerin delik delme işlemleri yapılmıştır. Delikler numunenin tam boyu için açılmıştır. Numunelere ait geometrik faktörler ve hazırlanılan numuneler Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sırasıyla gösterilmektedir.



Şekil 4.2: Dinamik test için deney numunesi geometrisi

Şekil 4.3: Dar kesit yöntemi için hazırlanmış örnek deneysel çalışma numuneleri

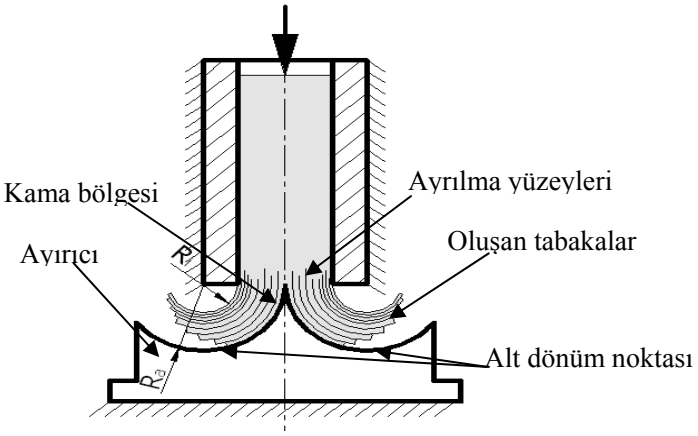
4.2. Yarı Statik Yüklemeli Deneysel Çalışma

Yarı statik testler, rijit bir zemin ile sabit hızda hareket eden başlık arasında numunelerin deforme edilmesi prensibiyle uygulanmışlardır. Yarı statik yükleme altında deney numunelerine ait reaksiyon kuvveti değişimi ve deformasyon karakteristiklerinin tespit edilmesi için, numuneler hazırlanmış, deneysel ekipmanlar kurularak algılayıcıların kalibrasyonu yapılmış, veri edinimi amacıyla kullanılmak üzere test programı yazılmıştır. Kıvırma test yöntemi ve dar kesit yöntemine uygun kalıp ve nozullar hazırlanarak yarı statik testler gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Kıvırma test yöntemi ve test aparatlarının hazırlanması

2005 yılında Mamalis ve diğerlerinin [23] yaptıkları çalışmayla literatürde Kıvırma Testi Yöntemi "Curling Test Method" olarak tanımladıkları deneysel bir metot, kare kesitli hazırlanmış numune çubukların enerji sönümleme karakteristiklerinin bulunması amacıyla kullanılmıştır. Bu test metodu, prensip itibariyle dikdörtgen kesitli tabaka veya çubuk malzemelerin zorlamalı olarak eğimli bir kanaldan geçirilip tabaka ayrılması moduna tabi tutulmalarına dayanmaktadır (Şekil 4.4).

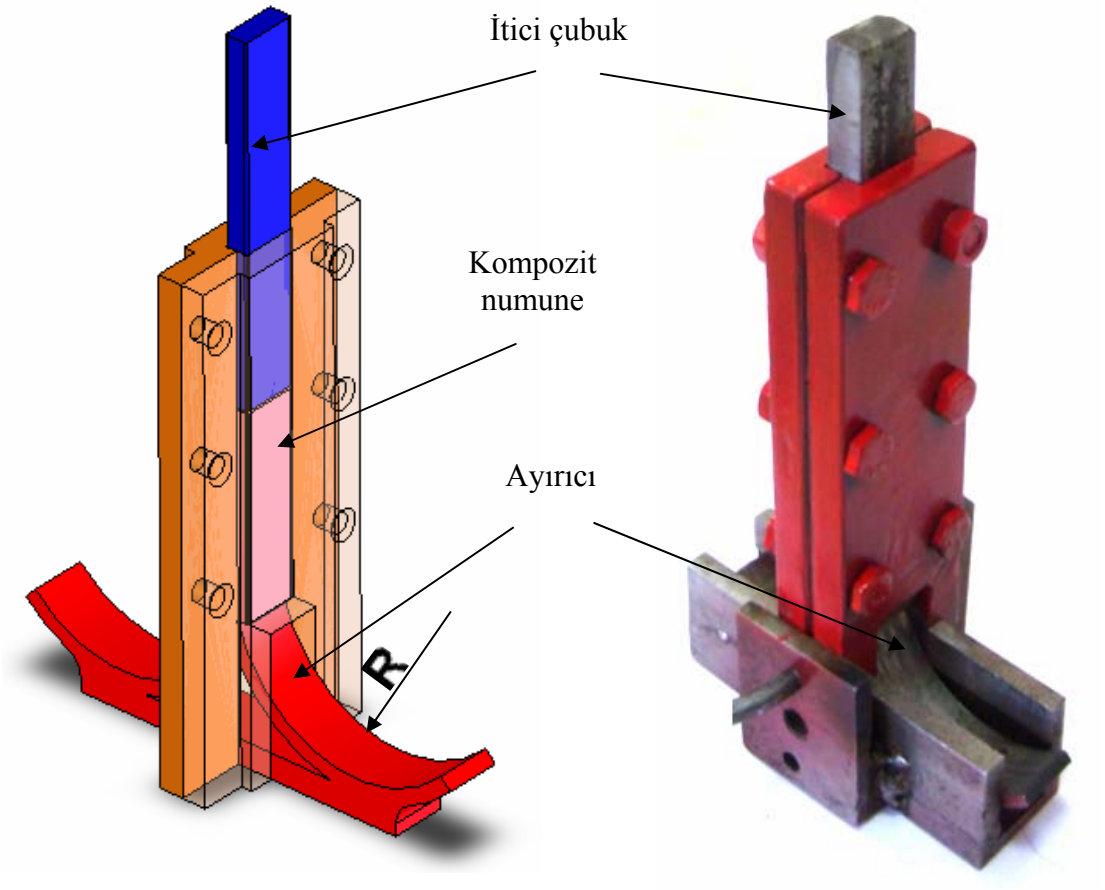
ması moduna tabi tutulmalarına dayanmaktadır (Şekil 4.4).
ması moduna tabi tutulmalarına dayanmaktadır (Şekil 4.4).
ması moduna tabi tutulmalarına dayanmaktadır (Şekil 4.4).
moduna tabi tutulmalarına dayanmaktadır (Şekil 4.4).
bi tutulmalarına dayanmaktadır (Şekil 4.4).
arına dayanmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: Kalıp içinde kompozit numunenin tabakalara ayrılması

Test numunesi, deforme olması esnasında bir reaksiyon kuvvet oluşturmaktadır. Malzemenin oluşturduğu ortalama reaksiyon kuvvetinin, çubuğun bu reaksiyon kuvvete maruz kalan kısmı boyunca (etkin boy) etkidiği düşünülerek yapılan iş miktarı tespit edilmektedir. Yapılan iş, malzemenin sönümlediği enerji olarak alınır. Deformasyon için harcanılan enerjinin, deforme olan çubuğun ağırlığına bölünmesiyle malzemeye ait spesifik enerji sönümleme oranı hesap edilmektedir.

Yarı statik yüklemeli kıvırma testi yönteminde, kompozit numunelerin deforme edilmesi amacıyla, hazırlanmış, hidrolik pres sisteminde kullanılan, farklı büküm yarıçapına (R) sahip tabaka ayırıcı aparatların takılabildiği deneysel ekipman Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Literatüre ek olarak bu sistemde büküm yarı çapının da sönümlemeye etkisini de incelemek ve en yüksek sönümleme miktarını tespit etmek için R büküm yarıçapı 8 mm, 12 mm, 16 mm ve 25 mm olarak değiştirilmiştir.

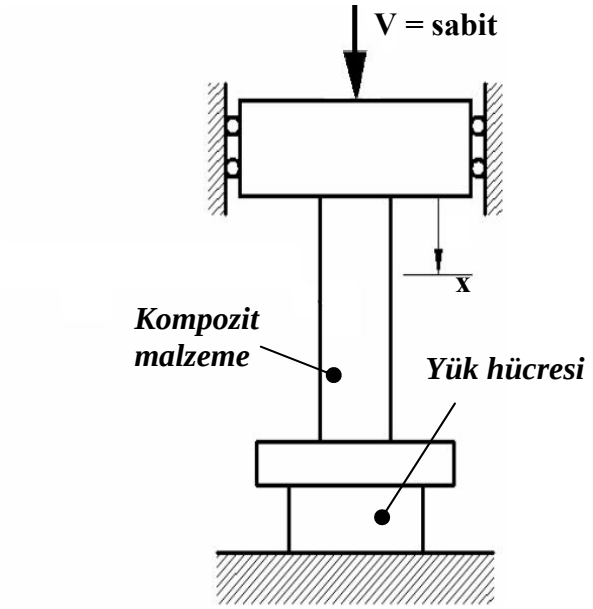


Şekil 4.5: Yarı statik kıvırma testi için hazırlanmış kalıp

Yarı statik yükleme altında malzeme, yolluk boyunca ilerlemektedir. Böylece malzeme, ayırıcı sisteme temas ettiği andan itibaren reaksiyon kuvvet oluşmaya başlamaktadır. Malzeme kama etkisiyle ikiye bölündükten sonra, eğimli kanaldan ilerledikçe, R büküm yarı çapına bağlı olarak bir çok tabakaya ayrılmaktadır.

4.2.2 Yarı statik yüklemeli test düzeneğinin hazırlanması

Yarı statik yüklemeli test sistemleri, teste tabi tutulan malzemenin, yükleme hızının (çene hızı veya itici hızı) test numunesinin boyuna oranı olan deformasyon oranının (έ) miktarına göre belirlenmektedir. Yarı-statik testler, yükleme hızının ($\acute{\varepsilon}<10^{-3}$ [7, 25,50]) çok düşük olduğu statik test koşullarına kıyasla, numunenin daha hızlı yüklendiği test koşullarında ($10^{-3}<\acute{\varepsilon}<10^{-1}$ sn^{-1} [36,41,44]) uygulanılan yöntemdir ve test esnasında tutucu başlığın ilerleme hızı sabit tutulmaktadır. Bu yöntemle malzeme yüklenmesini gösteren prensip şeması Şekil 4.6'da görülmektedir.

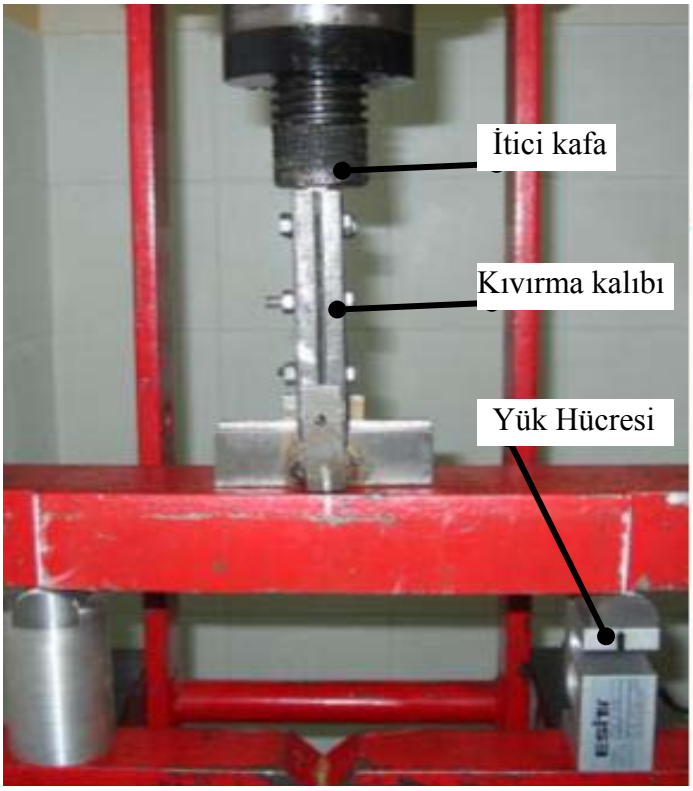


Şekil 4.6: Yarı statik yükleme ünitesinin şematik gösterimi

Yarı statik yükleme testleri, Şekil 4.7 'te görülen 250 KN kapasiteli bir hidrolik pres ünitesiyle gerçekleştirilmiştir. Presin başlık ilerleme hızı ve başlık baskı kuvveti gibi değişkenler kontrol edilebilmektedir. Bu amaçla hidrolik kontrol elemanları kullanılarak hidrolik pres sistemi yeniden düzenlenmiştir. Hidrolik presin baskı kafasının ilerleme hızı akış kısma valfi ile 0-100 mm/dk hız aralığı içerisinde ayarlanabilmektedir. Aynı şekilde presin yük miktarının ayarlanabilmesi için de basınç ayar valfi pres üzerinde konuşlandırılmıştır. Yapılan yarı statik yüklemeli testlerde pres başlık ilerleme hızı 50 mm/dk ($\dot{\varepsilon}$ = 1.6E-2 s^{-1}) olarak ayarlanmış ve pres tam yük kapasitesinde çalıştırılmıştır.

Kuvvet ölçümleri, farklı ölçme aralıklarına sahip TCS1000 (10 KN kapasitesinde) ve TCS5000 (50 KN Kapasitesinde) model ESİT marka iki farklı yük hücresi tarafından ölçülebilmektedir (Şekil 4.8). Yük hücresi veri toplama ünitesine transmitter (sinyal yükseltici) aracılığıyla analog çıkış verebilecek şekilde bağlanmaktadır. Ayrıca doğrusal ilerlemenin ölçülebilmesi amacıyla, bir adet LS406 model Haidenhain marka, 0.001 mm ilerleme adımına sahip, eklemeli (incremental) lineer enkoder kullanılmıştır.

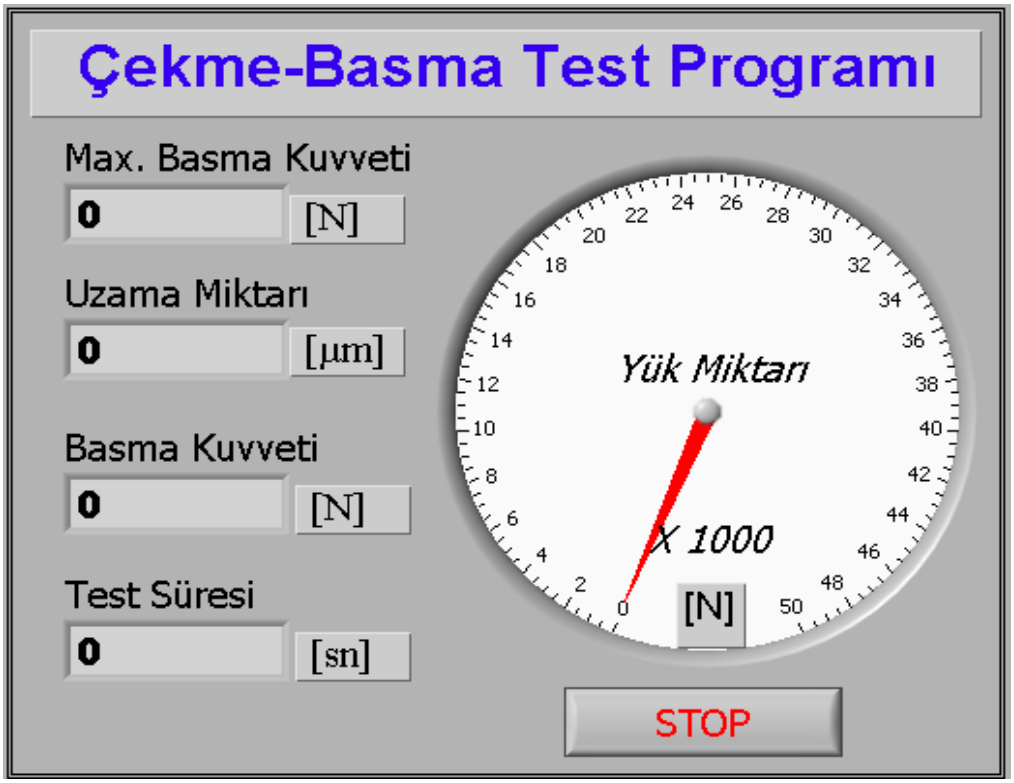
Şekil 4.7: Yarı statik yükleme ünitesi: hidrolik presin genel görünümü



Şekil 4.8: Yarı statik yükleme ünitesinde yük hücresi ve kıvırma kalıbının yerleştirilmesi

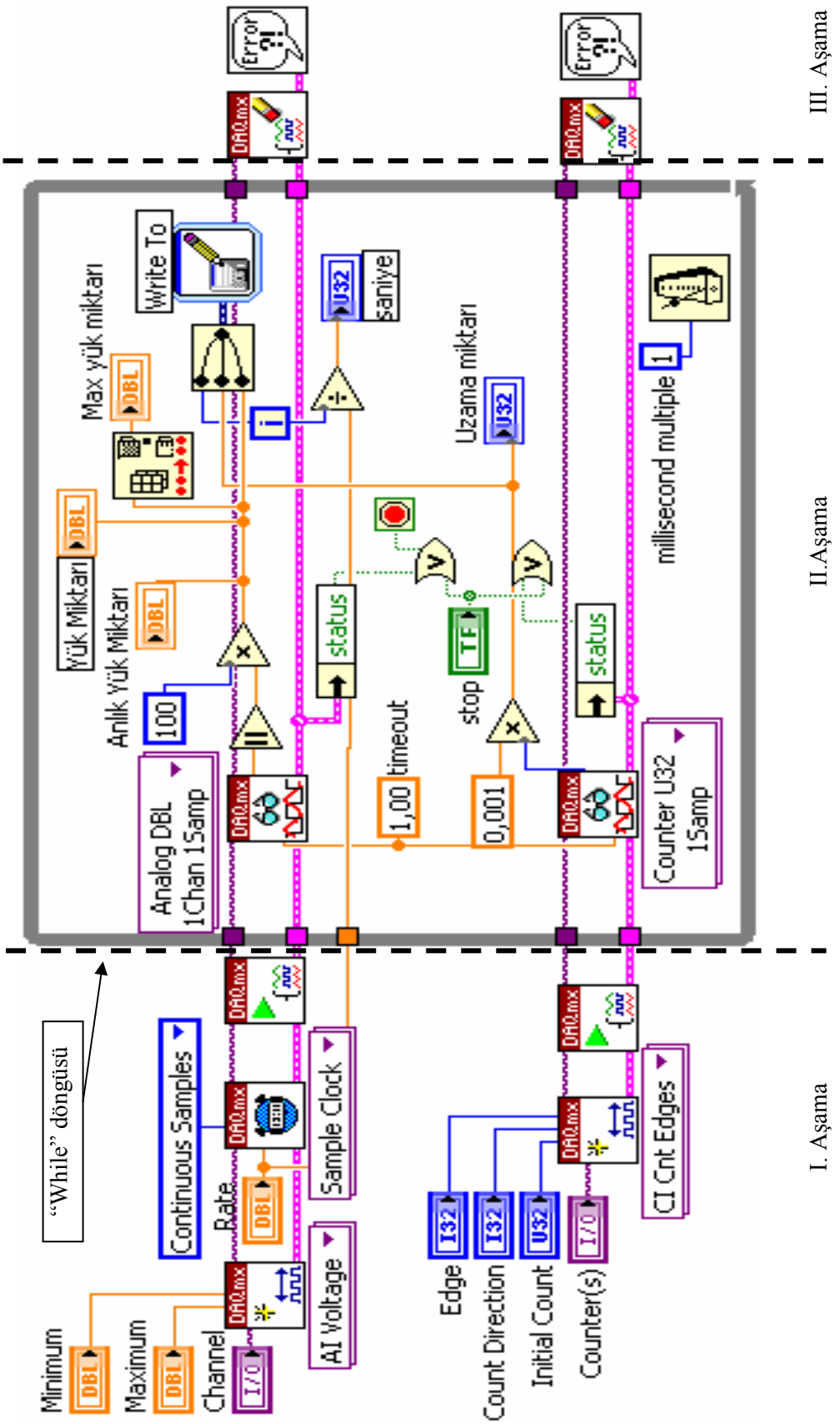
Kuvvet ölçümleri, farklı ölçme aralıklarına sahip TCS1000 (10 KN kapasitesinde) ve TCS5000 (50 KN Kapasitesinde) model ESİT marka iki farklı yük hücresi tarafından ölçülebilmektedir (Şekil 4.8). Yük hücresi veri toplama ünitesine transmitter (sinyal yükseltici) aracılığıyla analog çıkış verebilecek şekilde bağlanmaktadır. Doğrusal ilerleme miktarı ise bir adet LS406 model Haidenhain marka, 0.001 mm ilerleme adımlı, inkremental lineer enkoder ile ölçülmüştür.

Yük hücresinden gelen 0-10 V arasında değişen analog sinyal ile enkoderden gelen 0-5 volt kare dalga sinyaller, 8 adet analog sinyali giriş kanalına ve 1 adet sayıcı kanalına sahip NI USB-6009 model National Instruments firmasına ait veri toplama kartı kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu amaçla National Instruments firmasına ait LABVIEW yazılımı kullanılarak, bir veri toplama programı yazılmış, bu program karta gelen verilerin bilgisayara aktarılması amacıyla kullanılmıştır. Yazılan test programına ait kullanıcı ara yüzü olan ön panel Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Programın işleyiş ve akışının düzenlendiği ve yapılandırıldığı blok diyagram kısmı ise Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9: Yarı statik test düzeneği için hazırlanmış programa ait kullanıcı ara yüzü

Test programlarının hazırlandığı LABVIEW programı, farklı görevlere sahip unsurların eklentili olarak şematik bir yapıda ilişkilendirilmeleri yöntemiyle çalışmaktadır. Kullanılan unsurların her birisi, yine başka alt unsurlardan oluşturulmuştur. Bu unsurların ilişkilendirilmesi belli bir hiyerarşi içerisinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.10'da unsurlar arası bağlantıların kurulduğu ve Şekil 4.9'deki ara yüze ait objelerin bu unsurlarla ilişkilendirildiği blok diyagram tümüyle verilmektedir. Blok diyagram içerisinde üç aşamalı bir kurgu mevcuttur. Birinci aşamada, veri toplama kartında kanalların açılması ve örnekleme hızı tipi vb parametrelerin girilmesi işlemleri ilk start komutuyla birlikte başlatılmaktadır. ikinci kısımda ise "while" döngüsü çalıştırılmakta, döngü içerisindeki her bir çevrim için, kanaldan verinin okunması, gösterilmesi ve yazdırılması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada veriler zaman-deplasman-kuvvet sıralamasıyla sütunlar halinde her bir örnekleme zamanı için ise satırlar şeklinde yazdırılmaktadır. Üçüncü aşamada ise, ara yüzde "STOP" tuşuna basılmasıyla birlikte; yazdırma dosyası kapatılmakta kart kanal bilgileri resetlenmekte ve programın çalıştırılmasına son verilmektedir. Şekil 4.9'da verilen ara yüzde ise, test verilerinden uzama miktarı, uygulanan basma kuvveti, test süresi ve test süresince oluşan maksimum yük değeri ara yüzde gösterilmektedir.



Şekil 4.10: Yarı statik test düzeneği için hazırlanmış programa ait blok diyagram

4.3. Dinamik Yüklemeli Deney Düzeneğinin Hazırlanması

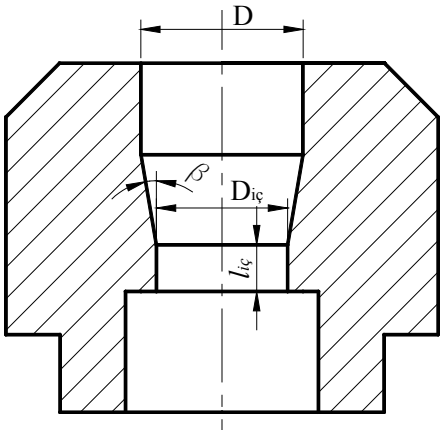
Kompozit çubuk malzemelerin gerçek çarpışma karakteristiklerini tespit edebilmek için yüksek hızda deformasyona tabi tutulmaları gerekmektedir. Özellikle yüksek deformasyon oranına duyarlı plastik malzemeler ve plastik içeren kompozit yapılar, yükleme hızıyla orantılı olarak değişen mekanik özellikler ve enerji sönümleme karakteristikleri göstermektedirler.

Çarpışma karakteristiklerinin en doğru şekilde tespit edilmesi amacıyla farklı prensiplerle çalışan deneysel düzenekler mevcuttur. Literatürde çok sık geçen ve özellikle tabakalı kompozit yapıların darbe testlerinde çok kullanılan [47,48] çekiç düşürme gibi standart test metotlarının yanında özel amaçlı olarak, yüksek kinetik enerji ve yüksek deformasyon oranı sağlamaya yönelik test düzenekleri de vardır. Bu düzenekler; ek hidrolik donanımlar ile pres kafa hızının artırılması [28], ağır kütlelerin serbest düşme hareketiyle sabit zemine düşürülmesi [30,67-69], yine ağır kütlelerin pnömatik iticilerle tahrik edilen yatayda konumlanmış raylı veya arabalı sistemlerle rijit duvara çarptırılması [8,13], üzerine kütle eklenebilen tek kollu bir sarkaç düzeneğinde, kolun açılarak yatay konuma getirilip daha sonra serbest düşme sonucu sabit duvara çarptırılması [70] gibi prensiplerle çalışmaktadırlar. Düşürmeli tip ile sarkaç kollu tip düzeneklerde kütle miktarı ve ağırlığın kaldırıldığı yükseklik mesafesi ayarlanarak istenilen miktarda kinetik enerji ve deformasyon hızı sağlanabilmektedir.

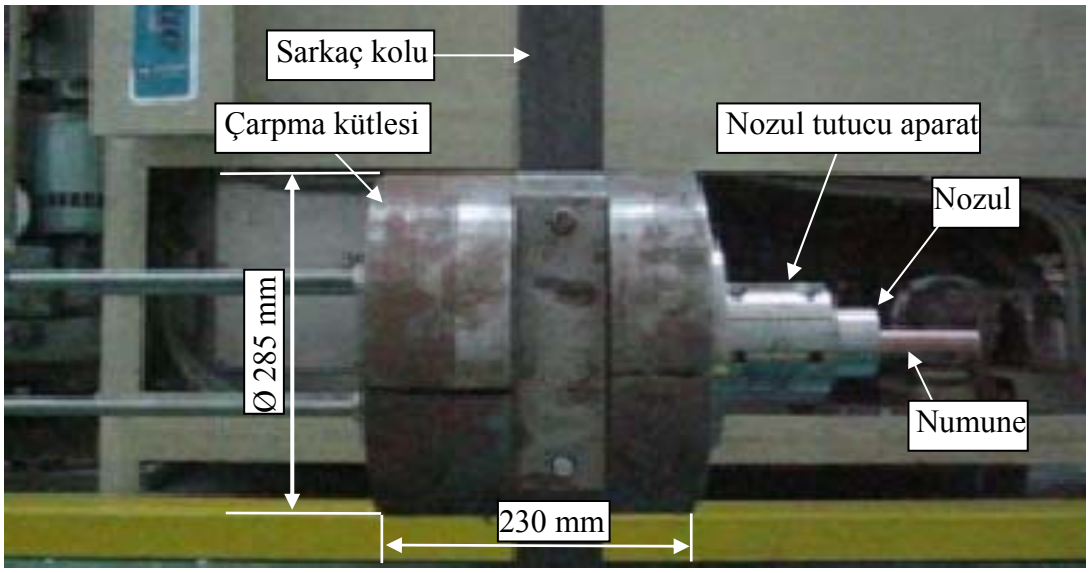
Bu çalışmada dinamik yüklemeli testlerde, yarı statik testlerde kullanılan malzeme özellikleriyle aynı özelliklere sahip numuneler, yüksek deformasyon hızlarında ($\dot{\varepsilon} \approx 80 \ s^{-1}$) yüksek darbe kuvvetlerine maruz bırakılmışlardır. Bu amaçla, dinamik yüklemeli deneylerde kullanılmak üzere dar kesit testlerinde kullanılacak nozullar hazırlanarak imal edilmişlerdir. Dinamik yükleme şartlarının sağlanması amacıyla çift kollu sarkaç prensibine dayalı test düzeneği tasarlanmış ve inşa edilmiştir. Test düzeneği ile elde edilen verilerin, çarpışma ve momentum denklemleriyle işlenmesi sonucu, numune konfigürasyonlarına ait enerji sönümleme karakteristikleri hesaplanabilmektedir.

4.3.1 Dar kesitli test kalıplarının hazırlanması

Kalıpların imalatında Asil Çelik Ltd. Şti. tarafından üretilen 4140 alaşımlı çelik malzeme kullanılmıştır. Kalıbın boyutlandırılmasında, malzemenin geçirileceği kalıp iç delik çapı ($D_{iç}$) ve kalıp iç delik boyu ($l_{iç}$) ile kalıp delik girişindeki koniklik açısı (β), kalıptaki değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Kalıp iç yüzeyleri hassas tornalanmıştır. Yapılan testlerde kullanılan çelik nozullara ait genelleştirilmiş yapım resmi Şekil 4.11'de verilmiştir.



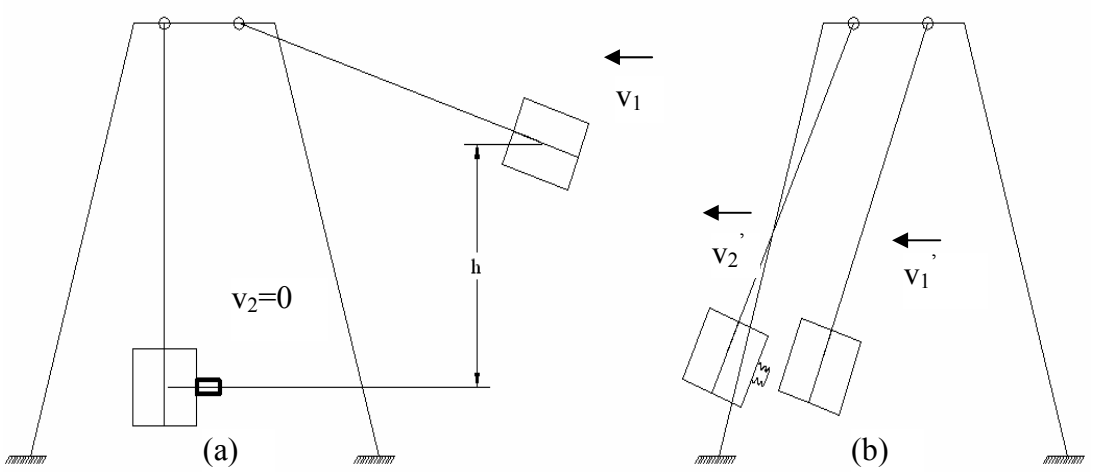
Bu test metodu için, kompozit numunelerin deforme edilmesi amacıyla hazırlanmış, çarpma test sisteminde kullanılan numune bağlantı aparatları Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12: Çarpma test düzeneğinde malzeme tutucu aparat

4.3.2. Çift kollu sarkaç ünitesinin tasarımı ve kurulması

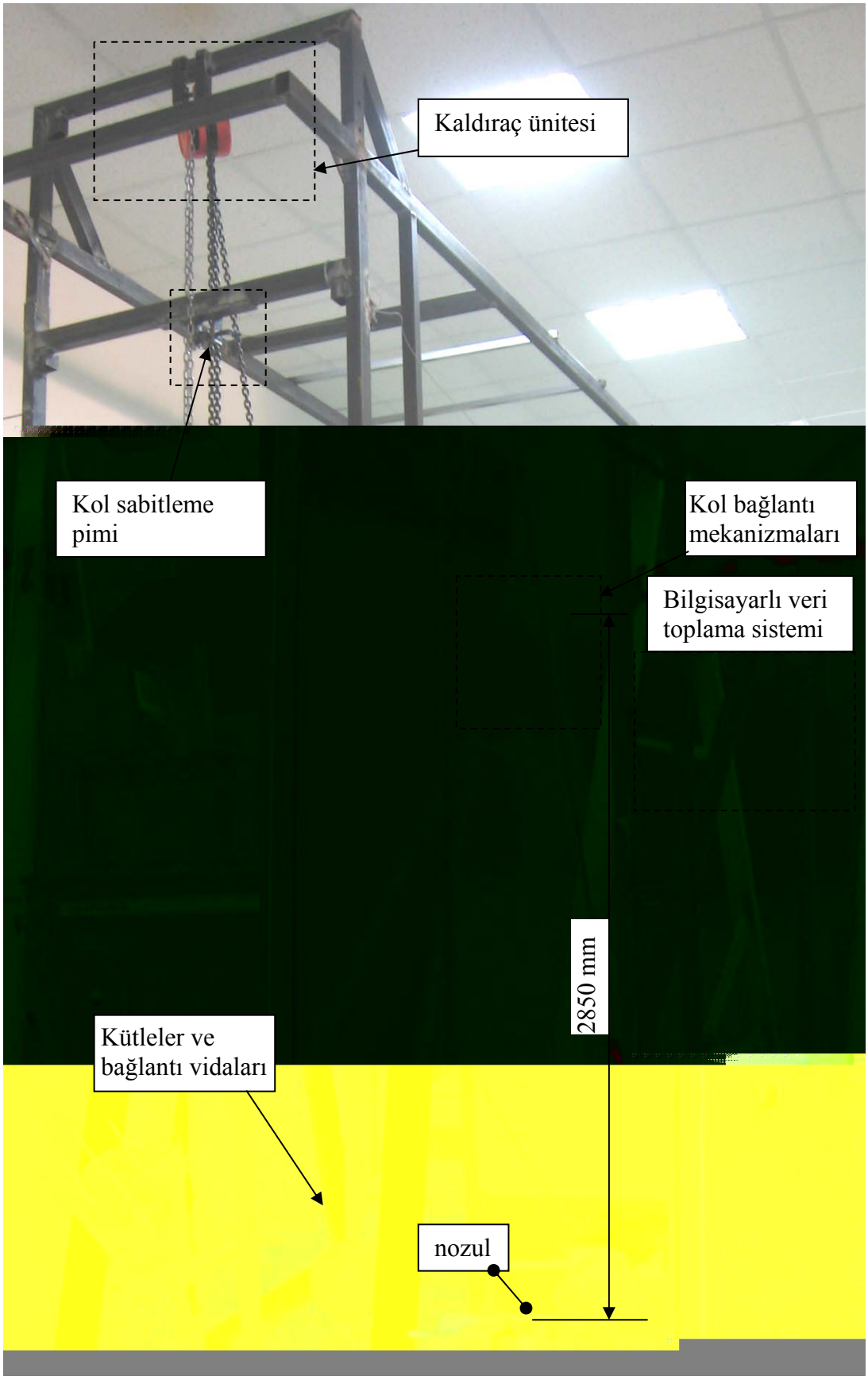
Malzeme davranışını etkileyen dinamik yüklemeleri gerçekleştirebilmek amacıyla iki kollu sarkaç sistemi kurulmuştur. Sistem, potansiyel enerjiyi kinetik enerjiye çevirmekteki üstünlüğünden ötürü tercih edilmiştir. Ayrıca, kaldırma yüksekliği ve kütle miktarının ayarlanabilir olması nedeniyle geniş bir enerji yüklenme potansiyeline sahiptir. Bu sistem sadece kompozit çubuklar için değil metal malzemelerin de test edilebilirlikleri için ideal bir sistemdir. Yarı statik yükleme prensibine nazaran, bu sistem ile çarpışma testlerinin gerçekçi bir biçimde simüle edilebileceği daha açıktır. Dinamik yükler altında kompozit çubukların enerji sönümleme özelliklerinin tespit edilmesi için tercih edilen sarkaç tip çarpışma deney düzeneğine ait şematik gösterim Şekil 4.13'de gösterilmektedir.



Şekil 4.13: Sarkaç tip çarpışma test düzeneği şematik görünümü; a) İlk konum, başlangıç enerjisi, b)Çarpışma sonrası kütlelerin farklı hızlanma durumu

Şekil 4.13'de görüldüğü gibi sarkaç kolunun kaldırıldığı yüksekliğe ve sarkaç kütlelerine bağlı olarak ilk enerji miktarı ve çarpma hızı ayarlanabilmektedir. Sarkaç mekanizmasında kol hızlarının tespiti iki yöntemle mümkündür; Birincisi, kolların anlık açısal konumları tespit edilerek zamana göre değişimleri tespit edilebilir. İkinci yöntem; kolların anlık konumlarının bir görüntü birimi tarafından kaydedilerek bilgisayar ortamında işlenmesi suretiyle tespit edilebilir [70].

Kurulan bu deney düzeneğinde birinci yöntem olan kolların anlık konumlarının tespit edilmesi prensibi uygulanmıştır. Konum sensörlerinden gelen anlık konum bilgileri, veri toplama kartı ile bilgisayara aktarılırken anlık zaman bilgisi ile eşlenik olarak yazdırılmaktadır. Daha sonra veri işleme amacıyla hazırlanan programlarla bu konum-zaman bilgileri, her iki kol için hız-zaman, enerji-zaman, enerji-konum, kuvvet-zaman, kuvvet- konum bilgilerine dönüştürülebilmektedir. Bu amaçla kurulan ve birinci yönteme uygun olarak hazırlanılmış deneysel düzenek Şekil 4.14'te verilmiştir.

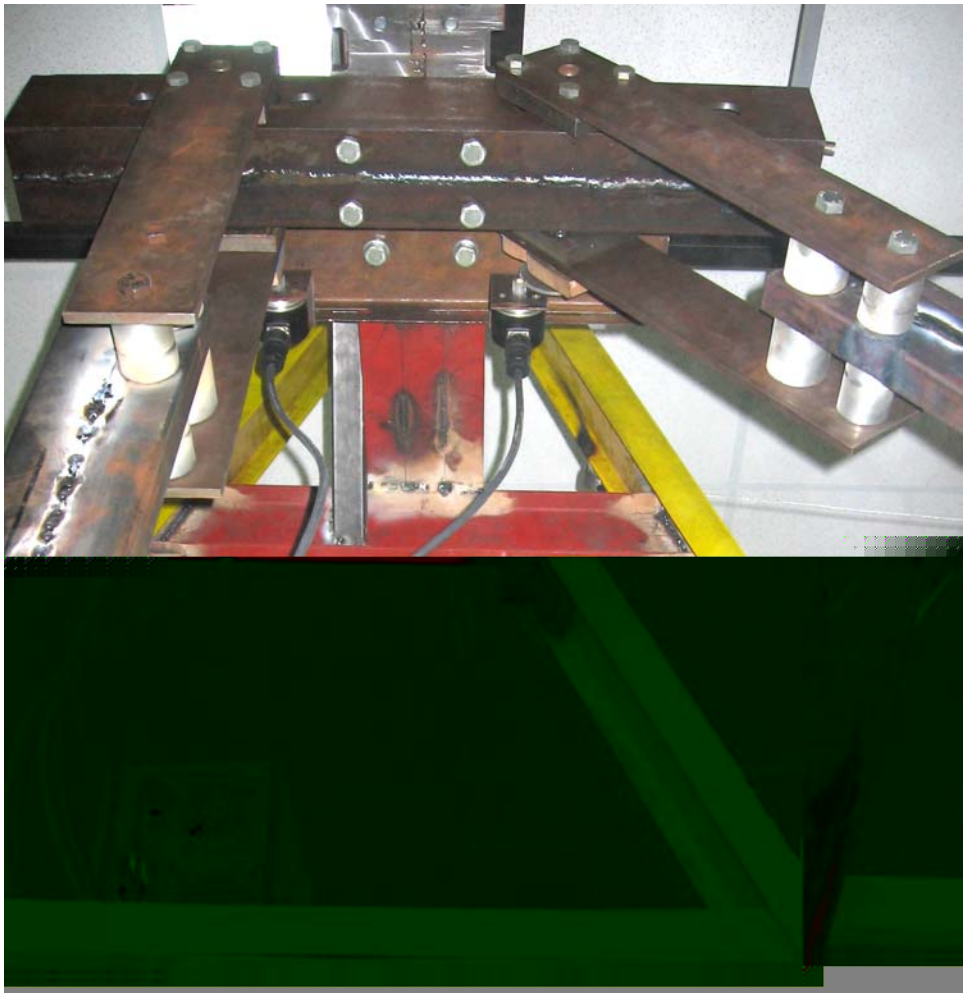


Şekil 4.14: Çift kollu sarkaç tipi çarpma deney düzeneği

Sistemde kol bağlantı mekanizması, parça uzunluğuna bağlı olarak, kol-gövde bağlantısını sağlayan döner mafsalların eksenel mesafelerini ayarlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Konum bilgisini belirlemek amacıyla, 2 adet Haidenhain Marka ROD460 model, 3600 puls/devir çözünürlükte, sinüs dalga üreteçli, mutlak enkoder kullanılmıştır. Algılayıcıların gövdeleri sarkaç sisteminin gövdesine sabitlenmiştir. Şekil 4.15 montaj aşamasındaki kol-gövde ara bağlantısını, Şekil 4.16 konum algılayıcıları ile kol bağlantısını ve Şekil 4.17 ise kol-gövde ara bağlantı elemanının ana gövde ile montaj edilmiş halini göstermektedir. Enkoder döndürme milleri, sarkacın kollarına 6:1 çevrim oranına sahip dişliler ile bağlanmış, böylece konum bilgisinin daha hassas alınması sağlanmıştır.

Şekil 4.15: Kol ile gövde bağlantısını sağlayan ara elemanlar

Şekil 4.16: Konum algılayıcı ile sarkaç kolu bağlantısı



Şekil 4.17: Sarkaç kollarının ana gövde üzerine montajı

Böylece, sarkaç kolunun kendi ekseni etrafında atacağı bir tam tur (2π) için oluşacak darbe sinyal sayısı 3600 x 6 = 21600 adettir. Bir darbe sinyalinin karşılık geleceği açısal yer değiştirme miktarı radyan cinsinden şu şekilde hesaplanabilir;

$$1 \text{ darbe sinyali} = 2\,\pi / 21600 = 2.9088E^{-4} \text{ rad.} \quad (4.1)$$

Dolayısıyla, 2850 mm kol uzunluğu yani dönme yarı çapı olması durumunda, bir darbe sinyalinin karşılık geldiği çevresel yer değiştirme miktarı (yay uzunluğu) ise milimetre cinsinden şu şekilde hesaplanabilir;

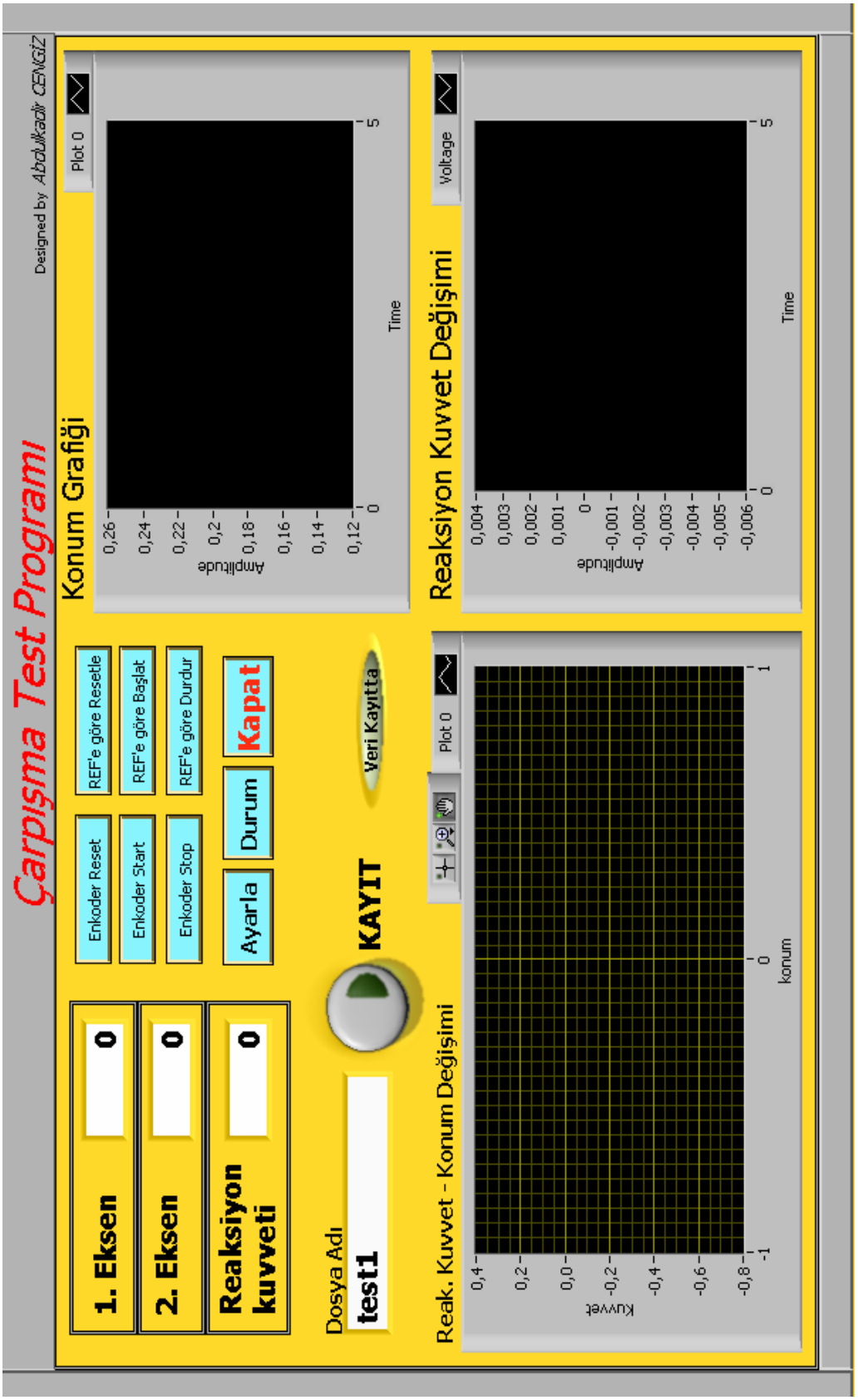
$$1 \text{ darbe sinyali} = R \times \theta = 2850 \times 2.9088E^{-4} = 0.829 \text{ mm} \quad (4.2)$$

40 kHz örnekleme hızındaki veri toplama kartından, bu örnekleme hızında okunan ve zaman bilgisiyle birlikte kayıt altına alınan toplam darbe sayıları test esnasında kayıt edilip sonrasında konum bilgisine dönüştürülmektedir. Böylece elde edilen konum verileri zamana bağlı olarak çizdirilebilmekte sonrasında konum-zaman grafikleri işlenmektedir.

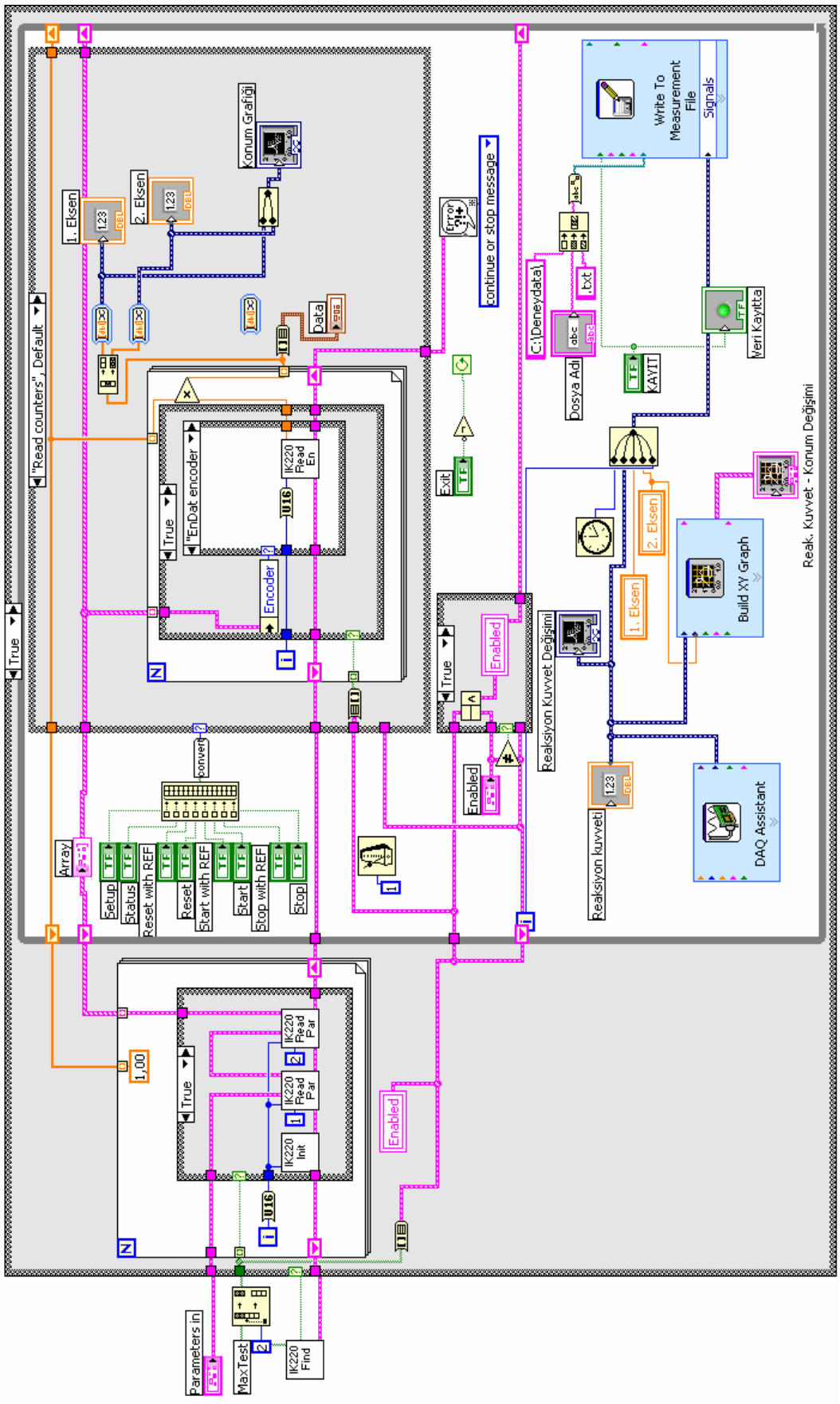
Ayrıca test esnasında elde edilen verilerden çarpışma esnasında oluşan impulsif kuvvetler hesaplanabilmesine rağmen, teorik hesaplamaların kontrolü ve çarpışma esnasında oluşan bu impulsif kuvvetlerin ölçülmesi amacıyla, TCS5000 model S tipi ESİT marka yük hücresi kullanılmıştır. 50 KN yük ölçme kapasitesine ve 3 kg hassasiyete sahip yük hücresinden alınan sinyallerin koşullanması ve filtrelenmesi amacıyla, TR2-AV model, ESİT marka analog sinyal koşullayıcı kullanılmıştır. Yük hücresi, hareketli kütle üzerine kütle merkezini eksenleyecek şekilde monte edilmiştir.

Sistemde verilerin toplanması iki farklı amaçlı veri toplama kartı tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu kartlardan birincisi enkoderden gelen sinüs dalga sinyallerini toplamak ve konum bilgisi için kullanılan Haidenhain marka, IK220 model sayıcı kart (Counter Card) olup ikincisi ise yük hücresinden alınan analog verilerin bilgisayara toplanıp kayıt edilmesi amacıyla kullanılan, National Instrumenst firmasına ait Ni-DAQ 6009 model veri toplama kartıdır. Veri toplama kartları AMD3000 işlemcili, 1GB RAM kapasitesinde olan bir PC'ye bağlanmıştır.

Verilerin toplanarak kaydedilmesi amacıyla, LABVIEW programıyla bir veri toplama yazılımı oluşturulmuştur. Yazılımda, tasarlanan ara yüz ile, dosya adı, kayıt hızı, enkoder sayısı, konum sıfırlama vb. bilgiler girdi olarak düzenlenebilmekte ve toplanan verileri gerçek zamanlı olarak görülebilmektedir. Yazılan programa ait ara yüz tasarımı ise Şekil 4.18'de, programın zeminini oluşturan ve arka planda çalışan "Blok Diyagram" kısmı ise Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.18: Programa ait kullanıcı ara yüzü



Şekil 4.19: Programa ait blok diyagram

Program, başlatıldığı ilk andan itibaren sırasıyla, kart kontrolü yapmakta, sayıcı kartın uygunluğu doğrulandığı taktirde, ara yüz vasıtasıyla girilen ve sayıcı karta ait olan; kanal sayısı, mutlak/eklemeli, sinyal tipi gibi kart parametre bilgilerini ilgili alt döngülere aktarmaktadır. Parametrelerin doğrulanması durumunda çalışan döngülerden "while" döngüsü içerisinde ikinci kart olan analog sinyal toplama kartına ait, kart doğrulama, kanal açma, kanaldaki veriyi okutma işlemleri yaptırılmaktadır. Yine aynı döngü içerisinde, "Zaman", "Kuvvet", "1.Kol konum", ve "2.Kol konum" bilgileri eşlenik (aynı satırda, sırasıyla ve yan yana) olarak anlık olarak, grafiksel ve dijit gösterimi şeklinde kullanıcı ara yüzünde gösterilmektedir. Aynı zamanda da kullanıcı ara yüzünden girilen 'Dosya Adı' tanımı ile bilgisayar katı diskine "C:\Deneydata\'*Dosya Adı*'.txt" olarak kaydedilmektedirler.

4.3.3. Dinamik yüklemeli deneysel verilerin analiz yöntemi

Deneysel verilerin analizinde ve hesaplamalarda kullanılan verilerin bir kısmı kol uzunlukları, kütleler, numuneye ait faktörler vb. gibi (her bir deney için) sisteme ait sabitler olmakla birlikte, zaman ve konum gibi bir kısmı da değişkendir. Deney sisteminde, sarkaçların kol uzunlukları 2850 mm olarak ayarlanmıştır. Her bir kol düşeydeki konumları referans alındığında her iki yöne de 90 derece hareket edebilme kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla düşey konumundan itibaren 90 derece çevrilerek yatay konuma getirilen bir kol serbest bırakıldığında 180 derece boyunca hareket edebilmektedir. Sarkacın her bir koluna kol kütlesinin haricinde olarak 40 kg ile 150 kg arasında ek ağırlık konulabilmektedir. Bu durumda bir kolun sahip olabileceği en fazla potansiyel enerji miktarı yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir;

$$Ep = m.g.h = 150 \times 9.81 \times 2.850 = 4200 \text{ J} \qquad (4.3)$$

Burada m, literatürde de uygulandığı gibi [70] kol kütlesi ve kola asılan disk(ler)in kütlelerinin toplamıdır. Her iki kolunda kaldırılması ve karşılıklı olarak serbest bırakılmaları durumunda, sistemin sahip olabileceği enerji miktarı yaklaşık 8.5 kj'a kadar çıkabilmektedir. Serbest bırakılan kol için, bırakıldığı andan itibaren potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesinden dolayı kolun düşey konuma gelmesine kadar sürekli hızlandığı ve bu hızın kol düşey konumdayken en yüksek seviyesine

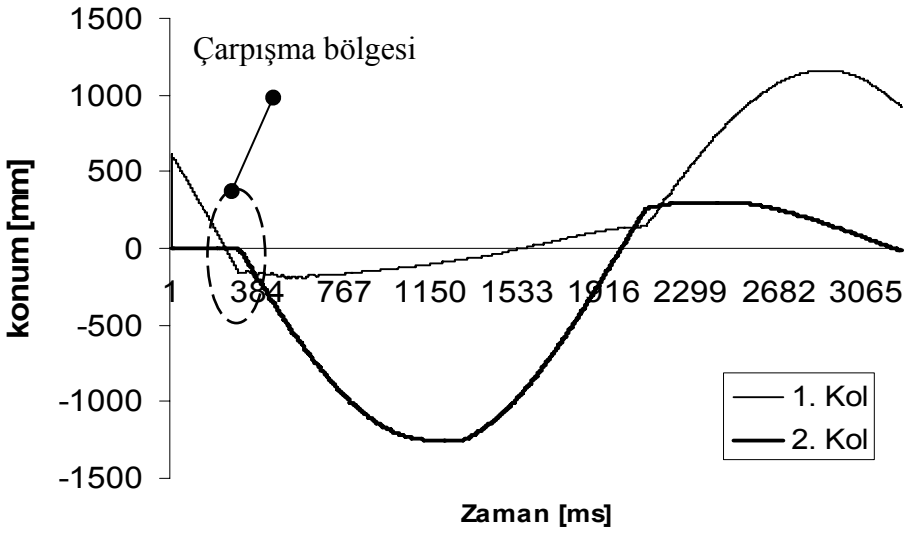
çıkarak anlık olarak sabitlendiği kabul edilir. Bu nedenle, bu deney sisteminde de kolun parçaya temasa başladığı andan itibaren temasın kesildiği ana kadar (yatayda 200mm'ye karşılık gelmektedir) sistemdeki potansiyel enerjinin değişimi ihmal edilmiştir. Sistemde kolun 90 derece kaldırılması halinde çarpma anında maksimum kol hızı, deney sonuçlarının analiz edilmesine ek olarak şu şekilde de hesaplanabilir;

$$V = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \text{ x } 9.81 \text{ x } 2.85} = 7.477 \text{ m/s} \qquad (4.4)$$

Çarpışma deney sisteminden elde edilen veriler, kolların zamana bağlı açısal konum bilgileridir. Bu bilgiler aşağıda belirtilen adımlar doğrultusunda örnek inceleme amacıyla yapılmış strafor malzeme testine ait grafikler üzerinde anlatılmıştır.

4.3.3.1. Konum-zaman verilerinin işlenmesi

Konum algılayıcılarından (Rotary Enkoder) elde edilen puls bilgileri, Denklem 4.1 ve Denklem 4.2'de hesaplandığı üzere, 1 puls = 0.829 mm olacak şekilde konum bilgilerine dönüştürülmüştür. Çarpışmadan kısa bir an öncesi grafik veri alanı başlangıcı olarak alınmıştır. Strafor malzeme testinde elde edilen verilerden oluşturulmuş örnek inceleme için sunulmuş grafik Şekil 4.20'de görülebilmektedir.



Şekil 4.20: Deneysel olarak elde edilen örnek konum-zaman eğrisi örneği (strafor malzeme)

İkinci olarak hı

Enerjinin korunumu gereğince çarpışma sonrasında kaybolan kinetik enerji, sönümlenen enerji (E_s) miktarı olarak Denklem 4.6 dan çekilerek tespit edilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i (v_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} m_i (v_i')^2 + E_s \tag{4.6}$$

Burada, m_i, v_i ve v_i' değerleri, her bir cisim için sırasıyla; kütle, çarpışma öncesi hız ve çarpışma sonrası hızdır.

4.3.3.3. İmpulsif kuvvet ve çarpışma katsayısı

Çarpışmaların incelenmesinde zamandan bağımsız olarak, transfer edilen kinetik enerji ve çarpışan cisimler tarafından sönümlenen enerjinin bulunmasında impuls ve momentum ilkeleri önemli rol oynamaktadır. Bu ilkeler, taşıtlara ait enerji sönümleme elemanlarının modellenmesinde, enerji sönümleme elemanının ağırlık etkisi ile kütle-enerji oranı ve enerji iletim katsayısı gibi birbirleri ile etkileşimli parametrelerin tespitinde de kullanılmaktadırlar. Teorik hesaplamalarda tüm sistem elemanları maddesel noktalar şeklinde düşünüldüğünde, bu maddesel noktalardan ***m*** kütlesine sahip ve **F** kuvvetine maruz kalmış bir nokta için, Denklem 4.7'de ki Newton'un ikinci kanunu uygulanabilir. Ve a ivmesi yerine dv/dt ifadesinin yazılması halinde Denklem 4.8 elde edilir.

$$F = ma \tag{4.7}$$

$$F = \frac{d}{dt}(mv) \tag{4.8}$$

Burada (mv) ifadesine, maddesel noktanın momentumu denir. Bu ifadeden maddesel noktaya etki eden F kuvvetinin maddesel noktanın momentumundaki değişim hızına eşit olduğu söylenebilir. Böylece her iki tarafın dt ile çarpılıp herhangi bir dt zaman aralığı için integre edilmesi halinde,

$$F.dt = d(mv) \tag{4.9}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 - mv_1 \tag{4.10}$$

$$mv_1 + \int_{t_1}^{t_2} F dt = mv_2 \tag{4.11}$$

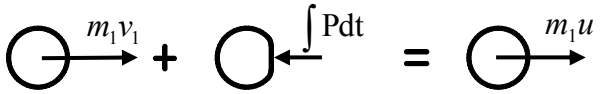
elde edilir. Buradaki integrale F kuvvetinin, incelenilen zaman aralığındaki impulsu denilmektedir. Bu ifade momentum ve impulsun vektörel bir büyüklük olduğunu ayrıca F kuvvetinin etkisinde kalan bir cismin son momentumunun cismin ilk momentumu ile F kuvvetinin göz önüne alınan süre içindeki impulsunun vektörel olarak toplanması sonucu elde edilebileceğini ifade etmektedir. Bir cisme çok kısa bir süre içerisinde o cismin momentumunun değişmesine neden olabilecek çok yüksek kuvvetler etki edebilir. Bu çeşit kuvvetlere impulsif kuvvet denilmektedir ve cisme etkisi şu şekilde açıklanmaktadır [66];

$$mv_1 + \sum F\Delta t = mv_2 \tag{4.12}$$

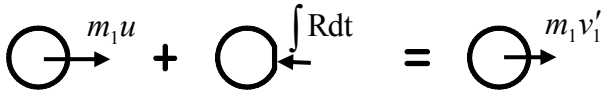
Burada m cismin kütlesini v_1 ve v_2 sırasıyla cismin ilk ve son hızını Δt ise F kuvvetinin etki ettiği süreyi ifade etmektedir. İki cismin çok kısa süren, ancak oldukça büyük kuvvetlerin oluştuğu temas durumuna "çarpışma" denilmektedir. İki cismin hızı çarpışma doğrusu üzerinde olması halinde "doğrusal çarpışma" adı verilir. Bu durum iki cisim için incelenmesi halinde, çarpışma esnasındaki impulsif kuvvetler iç kuvvetlerdir ve sistemin momentumu korunmaktadır. Bu durum şu şekilde ifade edilebilir;

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2' \tag{4.13}$$

v_1' ve v_2' hızlarının arasında bir bağıntı daha kurulabilmektedir. Bunun için cisimlerin temas anında şekil değiştirme sürecindeki hareketi göz önüne alınarak impuls ve momentum ilkeleri uygulanır. Bu durum tek cisim için incelendiğinde Şekil 4.22 'deki aşamalar göz önüne alınabilir.



(a) Şekil değiştirme süreci



(b) Geri dönüş süreci

Şekil 4.22. Bir cisim için çarpışma anındaki impulsif kuvvetler ve etkileri

Burada, cismin ilk şekil değişimini oluşturan P impulsif kuvveti ile şekil değişimi esnasında depolanan şekil değiştirme enerjisinin boşalması esnasında oluşan R reaksiyon impulsif kuvveti birbirlerinden farklıdırlar. Bu impulsif kuvvetlerin dt süresince oluşturduğu impulsların oranı malzemelere ait bir karakteristik olan "çarpışma katsayısını" verir.

$$e = \frac{\int Rdt}{\int Pdt} = \frac{m(u - v_1')}{m(v_1 - u)} = \frac{u - v_1'}{v_1 - u} \tag{4.14}$$

Aynı işlem çarpışan ikinci cisme de uygulanması halinde, e katsayısı ile v_2 ve v_2' hızları arasında ikinci bir bağıntı kurulabilir.

$$e = \frac{v_2' - u}{u - v_2} \tag{4.15}$$

Bu oranların birbirlerine eşit olmasından dolayı pay ve paydalarının da toplamlarının oranına eşittir. Dolayısıyla e katsayısı şu şekilde yazılabilir;

$$e = \frac{(u - v_1') + (v_2' - u)}{(v_1 - u) + (u - v_2)} = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2} \tag{4.16}$$

Buradan e çarpışma katsayısı için iki cismin çarpıştıktan sonraki bağıl hızlarının çarpışmadan önceki bağıl hızlarına oranı olarak belirtmek mümkün olmaktadır. Bu özellik verilen iki malzemenin çarpışma katsayılarının tespitinde kullanılmaktadır.

Çarpışma katsayısı “e” için iki özel durumundan bahsetmek mümkündür. Birincisi; e = 0 tam plastik çarpışma halidir. Bu durumda geri dönüş süresi olan ikinci aşama ortadan kalkarak $v_1' = v_2'$ olmakta yani cisimler beraber hareket etmektedirler. Dolayısıyla sisteme ait kinetik enerjiden belirli bir miktarı cisimlerin şekil değiştirme enerjileri için harcanmaktadır. İkincisi; e=1 tam elastik çarpışma halidir. Yani çarpışma öncesi ve sonrasındaki cisimler arasındaki bağıl hızlar eşittir. Her iki cismin de şekil değiştirme ile geri dönüş süresince kazandıkları impulsları eşittir. Tam elastik çarpma halinde sistemin momentumundan başka toplam kinetik enerjisinde de değişim olmaz. Ancak çarpışmanın en genel hali olan; e<1 olması halinde sistemin enerjisi korunmaz. Bu durum, çarpma öncesi ile sonrasındaki kinetik enerjilerin karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir. Kaybolan kinetik enerji ise malzemelerde kalıcı deformasyona, kısmen ısıya ve kısmen de rijit cisimler üzerinde elastik dalgalar oluşturmaya harcanır. Konstrüksiyon açısından bu durum incelendiğinde, impulsif kuvvetlerin oluştuğu Δt süresi uzatılarak, yıkıcı kuvvetler olan impulsif kuvvetler düşürülebilmektedir.

Çarpma esnasında kütlelerin birbirleriyle temas etme süresi, Hız-zaman grafiği üzerinden tespit edilebilmektedir. Böylece bir kütle için çarpma öncesi ve sonrasındaki hızlarıyla birlikte, temas süresinin de Denklem 4.16’da yerlerine konulmasıyla cisme etki eden impulsif kuvvetler analitik olarak hesaplanmıştır. Son olarak çarpma esnasında elde edilen bütün veriler çalışmanın deney sonuçlarının analizi bölümünde; farklı konfigürasyona sahip numunelerin, sönümledikleri enerji miktarlarına bağlı olarak hesaplanılan SES oranı değerleri, deneysel değişkenlere bağlı olarak grafikler ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Çarpışma katsayısı, otomobil gibi büyük sistemlerde de geçerli bir kavramdır. Dolayısıyla çarpışma senaryolarının tasarım aşamasında daha iyi belirlenebilmesi için bir sisteme ait çarpışma katsayısının iyi bilinmesi gereklidir. Bu amaçla numune konfigürasyonlarına ait çarpışma katsayıları da deney sonuçları bölümünde değerlendirilmiştir.

4.3.3.4. Spesifik enerji sönümleme oranı

Yarı statik yüklemeli olarak yapılan testlerde, kompozit çubuğun uygulana yüke karşılık gösterdiği reaksiyon kuvvetinin (F_r), çubuğun deformasyona uğrayan boyu (L_e) kadar mesafede meydana getirdiği iş miktarı olarak hesaplanmaktadır. Ancak hesaplamada kullanılan çubuk boyu, ortalama reaksiyon kuvvetin etki ettiği "etkin" çubuk boyu olarak alınmaktadır. Ortalama kuvvetin etkin çubuk boyunca oluşturduğu iş, yani sönümlenen enerji (E_s) miktarı ise yarı statik test uygulamalarında şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$E_s = F_r L_e \tag{4.17}$$

Ortalama kuvvet (F_r), ortalama kuvvetin etki ettiği çubuk boyu (L_e) ve çubuk boyu için ölçülen malzeme kütlesi (W) gibi değişkenlere bağlı olarak deney numunelerinden elde edilen spesifik enerji sönümleme (SES) oranı aşağıdaki formülle hesaplanabilmektedir;

$$SES = \frac{E_s}{W} \quad [j/g] \tag{4.18}$$

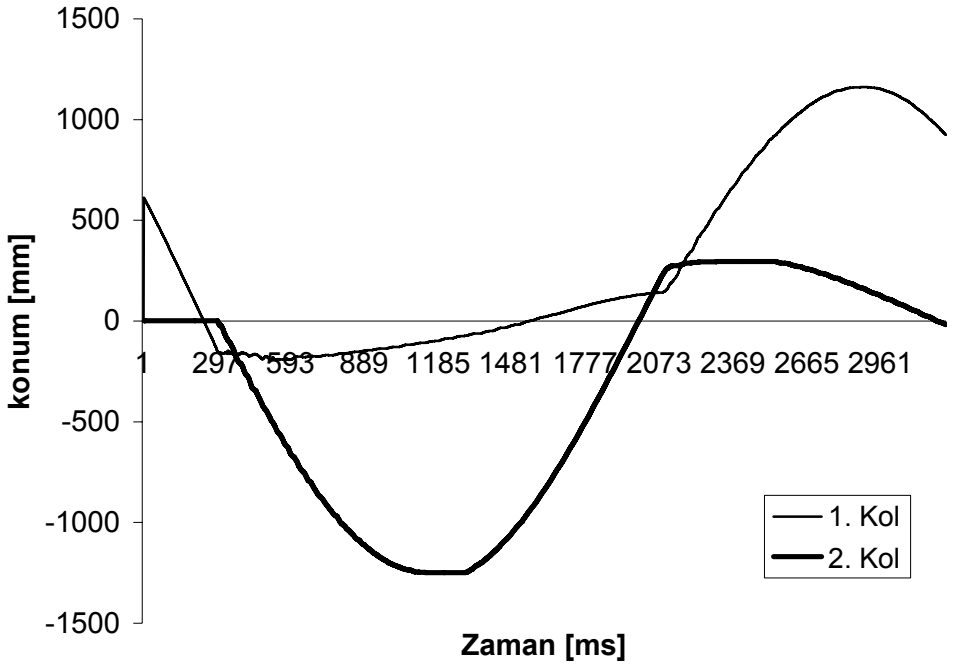
Denklem 4.18, dinamik testlerde elden edilen E_s değerinin doğrudan yerine yazılmasıyla kullanılmıştır.

4.3.4. Farklı malzemelerin çarpışma deneyleri

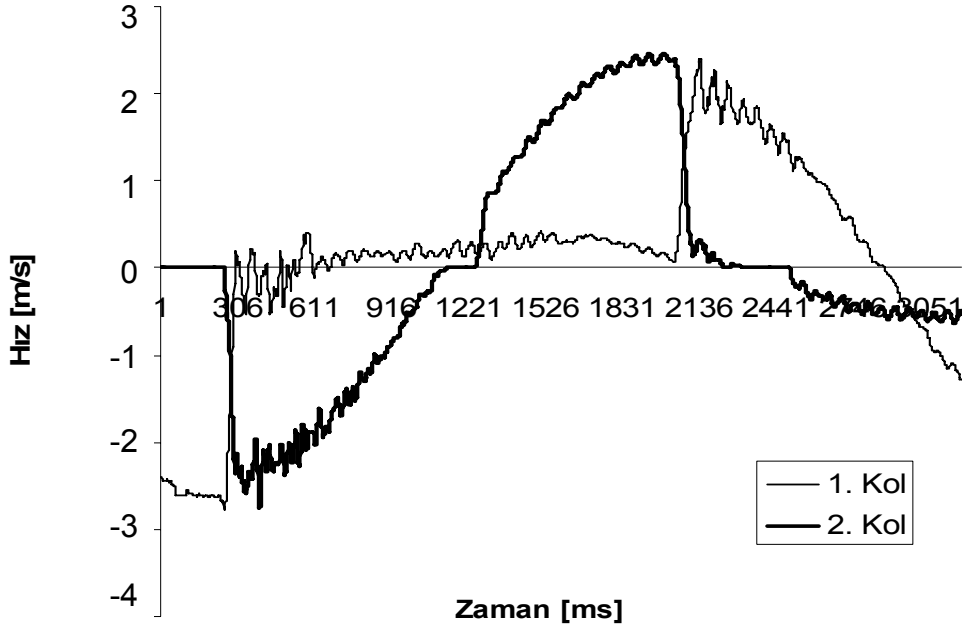
Kurulan deneysel düzenekte, kompozit malzemelere yönelik testler yapılmadan önce, sistemin doğruluğu ve kararlığını test etmek amacıyla sönümleme katsayıları belli olan örnek analiz çalışmaları yapılmıştır. Birinci olarak tam elastik (e=1) çarpışmaya çok yakın bir özellik sergileyen strafor malzemeye (e=0.92) ait testler gerçekleştirilmiş, elde edilen bulgular sunulmuştur. İkinci olarak ise; metal-metal temasın olduğu çarpışma (e=0.6) örneği sunulmuştur. Ve son olarak çalışmalarda kullanılan kompozit malzemelerle aynı özelliklere sahip bir numuneye ait örnek bir inceleme yapılmıştır.

4.3.4.1. Köpük malzemesi

Strafor malzeme, yükleme yapıldığı süre içerisinde kalıcı deformasyona uğramadan sıkışmaktadır. Daha sonra ise, eski haline dönme aşamasında yüklenen enerjiyi karşı tarafa neredeyse tamamen aktarabilmektedir. Dolayısıyla, kinetik enerji miktarının tamamına yakını duran kütleye aktarılmaktadır. Her iki kütlenin de eşit miktarda olması durumunda, ilk önce hareketli olan birinci kolun hızı durma derecesinde azalırken, ikinci kolun taşıdığı kütle birinci kolun ilk hızına yakın şekilde harekete başlamaktadır. Sönümlenen enerji miktarı ise iç sürtünme nedeniyle oluşmaktadır. Şekil 4.23'de verilen konum-zaman verileri işlenerek elde edilen hız-zaman bilgileri Şekil 4.24'te sunulmaktadır. Şekil 4.24'ten, v_1= 2.8 m/s, çarpışma sonrasında v_1'= 0.2 m/s, v_2'=2.6 m/s olarak tespit edilebilmektedir. straforlu çarpışmada kuvvet etkime süresi t= 0.056 s olarak tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda m_1=85 kg için, Denklem 4.16'ya göre sönümleme katsayısı e= 0.92, Denklem 4.5'e göre ilk enerji E_k=364 J, Etkime Kuvveti F=4250 N, Denklem 4.6'dan strafor malzemede iç sürtünmelerden dolayı oluşan sönümlenen enerji miktarı E_s=47 J olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.23: Strafor malzemeye ait çarpışma testi verileri: Konum-zaman grafiği

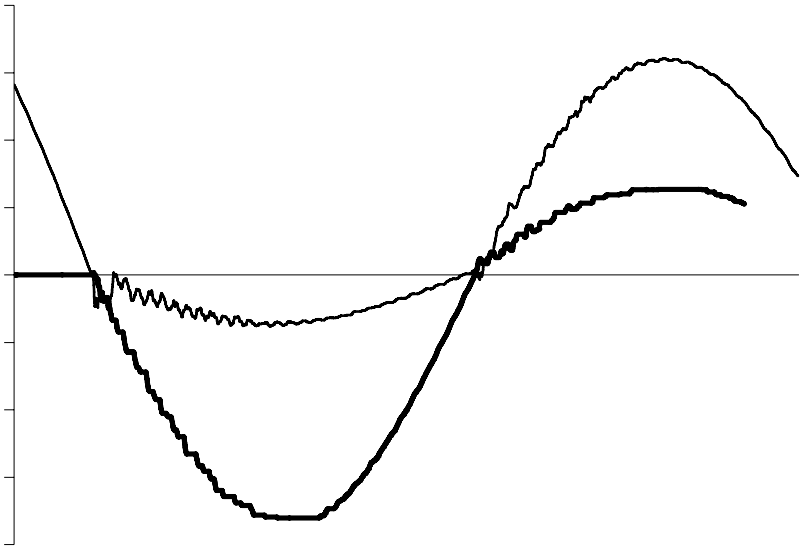


Şekil 4.24: Strafor malzemeye ait çarpışma testi verileri: Hız-zaman grafiği

4.3.4.2. Metal malzemesi

Metal malzemelerde çarpma anında oluşan yüksek anlık kuvvetler temas bölgelerinde plastik deformasyonlar oluşturmaktadır. Böylece kinetik enerjinin bir kısmı bu şekilde harcanmaktadır. Temas yüzey alanlarının geniş olması halinde ise plastik deformasyon gerçekleşmese bile, metal yapılar içerisinde elastik şok dalgaları oluşmaktadır. Dolayısıyla enerjinin yine bir kısmı bu elastik şok dalgaları ile harcanmaktadır. Metal-metal çarpışma deneyinde 4140 alaşımlı çelik malzemesinden hazırlanan metal takozlar kullanılmıştır. Metal metal çarpışmalarda sönümleyici bir ara eleman olmaması durumunda çok yüksek anlık yükler oluşmasından dolayı, deneysel sistemin zarar görmemesi için birinci kolun başlangıç hızı 1.75 m/s olarak düşük bir değerde tutulmuştur. Metal-metal çarpışma için, Şekil 4.25'de verilen konum-zaman verileri işlenerek elde edilen hız-zaman bilgileri Şekil 4.26'da sunulmaktadır. Şekil 4.26'da sunulan verilerin işlenmesiyle, v_1= 1.75 m/s iken çarpışma sonrasında v_1'=0.34 m/s, v_2'=1.41 m/s olarak tespit edilebilmektedir. Kuvvet etkime süresi t= 0.038 s olarak tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda m_1=85 kg için Denklem 4.16'ya göre sönümleme katsayısı e= 0.61, Denklem 4.5'e

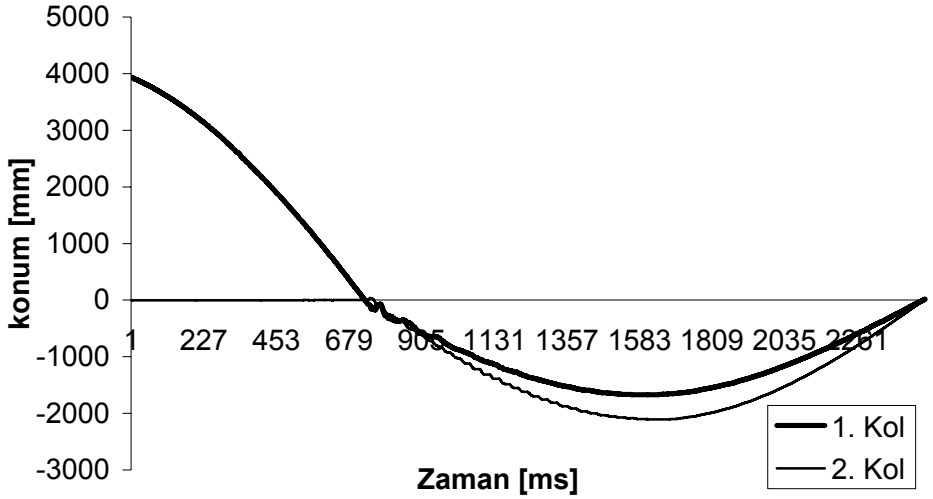
göre ilk enerji E_k=130 J, Etkime kuvveti F=3153 N, Denklem 4.6'dan metalde oluşan deformasyonlar sonucu sönümlenen enerji; E_s=40 J olarak gerçekleşmiştir.



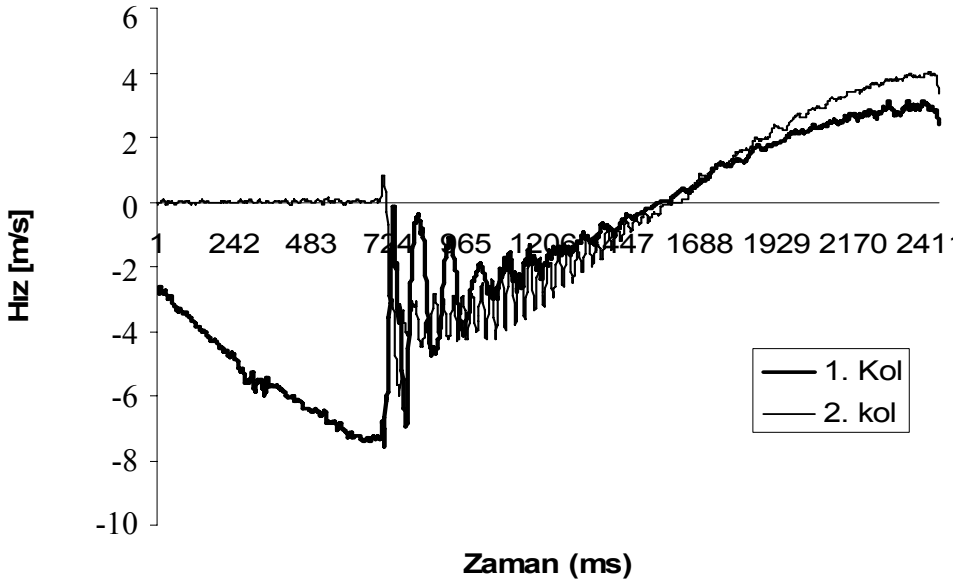
4.3.4.3. Kompozit malzeme

Kompozit malzemeler kırılgan yapıya sahip matris ve fiber dokulardan oluşmaktadırlar. Bu nedenle aşırı yükleme durumunda plastik deformasyon görülmez. Ancak hasar oluşumu, fiber ve matris malzemelerine göre farklı biçimlerde gerçekleşir. Kompozit çubuklardaki fiber ve matris malzemesi haricinde kırılmaya etki eden dış faktörlerde mevcuttur. Bu dış faktörler, numune geometrisine bağlı olarak numune üzerinde belli yerlerde gerilme yığılmaları oluşturmaktadırlar. Bu gerilme yığılmaları ise malzemede aşamalı çökmeler oluşturarak deformasyon süresinde, reaksiyon kuvvetin ortalama değerde kalmasını sağlamaktadır. Hasar esnasında, matris malzemesi içerisinde çatlaklar ile ayrılma yüzeylerinin oluşumu, fiber ile matris malzemeleri arasındaki bağların kopması, fiber kırılmaları bu sistemlerde enerji sönümleyici ana etkenlerdir.

Tablo 4.2'de verilen parametrelere göre hazırlanarak yapılan testlere ait bir örnek çalışma Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterilmektedir. Şekil 4.28'den, v_1= 7.2 m/s, çarpışma sonrasında $v_1^{'}$=3.4 m/s, $v_2^{'}$=3.8 m/s olarak tespit edilebilmektedir. Metal-Kompozit çarpışmada kuvvet etkime süresi t= 0.057 s olarak tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda m_1=85 kg için, Denklem 4.16'ya göre sönümleme katsayısı e= 0.056, Denklem 4.5'e göre ilk enerji E_k=2203 J, Etkime Kuvveti F=5666 N, Denklem 4.6'dan kompozit çubukta oluşan deformasyonlar sonucunda, sönümlenen enerji; E_s=1086 J olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.27: Kompozit malzemeye ait çarpışma test verileri: Konum-zaman grafiği



Şekil 4.28: Kompozit malzemeye ait çarpışma test verileri: Hız-zaman grafiği

Örnek uygulamalarda olduğu gibi, Tablo 5.2'de belirtilen parametrelere uygun olarak hazırlanan test numuneleriyle yapılan testlerden elde edilen verilerin analizlerinde de bu yöntemler kullanılmıştır. Ayrıca çarpmanın gerçekleştiği etkime süresi (t) içerisinde oluşan ve yük hücresi ile ölçülen kuvvet-zaman değişimi grafikleri de deney sonuçları bölümünde sunulmuştur.

5. KOMPOZİT ÇUBUKLARIN ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİ

Bu bölümde, yarı statik ve dinamik yüklemeli deneysel çalışmalara ait sonuçlar incelenmiştir. İlk olarak yarı statik yüklemeli gerçekleştirilen kıvırma metodu ve kesit daraltma metodu (yarı-statik yüklemeli dar kesit deneyleri) ile elde edilen veriler, yarı statik deney sonuçları başlığı altındaki iki alt başlık olarak incelenmiştir. Malzemelerde oluşan deformasyon tipleri ve testlerden elde edilen Kuvvet-Deformasyon değişim eğrileri enerji sönümleme karakteristikleri açısından yorumlanmıştır.

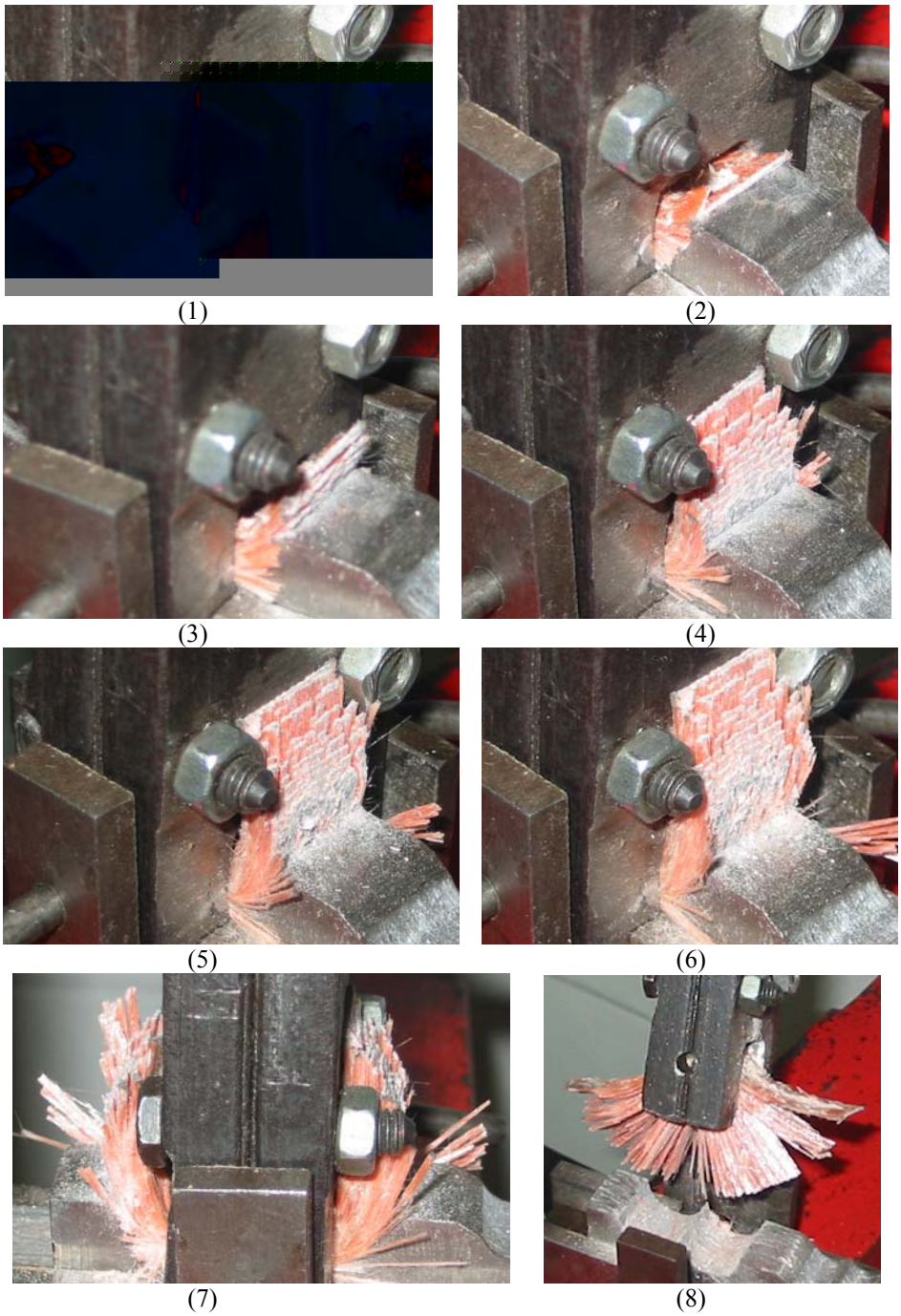
Kesit değişimi metodunun dinamik yüklemeli olarak gerçekleştirildiği çarpma testi sonuçları üç alt başlıkta incelenmiştir. Nozul ve çubuk numunelere ait geometrik değişkenlerinin deformasyon esnasında meydana gelen reaksiyon kuvvetlerine etkileri incelenmiştir. İkincisinde; malzemelere ait oluşan hasar biçimleri iki ayrı alt başlıkta incelenerek yorumlanmıştır. Üçüncüsünde ise, darbe testlerinden elde edilmiş konum bilgilerinin işlenmesiyle analitik olarak türetilen ve deney numunelerine ait enerji sönümleme karakteristiklerini içeren veriler, toplu olarak tablo şeklinde verilmiştir. Ve bu verilerin geometrik etkenler ile olan ilişkilerini ortaya koymak amacıyla sonuç grafikleri yorumlanmıştır. SES oranını değişik geometrik faktörlere bağlı olarak tespit edebilen tahmin denklemi oluşturulmuştur.

5.1. Yarı Statik Deney Sonuçları ve Analizi

Literatüre henüz eklenmiş olan kıvırma testi ve dar kesit yöntemi uygulanarak gerçekleştirilen yarı statik yüklemeli test çalışmalarda elde edilen test verileri incelenerek analiz edilmiştir. Elde edilen bulguların incelenmesi test yöntemi adına göre iki alt başlıkta verilmiştir. İncelemeler, reaksiyon kuvvetleri ve SES oranının tespit edilmesine yönelik yapılmıştır.

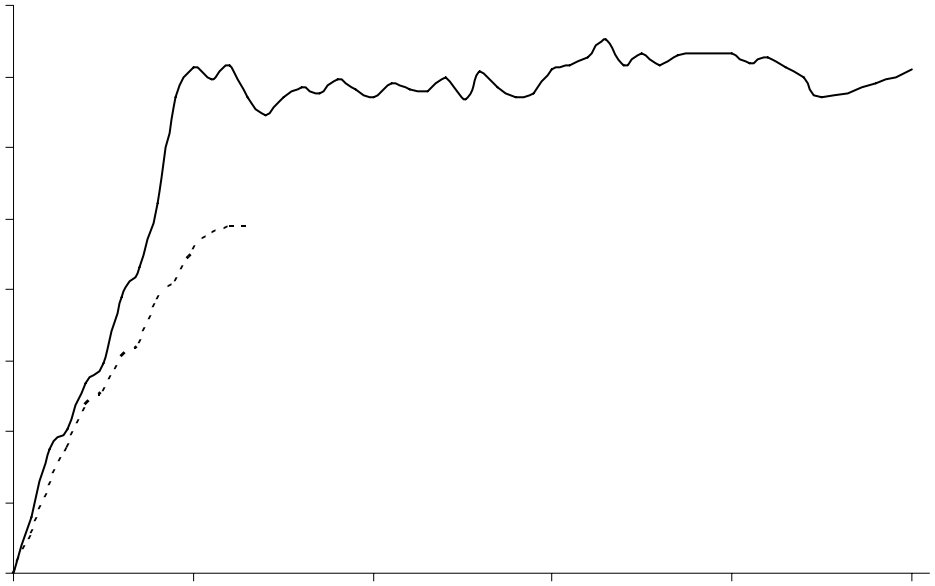
5.1.1. Yarı statik yüklemeli kıvırma testi sonuçları

Şekil 4.4'de şematik olarak belirtildiği gibi, çubuk itilirken, alt dönüm noktasından geçmesinin ardından tabaka ayrılmaları gözlenmektedir. Bu deformasyon aşamaları Şekil 5.1'de görülmektedir. Test sonuçlarının incelenmesinde kompozit malzemenin ayırıcı uca temas anı, deformasyonun başlangıç noktası olarak alınmıştır.



Şekil 5.1: Yarı statik yükleme altında tabaka ayrılması hasarı oluşum aşamaları.

Farklı büküm yarıçaplarında oluşan reaksiyon kuvvetleri deformasyon miktarına bağlı olarak değişimleri, kıvırma kalıbı büküm yarı çapı (R) 8 mm, 12 mm, 16 mm ve 25 mm için Şekil 5.2'de kıyaslamalı olarak gösterilmektedir. Tabaka ayrılması aşamasında reaksiyon kuvvetleri, malzeme kesiti değişmediği için yaklaşık doğrusal bir şekilde devam etmektedirler



Şekil 5.2: Eğimli yüzeyden geçirilen kompozit malzeme davranışı

Şekil 5.2'de verilen ve R=25 mm kıvırma yarı çapı kullanılması halinde oluşan reaksiyon kuvvet deformasyon miktarı değişiminden, kompozit çubuk malzemesinin ayırıcıya temas ettiği 0mm'den itibaren Şekil 5.2'deki (a) noktasına ulaşmasına kadar bir kuvvet artışı izlenmektedir. Büküm noktasından itibaren tabakalara ayrılmaları hasarının tüm kesit için tamamen başlamasından dolayı reaksiyon kuvveti değerinin ortalama değerde sabitlendiği görülmektedir. Bu ortalama değer 7.6 kN olarak tespit edilmiştir. Reaksiyon kuvvetin ortalama değerinin etkili olduğu numune boyu ise 24 mm için ölçülen kütle 7.02 gr'dır. Bu veriler Denklem 4.17'de yerine yazılmasıyla hesaplanan iş, 196 J 'dür. Bu şartlarda, malzemenin SES oranı ise Denklem 4.18'den 22.1 j/g olarak tespit edilmiştir.

Büküm yarı çapı 16 mm olan ayıracın kullanılması halinde oluşan reaksiyon kuvvetleri deformasyona bağlı oalrak Şekil 5.2'de görülmektedir. Grafikten, ayıracın kama bölgesinden itibaren malzemenin ikiye ayrılmaya başlamasıyla, ayıracın alt dönüm noktasına ulaşmasına kadar reaksiyon kuvvetin R=25 mm'ye benzer şekilde yaklaşık doğrusal arttığı görülmektedir. Alt dönüm noktasından itibaren, R=25 mm'deki gibi tabaka ayrılmalarının tüm kesit için tamamen başlamasından dolayı reaksiyon kuvvetin ortalama değerde sabitlendiği görülmektedir. Bu değer 9.12 kN olarak tespit edilmiştir. Ortalama reaksiyon kuvvetin etkili olduğu numune boyu 28 mm ve kütle 7.56 gr'dır. Bu deformasyon sonucunda yapılan iş Denklem 4.17'den 265 J olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda, malzemenin SES oranı ise Denklem 4.18'den 35.3 j/g olarak tespit edilmiştir. Bu artışların sağlanmasında, en önemli faktör büküm yarıçapına bağlı olarak oluşan tabaka sayısıdır. Buda tabakalar arası sürtünme kuvvetinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bir diğer önemli etken ise reaksiyon kuvvetin etkili olduğu çubuk boyunun uzamasıdır.

R=12 mm büküm yarıçaplı ayıracın kullanılması halinde oluşan Reaksiyon kuvveti-Deformasyon değişim eğrisi Şekil 5.2'de verilmektedir. Grafikten, malzemenin ayıracın kama bölgesinden itibaren ikiye ayrılmaya başlamasıyla, ayıracın alt dönüm noktasına ulaşmasına kadar reaksiyon kuvvetinde gittikçe azalan bir artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Kama etkisiyle yarılan ve eğimli yolda ilerleyen numune, ilk ayrılma yüzeyini oluşturacak çatlakların başlamasına kadar, eğimli yol ile kalıp kapakları arasında sıkışmaktadır. İlk çatlakların oluşmasıyla birlikte bu rijitlik bir yumuşamaya dönmekte, ancak diğer ayrılma yüzeylerinin devreye girmesiyle, tabakalar arası sürtünme kuvvetleri oluşmaya başlayıp tekrar reaksiyon kuvvetin artışına neden olmaktadırlar. Son aşamada ise; tüm yüzeylerde ayrılma oluştuğundan reaksiyon kuvvet ortalama değerinde kalmıştır. R12 için reaksiyon kuvvetin ortalama değeri 11.5 kN olarak tespit edilmiştir. Ortalama reaksiyon kuvvetin etkili olduğu çubuk boyu ise 34.3 mm olmuştur. Etkin boy için hesaplanan kütle 9.3 gr'dır. Bu deformasyon sonucunda yapılan iş, Denklem 4.17'den 407 J olarak hesaplanmıştır. Bu şartlarda, malzemenin SES oranı ise Denklem 4.18'den 44.16 j/g olarak tespit edilmiştir. Burada da yine, büküm yarıçapına bağlı olarak oluşan tabaka sayısı ve tabakalar arasında oluşan sürtünme kuvvetlerindeki artış dikkat çekmektedir.

R=8 mm büküm yarıçaplı ayıracın kullanılması ile elde edilen Reaksiyon kuvveti-Deformasyon değişim eğrisi Şekil 6.2'den verilmektedir. Grafikten, malzemenin ayıracın kama bölgesinden, ayıracın alt dönüm noktasına kadar reaksiyon kuvvetinde doğrusal bir artış görülmektedir. Ayıracın yarı çapı ile çubuk kalınlığı çok yakın olduğu için reaksiyon kuvveti, çubuğun ayıracın alt dönüm noktasına ulaştığı andan itibaren en tepe değerine ulaşarak kalan çubuk boyunca devam etmektedir. R=8 mm ayıraç yarıçapında ve 180 derecelik bir yörüngede bükülen çubuğun iç çapı 1 mm'den de düşük olduğundan mümkün olan en fazla tabakanın oluştuğunu söylenebilir. Dolayısıyla malzemenin tüm karakteristiklerinin tepe değerlerinin bu test ile ölçüldüğü kabul edilmiştir. R=8 mm için reaksiyon kuvvetin ortalama değeri 14.02 kN olarak tespit edilmiştir. Ortalama reaksiyon kuvvetinin etkidiği çubuk boyu ise 43 mm olmuştur. Etkin boy için kütle 11.63 gr'dır. Bu deformasyon sonucunda yapılan iş, 602 J olarak hesap edilmiştir. Bu şartlarda, malzemenin SES oranı ise 52 j/g olarak tespit edilmiştir.

Büküm yarıçaplarının malzemede oluşan tabakaların sayısını doğrudan etkilediği yapılan testler sonucunda görülmüştür. Bunun nedeni Bölüm 3'te tabaka eğilmesi modunda bahsedilen, malzeme içerisinde eğilme esnasında tabakaların oluşmasını sağlayan çatlaklar ve ayrılma yüzeyleri ile bu ayrılma yüzeyleri arasındaki rölatif hareketlerinden kaynaklanan sürtünme kuvvetleridir. Şekil 5.2'de kare kesitli kompozit çubuk malzemesine ait ve bu değişkenlere göre oluşan Reaksiyon kuvveti-Deformasyon değişimlerini kıyaslamalı olarak göstermektedir.

Yapılan deneylerden elde edilen kuvvet-deformasyon eğrileri incelendiğinde genellikle metalik malzemelere ait bir karakteristik olan, ilk çökme anında oluşan ani (pik) yükler görülmemektedir. Kare kesitli çubuk numunelerine ait sönümleme enerjisinin hesaplanmasında, deformasyon süresince oluşan reaksiyon kuvvetinin, kararlı bir şekilde devam ettiği ve yukarıda verilen Reaksiyon kuvveti-Deformasyon değişimlerine ait grafiklerde koyu renkli çizgiyle belirtilen ortalama yük değeri (F_r) kullanılmıştır. Bu ortalama kuvvetlerin etkidiği çubuk boyu (L_e) da yine grafiklerden tespit edilebilmektedir.

Kıvırma test metodunun dört farklı parametre kullanılmasıyla elde dilen deney sonuçları ile analitik olarak elde edilen büyüklükler Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1: Yarı statik yüklemeli kıvırma testi sonuçları

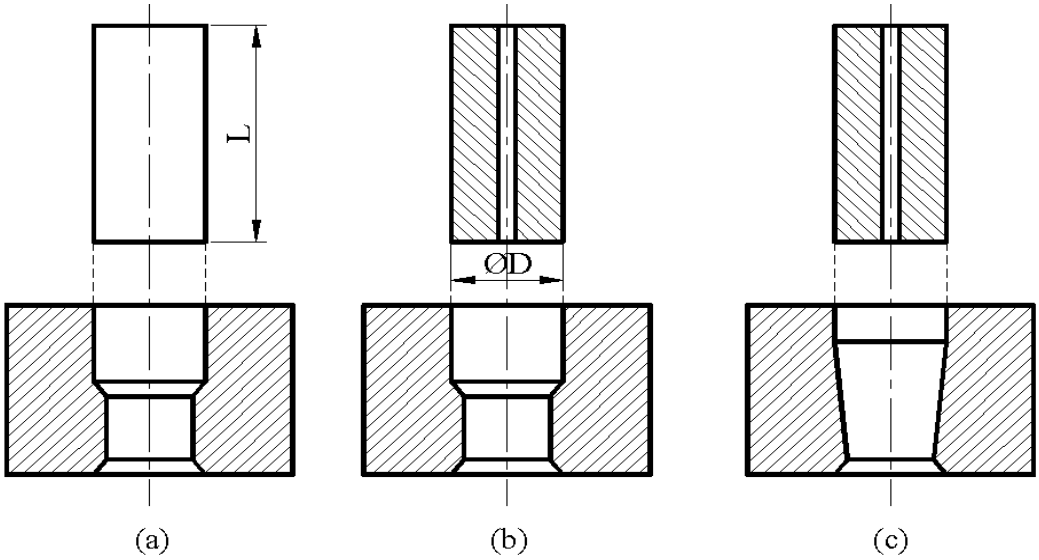
	L [mm]	F_r [KN]	E_s [j]	Kütle [g]	SES [j/g]
R8	43	14.02	602	11.63	52
R12	34.3	11.5	407	9.261	44.16
R16	28	9.12	265	7.56	35.3
R25	24	7.6	196	7.02	22.1

Tablo 5.1'den aynı malzeme ve aynı test metodu için, farklı şartlarda farklı enerji sönümleme miktarlarının elde edilmesinin mümkün olduğu anlaşılmaktadır. Burada en önemli faktör, büküm yarı çaplarının daralmasından dolayı, daha fazla kayma düzleminin oluşmasıdır. Bunun bir yansıması olarak küçük yarı çaplarda daha çok tabaka oluşmaktadır. Tabakaları oluşturan ayrılma yüzeylerinde, çatlak ilerlemesi için harcanan enerji ile sürtünme yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetlerinin yaptığı işin tabaka sayısına göre artmasından dolayı aynı malzeme için farklı enerji sönümleme miktarları oluşmaktadır. Ancak R=8 mm, kullanılan malzeme için kullanılabilecek minimum yarı çaptır. Çünkü malzeme geometrisi bu yarıçapın daha fazla küçülmesine müsaade etmemektedir.

5.1.2 Yarı-statik yüklemeli dar kesit test sonuçları

Daralan kesitin etkisinin ölçülmesi amacıyla, kompozit çubukların kendilerinden daha dar kesit alana sahip deliklerden geçirilmesi prensibine dayalı bir yarı statik deney gurubu gerçekleştirilmiştir. Deneylerde üç farklı kalıp kanalı ve numune koşulu için yarı statik yükleme durumunda oluşan reaksiyon kuvveti değişimi ve SES oranı miktarlarında ulaşılan en yüksek değerler incelenmiştir.

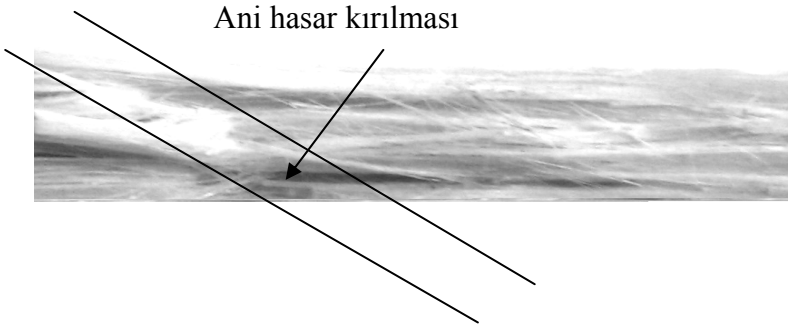
Silindirik kesitte hazırlanan kompozit çubuk malzemesine ait numuneler, kendi çaplarından daha küçük çaplarda delinmiş çelik malzemeden imal edilen kalıplardan geçirilerek deforme edilmişlerdir. Deneyde kullanılan kalıplara ve dış çapı 16 mm, delik çapı 4 mm olarak hazırlanmış silindirik çubuklara ait kesit görünüşler Şekil 6.7'de gösterilmektedir.



Şekil 5.3: Silindirik kesitli numuneler ve kalıplarına ait kesit görünüşler

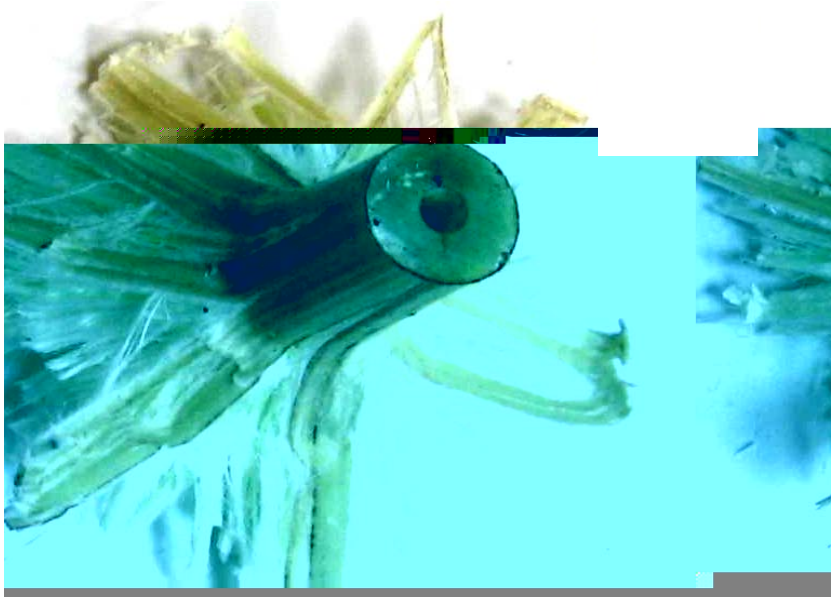
Şekil 5.3'te görülen farklı koşullar için malzeme deformasyonları incelendiğinde üç farklı deformasyon şeklinin oluştuğu söylenebilir. Bunlardan birincisi Şekil 5.4'te gösterilen kalıp ağzında malzeme yığılması oluşumudur. Bu tip hasarlar genellikle Şekil 5.3.a'da gösterilen içi dolu malzemenin ani daralan kesitten geçirilmeye çalışılması sonucu oluşmaktadır. Malzeme kalıp giriş deliği önünde yığılarak blokaj oluşturmakta ve ilerleme yapmamaktadır. Daha sonra malzeme aniden kırılarak deformasyona gitmektedir. Bu durum Şekil 5.5 'de gösterilmektedir. Bilindiği gibi bu hasar tipinde yüksek kuvvet elde edilmesine rağmen deformasyon miktarı çok kısa olduğundan enerji sönümleme miktarı çok düşük kalmaktadır. Bu durum ise enerji sönümleme karakteristiği açısından istenmeyen bir durumdur.

Şekil 5.4: Ani daralan kesit girişinde malzeme sıkışması



Şekil 5.5: Ani daralan kesit girişinde malzeme sıkışması sonucunda ani hasar oluşumu

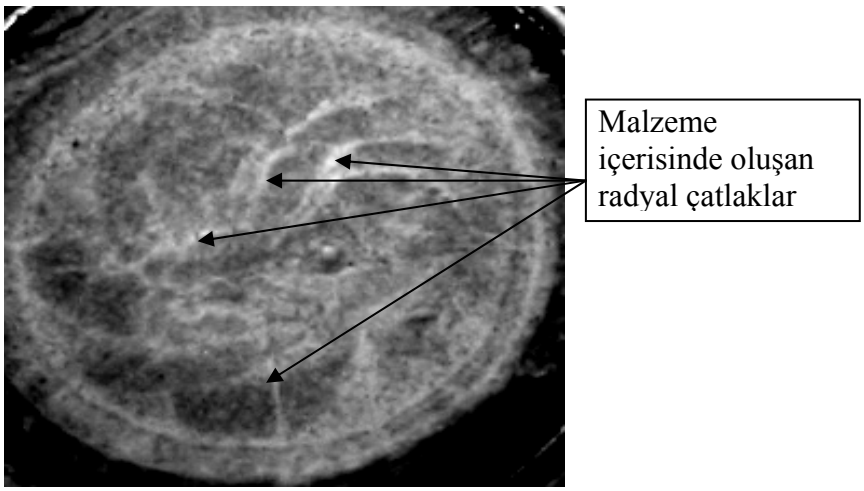
Bir diğer malzeme deformasyonu biçimi Şekil 5.6'da gösterilmektedir. Delikten geçme esnasında numune bir miktar kalıbın içine girmektedir. Daha sonra kalıbın içinde aşırı sıkışarak ilerleyemeyen malzeme ilk olarak kalıp ağzındaki kısımda burkulmaktadır. Burkulma ile kalıp ağzındaki fiberlerde kırılmalar oluşmaktadır.



Şekil 5.6: Ani daralan kesitte oluşan hasar tipi: üstten görünüş (Tabaka eğilmesi modu)

Şekil 5.7'den görüldüğü gibi, kalıp ağzında tozlaşmış ve sertleşmiş malzeme yığını doğal bir kama bölgesi oluşturarak malzemenin tabaka eğilmesi modu ile hasara uğramasına neden olmaktadır. Ancak burada reaksiyon kuvvetleri ilk burkulmanın ardından bir miktar düşerek sabit devam etmektedir. Bahsedilen her iki hasar tipinde de gözlenen kalıp içinde sıkışan malzemeye ait iç yapı çatlaklarını gösteren genel bir görünüş Şekil 5.8'de verilmiştir.

Şekil 5.7: Ani daralan kesitte malzeme hasar tipi (Tabaka eğilmesi modu)

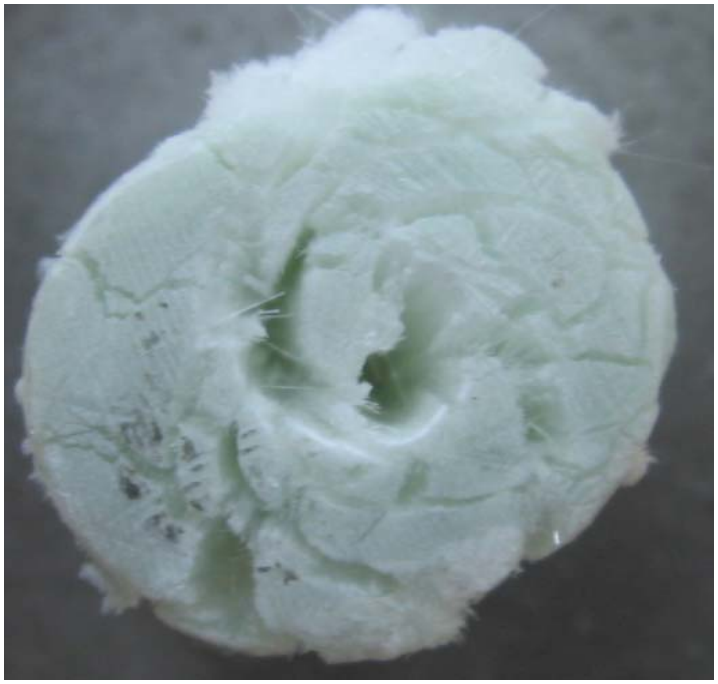


Şekil 5.8: Malzeme içinde oluşan radyal çatlaklar (Şekil 6.11'de A Bakış yönü)

Şekil 5.3.c'deki üçüncü koşul olan, numunelerin belirli bir koniklik açısıyla daralan bir delikten geçirilmesi durumunda ise; hasar oluşumu ve deformasyon karakteristiği açısından, önceki bahsedilen koşullardan, daha farklı bir sonuç sergilemiştir. Burada malzeme kalıp içinde, yığılma ve sıkışma gibi istenmeyen herhangi bir durumla karşılaşmadan, Şekil 5.9'de görüldüğü gibi deliğin diğer tarafından çıkmaya devam etmiştir.

Şekil 5.9: Konik kesitten geçirilen numunelerde oluşan hasar tipi: yan görünüş

Bu koşulda da yine çaptaki daralmanın, numune ortasına açılan deliğin kapanmasına neden olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.10). Ortadaki deliğin kapanmasına neden olan hasar mekanizması şu üç adımla açıklanabilir; 1- Malzeme içerisinde sıkışmadan kaynaklanan büyük radyal kuvvetler oluşmaktadır. 2- Bu radyal kuvvet ile merkeze doğru yönlenmiş bir çok kayma düzlemi oluşmaktadır. 3- Aynı radyal baskı kuvvetleri, oluşan bu kayma düzlemlerinin arasında kalan ince malzeme tabakalarının malzeme içerisinde küçük yer değiştirmelerle boşluklara doğru ilerlemesine neden olmaktadır.

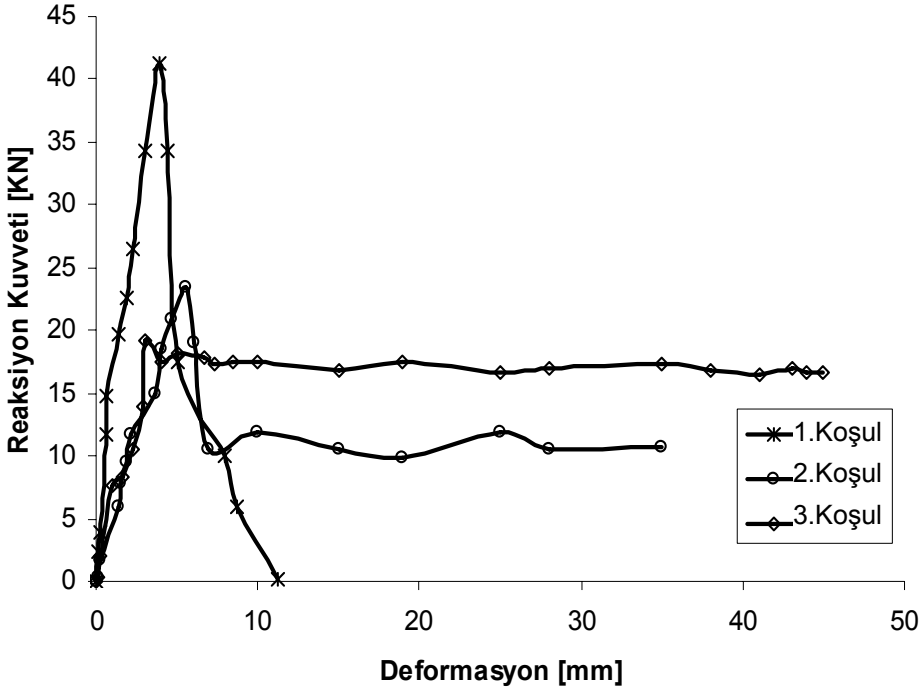


Şekil 5.10: Konik kesitten geçirilen malzemede oluşan hasar tipi : ön görünüş

Böylece, sönümlenen enerjisinin büyük kısmının bu ayrılma yüzeylerindeki çatlak ilerlemesiyle sağlandığı söylenebilir. Bir diğer önemli faktör ise sıkışan malzeme ile kalıp yüzeyi arasında oluşan sürtünme kuvvetidir. Malzemenin delikten geçirilmesi esnasında, tabakaların merkeze doğru küçük ilerlemeler sonucu oluşan tabakalar arası sürtünmelerin de sönümlenilen enerji miktarında payı olduğu görülmektedir. Ancak bunun ne kadar olduğu ileride yapılabilecek bir çalışmayla açıklanabilir.

Şekil 5.3'de gösterilen üç farklı test koşulunda, her bir koşul için yapılan farklı testlerden elde edilen ve en büyük yük değerlerini içeren Reaksiyon kuvvet-deformasyon değişimleri Şekil 5.11'te karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Şekil 5.3'de sırasıyla "a", "b" ve "c" olarak verilen her bir koşul için yapılan farklı testlerden elde edilen veriler, Şekil 5.11'de sırasıyla "1.Koşul", "2.Koşul" ve "3.Koşul" adlarıyla ifade edilmiştir.



Şekil 5.11: Dar kesit testi için reaksiyon kuvveti-deformasyon değişimi

Birinci koşulda numunelerin büyük çoğunluğunun ani deformasyona uğradığı görülmüştür. Reaksiyon kuvvet eğrisinin aniden yükselerek 43 kN gibi çok yüksek pik kuvvete ulaştıktan sonra aniden düşüşe geçmesi, malzeme üzerindeki yükün sürekli artmasına karşın malzemenin aşamalı çökmeye veya uzun süreli deformasyona uğramadığını göstermektedir. Böylece sistemin taşıyabileceği maksimum yük uygulandığı anda ani deformasyona gittiğini göstermektedir. Bu durum çarpışma karakteristiklerinde istenmeyen bir durumdur. 2. Koşulda ise Reaksiyon kuvvetler 25 kN gibi yüksek değerlere ulaşmış ve kalıp ağzındaki ilk burkulma ile ani olarak düşmüştür. Sonraki aşamada ise tabaka ayrılması modu gerçekleştiğinden deforme olan boy kadar sabit bir değerde kalmıştır. Maksimum görülen kuvvet ile bu koşul için, malzemenin SES değerinde ulaşılmış en yüksek değer 41 j/g olmuştur. Üçüncü koşulda ise, pik yük değeri oluşmadan, reaksiyon kuvveti değeri en yüksek değere ulaşarak çubuk boyunca sabit bir şekilde devam etmiştir. Ortalama kuvvet 17 kN olarak belirlenmiştir. Malzemeye ait SES değeri 58 j/g olarak tespit edilmiştir. Üç farklı koşulun, her biri için yapılan testlerden elde edilen en yüksek değerler Tablo 5.2'de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Yarı statik yüklemeli dar kesit testi sonuçları

	Net Boy [mm]	Fr [KN]	Es [j]	Kütle (g)	SES [j/g]
1. Koşul	40	43 max	167	12.4	13.17
2. Koşul	31	12	397	9.2	41
3. Koşul	42	17	717	12.7	58

Tablo 5.2 de belirtilen 3.Koşul için elde edilen değerler, Tablo 5.1 'deki değerlerle kıyaslandığında, aynı mekanik özelliklere sahip malzeme için, dar kesitten geçirilmesi durumunda, birim kütle başına daha fazla enerji sönümlediği görülmektedir. Bu durum çarpışma enerjisi yönetimi açısından faydalı bir durumdur.

Ayrıca bu iki yöntem karşılaştırıldığında, malzemenin kırılma moduna göre farklı enerji sönümleme karakteristikleri sergilediği anlaşılmaktadır. Bu bağlamda, klasik test yöntemlerinin haricinde, geliştirilecek yeni yöntemlerle malzemelerin mekanik özellikleri aynı kalmasına rağmen daha fazla enerjiyi sönümleyebilmesi sağlanabilir.

Yeni tekniklerin geliştirilmesinde, malzemeye ait mekanik özelliklerin sabit tutulması kaydıyla, SES oranını etkileyebilecek ana etkenler olarak, oluşan ayrılma yüzeylerinin sayısının arttırılması, bu yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetlerini sağlayan normal kuvvetlerin arttırılması, sürtünme kuvvetlerinin etkidiği mesafenin arttırılması gibi dışarıdan müdahale edilebilecek parametreler sayılabilir.

5.2. Dinamik Yüklemeli Deney Sonuçları

Yapılan dinamik yüklemeli çarpışma testlerinde, konstrüktif değişkenler ve test koşulu değişkeni olarak Tablo 5.2'de belirtildiği gibi toplam 8 farklı test parametresi vardır. Yapılan bu deneysel çalışmada, malzemenin mekanik özellikleri yarı statik testlerde kullanılan kompozit çubuklar ile aynı tutulmuştur. Ayrıca on adet test parametresinin sadece konstrüksiyona ait olan sekiz boyut parametresi içerisinden dördü değişken olarak seçilmiştir. Çubuk çapı, boyu gibi ölçüler Tablo 5.2'de belirtilen değerlerinde sabit tutulmuştur. Bu boyut değişkenlerinin her biri iki veya üç farklı ölçüde tanımlanmıştır. Belirlenen bu ölçü miktarlarına bağlı olarak yapılan 36 adet test kombinasyonu EK A'da detaylı olarak gösterilmiştir. Her bir

kombinasyon, kendisini belirleyen, test parametrelerinin "_" simgesiyle birleştirilmesi suretiyle ($d_D_{iç}_l_\beta$) kodlandırılmıştır. Örnek olarak,

0_18_5_0

numunesi için, birinci rakam grubu iç delik çapını, ikinci rakam grubu kalıp delik çapını, üçüncü rakam grubu kalıp delik boyunu ve dördüncü rakam grubu ise kalıp girişi koniklik açısını derece cinsinden göstermektedir. Yukarıdaki kodlamada; Numune içi delik çapı (d) 0 mm, Kalıp iç delik çapı ($D_{iç}$) 18 mm, Kalıp delik boyu (l) 5 mm ve kalıp girişi koniklik açısı (β) 0 derece olan test kombinasyonunu belirtmektedir. Diğer test parametreleri de (kol hızı, çubuk çapı, malzeme özellikleri vb.) değiştirilebilir olmakla birlikte bu test çalışmasında sabit değerde tutulmuşlardır.

Sabit tutulan deney parametrelerinden bir diğeri kütlelerin ilk hızlarıdır. Çarpışma başlangıcında kütlelerin bağıl hızı hızı ~8 m/s dir. Bağıl hız, tam plastik çarpışma sonrasında 0 m/s hıza kadar düşmektedir. Bu durumda, malzemenin çarpışma anında değişken bir deformasyon hızı oranına sahip olduğu söylenebilir. Deformasyon oranı Denklem 5.1'den ilk temas anı için 80 s^{-1} olarak hesaplanmaktadır.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_r}{L} \quad \frac{[m/s]}{[m]} = [s^{-1}] \tag{5.1}$$

Burada, deformasyon oranı $\dot{\varepsilon}$, kütlelerin rölatif hızlarının (v_r) parça boyu L'ye oranıdır. Kolların bağıl hızlarının eşitlendiği düşünüldüğünde bu değer 0 s^{-1} olarak hesaplanabilmektedir. Dolayısıyla serbest kütleli çarpışmaların veri incelenmesi aşamasında, malzemenin deformasyon oranının 80 s^{-1} ile 0 s^{-1} arasında değiştiği göz önüne alınmış ve kütleler arasındaki hız transferi ve etki kuvvetlerinin yorumlanmasında bu hususa dikkat edilmiştir.

Dinamik yüklemeli test çalışmalarında, literatürde daha önce kullanımına rastlanmayan ve çift kollu sarkaç prensibine göre hazırlanan çarpışma sistemlerinin benzetimlerinin yapılabileceği bir deneysel düzenek kurulmuş ve sarkaç kollarının konum-zaman bilgileri toplanmıştır. Bu konum-zaman bilgilerinden, kütlelerin hız

bilgileri ve Kinetik Enerji bilgileri türetilmiştir. Çarpışma öncesi ve sonrasındaki sisteme ait toplam kinetik enerji miktarları karşılaştırılarak çarpışma sonrasındaki sönümlenen enerji miktarı hesaplanmıştır. Sönümlenen enerji, kompozit malzemenin deformasyonu ile oluştuğu için, doğrudan malzemenin sönümlediği enerji olarak alınmıştır. Ayrıca momentum yasaları doğrultusunda çarpışma öncesi ve sonrasındaki hızlardan çarpışan cisimler arasındaki çarpışma katsayıları hesaplanmıştır. Bulunan büyüklükler her bir numune için tablolar ile belirtilmiştir. Böylece silindirik kesitli hazırlanmış numune çubukların enerji sönümleme karakteristikleri belirlenmiştir. Bu test metodu prensip itibariyle silindirik kesitli çubuk malzemelerin, zorlamalı olarak kendisinden daha dar kesitli deliklerden geçirilip tabaka ayrılması ve fiber kopması hasarlarına maruz tutulmalarına dayanmaktadır. Test malzemesinin deforme olması süresince oluşan reaksiyon kuvveti tedrici olduğundan enerji sönümlenmesi işi istenilen biçimde gerçekleşmiştir.

Dinamik yükleme altında, ilk hareketine yukarıdan başlayan birinci kolun sıfır noktasına yani malzemeye temas anına ulaşmasıyla birlikte reaksiyon kuvveti oluşmaya başlamaktadır. Önce, malzeme üzerine elastik sınır içerisinde alabileceği yükü almakta sonrasında ise plastik deformasyondan başlamak üzere yüksek deformasyona yani malzeme hasarına maruz kalmaktadır. Bu hasar mekanizmalarına ait deformasyon aşamalarının tam olarak açıklığa kavuşması için yapılacak detaylandırmalar ileride yapılacak proje çalışmalarıyla mümkün olacaktır.

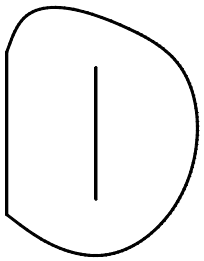
5.2.1 Reaksiyon kuvveti – Zaman değişimlerinin incelenmesi

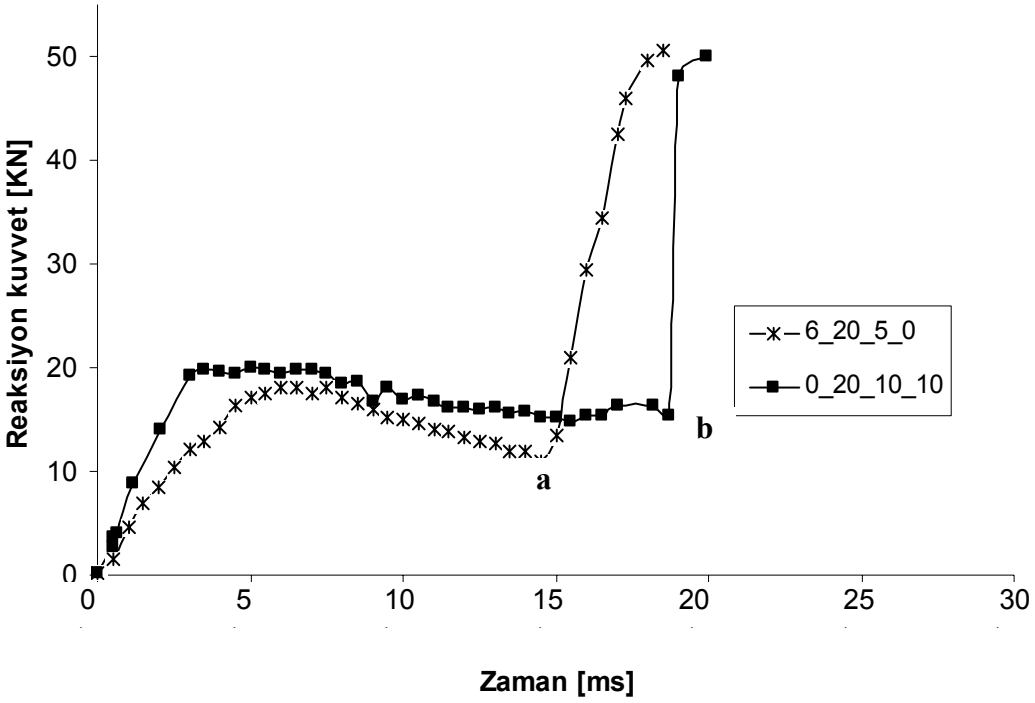
Test sonuçlarının incelenmesinde temas anı, deformasyonun başlangıç noktası olarak alınmıştır. Yük hücresi ile ölçülen reaksiyon kuvvetleri için malzeme ve kalıp geometrilerine bağlı olarak farklı karakteristikler sergilediklerini söylemek mümkündür. Reaksiyon kuvvetleri, 36 adet olan test kombinasyonlarının tümü için incelenmemiştir. Bunun nedeni, temas süresi boyunca oluşan reaksiyon kuvvetlerinin ortalaması olan impulsif kuvvetlerin momentum denklemlerinden hesaplanabiliyor olmasıdır. Yük hücresinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri, hesaplanılan impulsif kuvvetlerinin geçerliğini teyit etmek ve testteki kombinasyonların içinden diğerleriyle ciddi farklılık gösteren testlerin yorumlanmasını kolaylaştırmak için

kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan kombinasyonlara ait Reaksiyon kuvvet-Zaman değişim eğrileri, geometrik faktörlerin etkilerini açıklayacak şekilde sunulmuşlardır.

5.2.1.1. Kesit daralma etkisinin incelenmesi

Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerden görülmüştür ki, numune çapı (D) ile kalıp delik çapı ($D_{iç}$) ölçülerine ait boyut farkı (Şekil 5.12) test konfigürasyonlarına ait SES oranları açısından önem arz etmektedir.



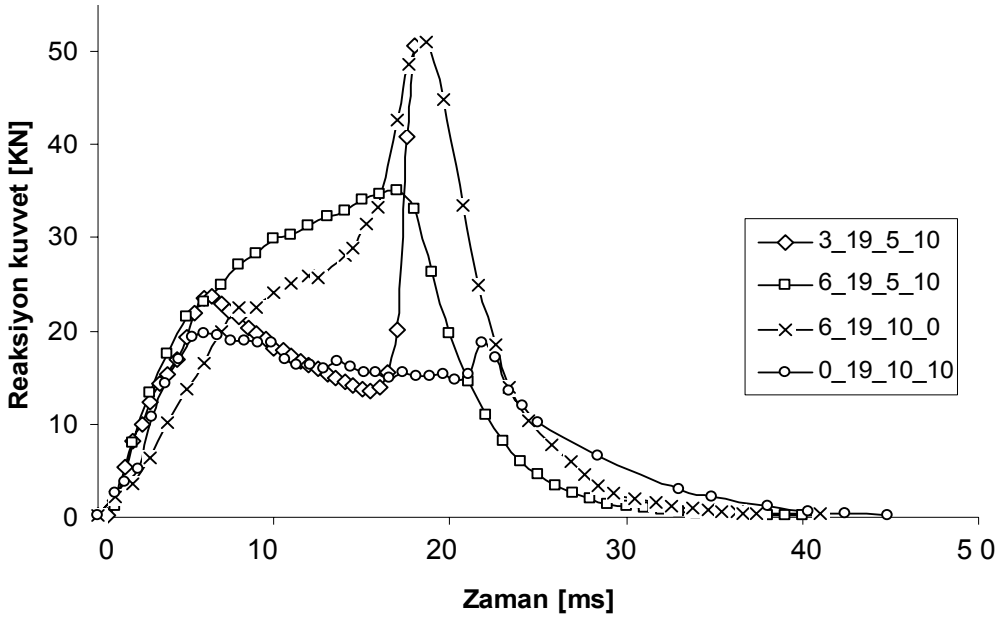


Şekil 5.13: t=0.75 mm olan deneylere ait örnek Reaksiyon kuvvet-Zaman değişimleri

Dinamik çarpışma koşulu için yüksek reaksiyon kuvvetlerin oluşmadığı görülmektedir. Bu durumda malzemenin sönümlediği enerji miktarı düşmektedir. Şekil 5.13'de görüldüğü gibi reaksiyon kuvvet eğrilerinin davranışı Şekil 5.13 deki (a) ve (b) noktalarında bittiğini ve malzeme tutucu aparat ile diğer koldaki karşılığı olan yük hücresine bağlı çelik takozun temas ettiklerini göstermektedir. Kompozit çubuk malzemeden sonra demir takozun temas etmesinin hız değişimlerine etkisi EK-B' de verildiği gibi yapılmıştır.

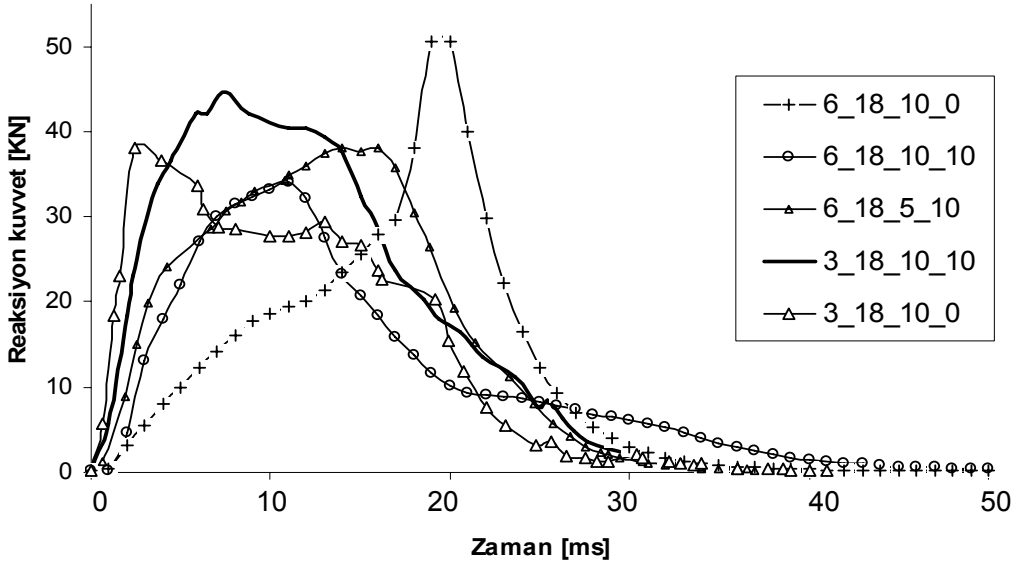
Kalıp iç delik çapı 19 mm olması durumunda 1.75 mm çap farkı oluşması sonucunda kompozit çubuk numunelerin maruz kaldığı basma kuvvetinin zamana göre değişimleri Şekil 5.14'de gösterilmektedir. 19mm'lik kalıp iç delik çapı için elde edilen veriler incelendiğinde, dinamik çarpışma koşulu için çok farklı karakteristiklere sahip kuvvet eğrilerinin olduğu görülmektedir. Burada, 0_19_10_10 numunesine ait eğri incelendiğinde, aniden yaklaşık 20 kN'a çıkan bir reaksiyon kuvvetin ardından, bu kuvvetin ortalama 17 kN ile sabit kaldığı görülmektedir. Bu malzemeye ait test parçaları incelendiğinde test numunesinin bir miktar kalıp içine girerek kırıldığı, ancak kalıp kanalında aşırı sıkışan malzemeden dolayı kalıp içine

giremeyen kısmının ise tabaka ayrılması modu ile deforme olduğu gözlenmiştir. Bu olay delik açılmamış numunelerde sıklıkla görülmüştür. 6_19_10_0 numunesinde, reaksiyon kuvvet çizgisinin sürekli olarak arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, kanal eğim açısı olmayan malzemelerde sıklıkla gözlemlenilen bir durum olan; malzemenin bir kısmının kanal giriş kısmında doğal bir eğim açısı oluşturmasıdır. Ancak malzeme boyunun kafi gelmemesinden ve kalıp iç delik çapının yüksek radyal sıkıştırma kuvvetlerini oluşturacak kadar küçük olmamasından dolayı iki kütlenin temasına engel olunamamaktadır. Burada numune delik çapının büyük olması, radyal kuvvetlerin yüksek miktarlara ulaşamamasının bir diğer nedeni olarak gösterilebilir. Şekil 5.14'te görülen 6_19_5_10 numunesi, kalıp delik çapı 19 mm olan numuneler içerisinde görülen ideal çarpma karakteristiklerinden birisini vermektedir. Reaksiyon kuvvetinin temas anıyla birlikte tepe noktasına çıkarak malzeme boyunca az bir artışla devam etmiştir. Daha sonra hareket iletiminin tamamlanmasıyla birlikte kütlelerin birbirlerinden ayrılmaları esnasında ise reaksiyon kuvvet eğrisinin parabolik olarak azaldığı ve sıfıra ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.14: t=1.75 mm olan deneylere ait reaksiyon kuvveti-zaman değişimi

Şekil 5.15'de kalıp iç delik çapı 18 mm olması durumunda 2.75 mm çap farkı oluşması sonucunda farklı karakteristikler gösteren beş farklı numuneye ait olan deney sonuçları gösterilmektedir. 6_18_10_0 kombinasyonlu numune, kanal girişinde eğimin olmadığı çarpışma karakteristiklerinde sıklıkla görülen bir davranış sergilemektedir. Ancak kalıp içi delik çapının 18 mm ve kanal boyunun 10 mm olması yüksek radyal kuvvetlerinin oluşmasını sağlayarak malzemenin gerekli enerjiyi sönümlediğini göstermektedir. 3_18_10_10 ve 6_18_5_10 numunelerine ait kuvvet eğrileri ideal reaksiyon kuvveti karakteristiklerine sahiptir. 3_18_10_0 Numunesinde ise, ani malzeme sıkışmasıyla birlikte malzemenin kalıp önünde kalan kısmı tabaka ayrılması modu ile deforme olmuştur. 6_18_10_10 Numunesinde ise uzun süreli bir deformasyon görülmektedir. Bu numune tam boy boyunca deforme olmuştur. Grafikler incelendiğinde bir çok numunede yüksek ve devamlı reaksiyon kuvvetlerinin oluştuğu ve en iyi sönümleme performansının genellikle kalıp iç çapı 18 mm olan deneylerden elde edildiği gözlenmiştir.



Şekil 5.15: t=2.75 mm olan deneylere ait Reaksiyon kuvvet-Zaman değişimi

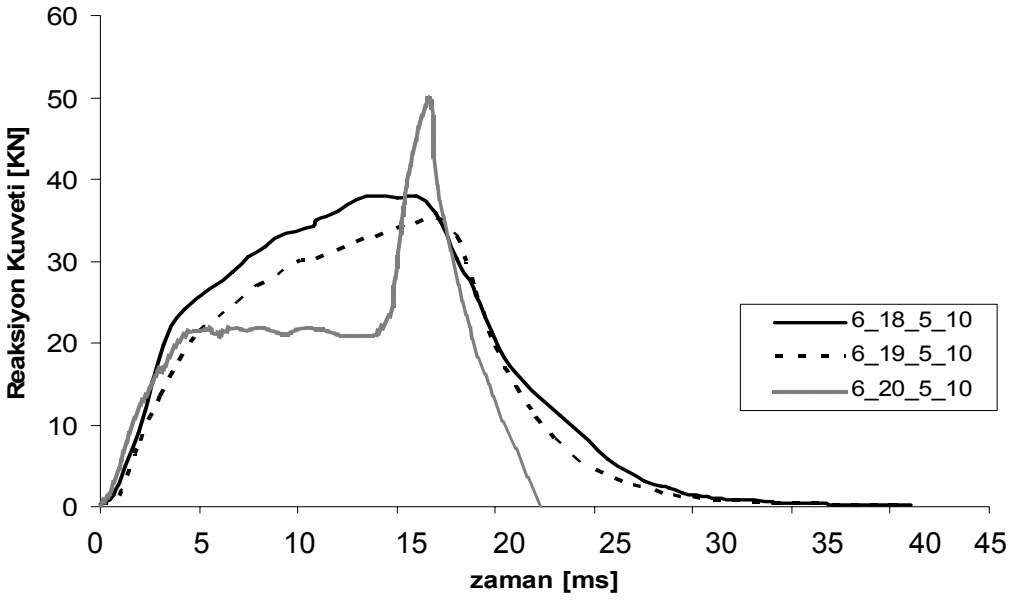
Ancak burada şu nokta vurgulanmalıdır ki; numuneden numuneye göre deformasyon boyu değişmektedir. Dolayısıyla çarpışma süresi, malzemenin tam boyu için değil sadece deformasyona uğrayan boyu için geçerlidir. Yani malzemelerin benzer

çarpışma sürelerinin olmasına rağmen deformasyon boyları değişkendir. Bu durum benzer sürelerde farklı kuvvet eğrilerinin oluşumunu açıklamaktadır.

Ayrıca enerji hesaplamalarında reaksiyon kuvveti az olan bazı numunelerin, reaksiyon kuvvetinin yüksek olduğu numuneler kadar enerji sönümleyebildiği görülmüştür. Bu durum da yine farklı malzeme boylarının deformasyonuyla açıklanabilmektedir.

Bu incelemelere ek olarak sabit bir konfigürasyonda oluşan çap farkı etkisine ait örnek inceleme Şekil 5.16'da yapılmıştır.Şekil 5.16, kalıp delik çapı ile numune çapı farkının etkisinin yalın bir şekilde ortaya koymaktadır. Çizdirilen eğrilerin ait oldukları konfigürasyonlar, 6_X_5_10 numuneleridir. Burada "X" değişken olan çap ölçülerini ifade etmektedir.

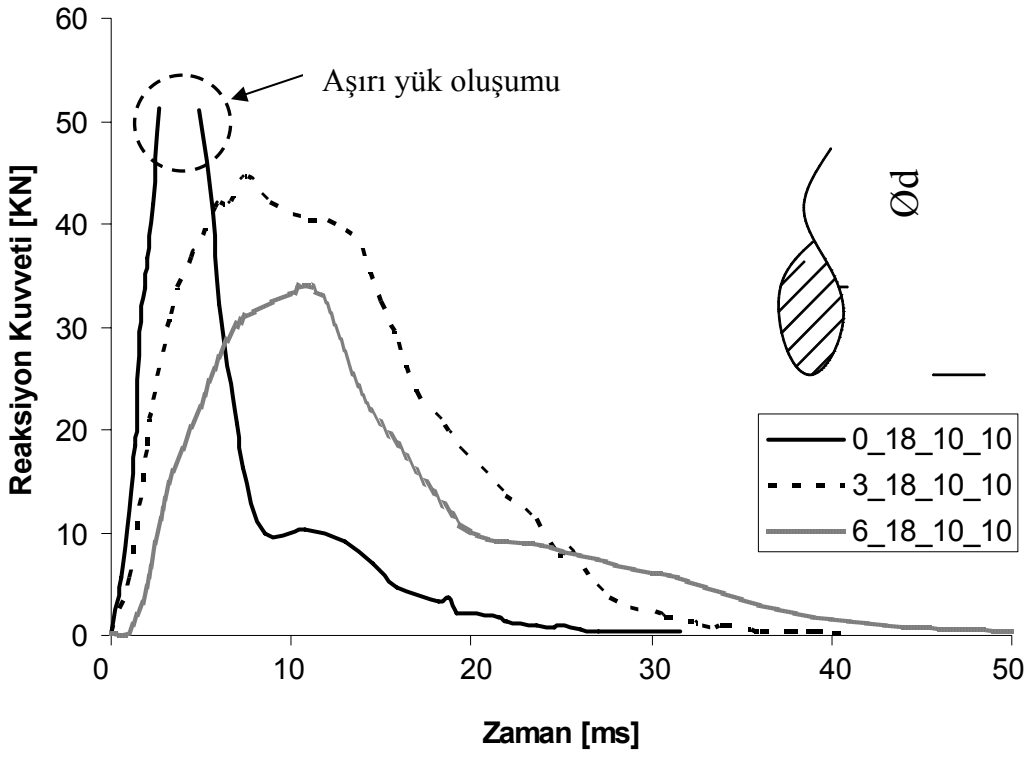
Şekil 5.16'dan çap fakının küçülmesi halinde enerji sönümleme karakteristikleri açısından bir yetersizlik oluştuğu görülmektedir. Çap farkının en düşük olduğu 6_20_5_10 numunesinde çarpışan kütlelerinin, aradaki sönümleme elemanının deformasyonu takiben temas durumuna geçtikleri de görülmektedir.



Şekil 5.16: Sabit 6_X_5_10 konfigürasyonlarında değişen çap farkının etkisi

5.2.1.2. Numune iç delik çapı (*d*) etkisi

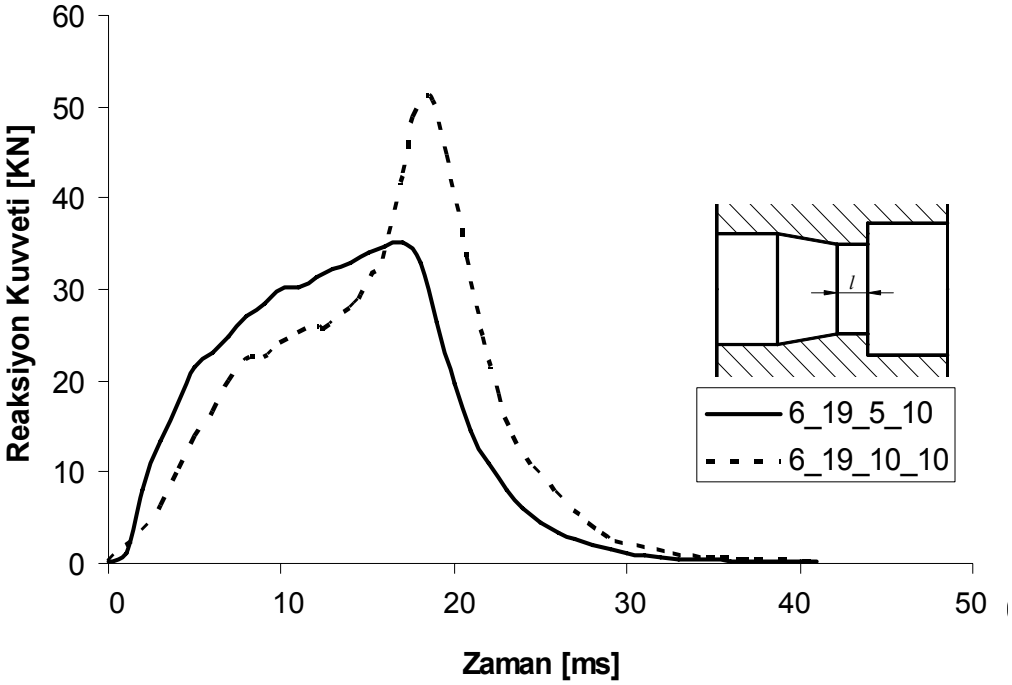
Numune içine açılan deliklerin, çarpışma karakteristiklerine ait etkileri X_18_10_10 kombinasyonları için Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Delik çapının küçülmesiyle birlikte reaksiyon kuvvetlerinde önemli miktarda artış olduğu görülmektedir. Ancak 0_18_10_10 numunesinde olduğu gibi delik çapının olmaması sonucu delikte malzemenin ilerlememesi numunede ani kırılma hasar tipinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda malzeme düzgün bir sönümleme yapmadan, anlık olarak çok yüksek bir reaksiyon kuvvet oluşmasının ardından katastropik hasara uğramaktadır. Yük eğrisinin kesintiye uğramasının nedeni ise o bölge içinde ölçme sisteminin ölçüm aralığının aşırı yük değerlerini okuyamamasıdır.



Şekil 5.17: Sabit X_18_10_10 konfigürasyonların için değişen numune iç delik çapının etkisi

5.2.1.3 Kalıp delik uzunluğunun (*l*) etkisi

Kalıp delik uzunluğunun, reaksiyon kuvvet değişimi üzerindeki etkisi Şekil 5.18 'den görülebilmektedir. Delik boyu, tutunmayı artırıcı rol oynamakta ve daha yüksek reaksiyon kuvvet oluşumunu sağlamaktadır. 6_19_X_10 numaralı kombinasyonlarda azalan delik boyu ile birlikte reaksiyon kuvvetinde bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş sonucunda yeterince enerji sönümlenmesi sağlanamamış ve kütlelerin birbirlerine temasına neden olmuştur.

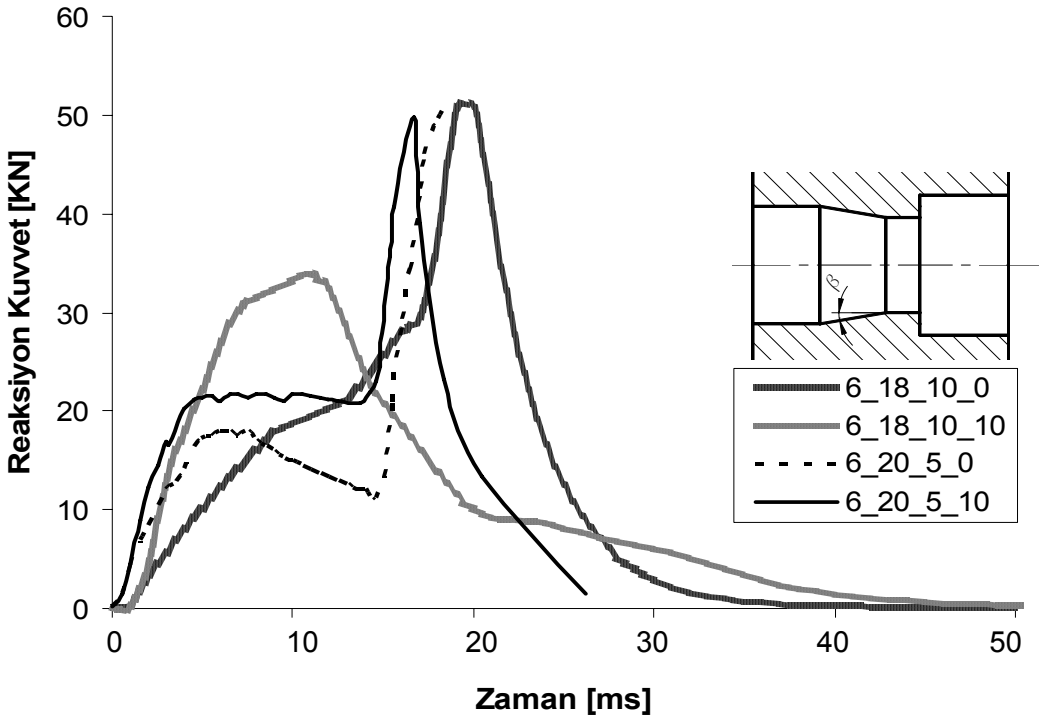


Şekil 5.18: Kanal boyu mesafesinin (*l*) etkisi

5.2.1.4 Kalıp giriş açısı (*β*) etkisi

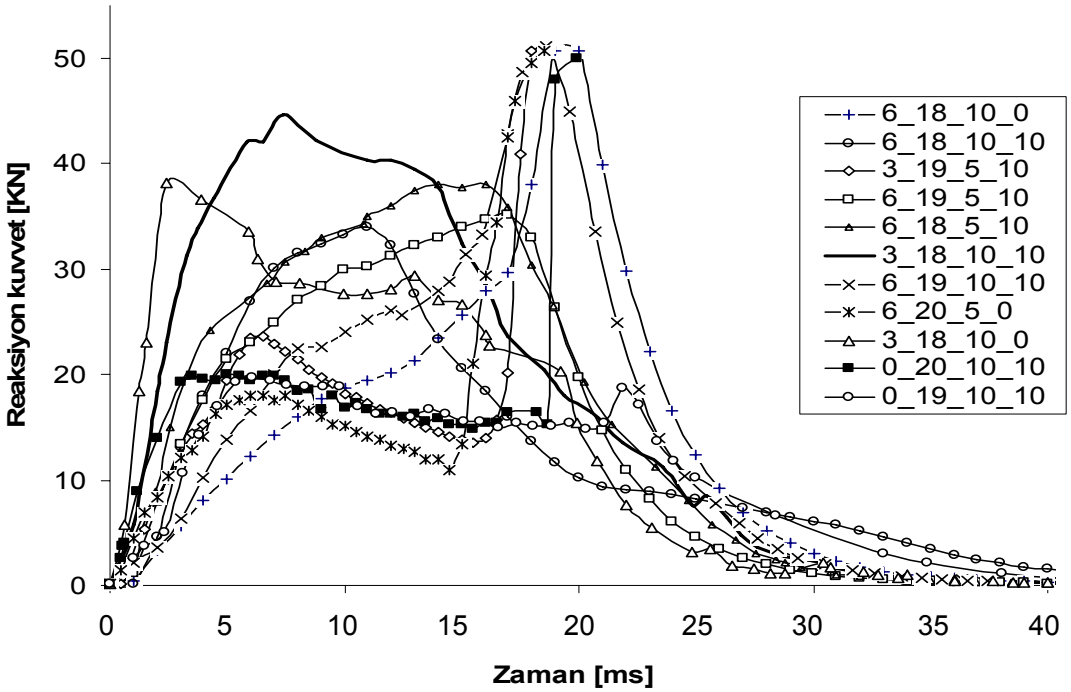
Şekil 5.19'da kalıp giriş açısının reaksiyon kuvvet oluşumundaki rolü görülebilmektedir. 6_18_5_X ve 6_20_5_X numaralı kombinasyonlar için reaksiyon kuvvet değişim eğrileri incelendiğinde, giriş açısının olması halinde numunelere ait enerji sönümleme karakteristiklerinde iyileşme olduğu görülmektedir. 6_18_10_X kombinasyonlarında bu durum, çok daha belirgin olarak görülmektedir. Reaksiyon kuvvetin düzgün bir şekilde devam ettiği dolayısıyla daha çok enerji sönümlemenin gerçekleştiği sonucuna varılabilir. Bu durumdaki en önemli etken, faturalı kalıp

girişinde malzemenin ilk giriş kısımlarının fatura önünde yığılmasıdır. Yığılma sonucu kalıp girişi doğal bir eğime sahip olduktan sonra numunenin kalan boyu için radyal baskı kuvvetleri ve reaksiyon kuvveti oluşabilmektedir. 6_20_5_X numuneleri için ise bu durum reaksiyon kuvvetin sabit biçimde devam etmesiyle sonuçlanmaktadır. Ancak her koşul için eğim açısıyla birlikte daha düzgün bir reaksiyon kuvvet karakteristiğinin sağlandığını söylemek mümkündür.



Şekil 5.19: Kalıp giriş açısının (β) etkisinin incelenmesi

Reaksiyon kuvvet ölçüm testlerinden elde edilen verilerin, enerji sönümleme karakteristikleri açısından birbirlerinden farklılık arz eden farklı numune konfigürasyonuna ait reaksiyon kuvveti değişim eğrileri Şekil 5.20'de sunulmaktadırlar. Şekil 5.20'de genelde çap farkı ve kanal uzunluğu reaksiyon kuvvet eğrilerinde artırıcı etki yaparken, kanal giriş eğim açısı ve numune içi delik çapı bu kuvvetlerin devamlılığını sağlamaktadır. Bir diğer dikkat çekici durum ise, reaksiyon kuvvetlerinin düşük seviyede seyrettiği 0_20_10_10 gibi numunelerin, reaksiyon kuvveti değerleri ideal biçimde gelişmekte ve devam etmektedir. Ancak ilk enerjinin yüksek oluşu, metal takozların temasına neden olmaktadır.



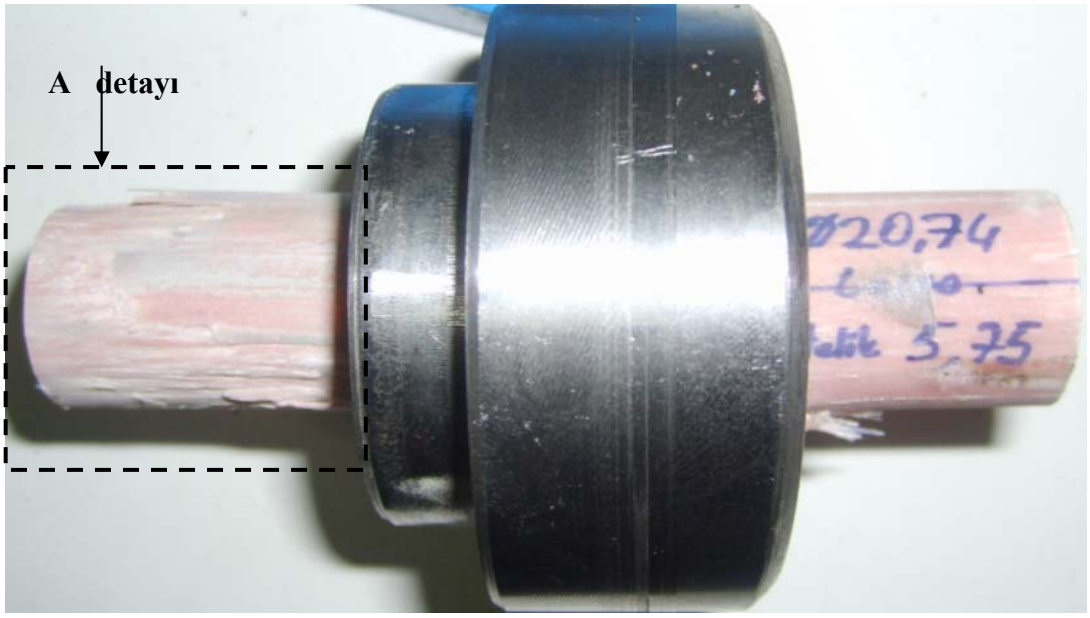
Şekil 5.20: Reaksiyon kuvvetlerinin zamana göre değişimi

5.2.2 Numunelerde oluşan hasar tipleri

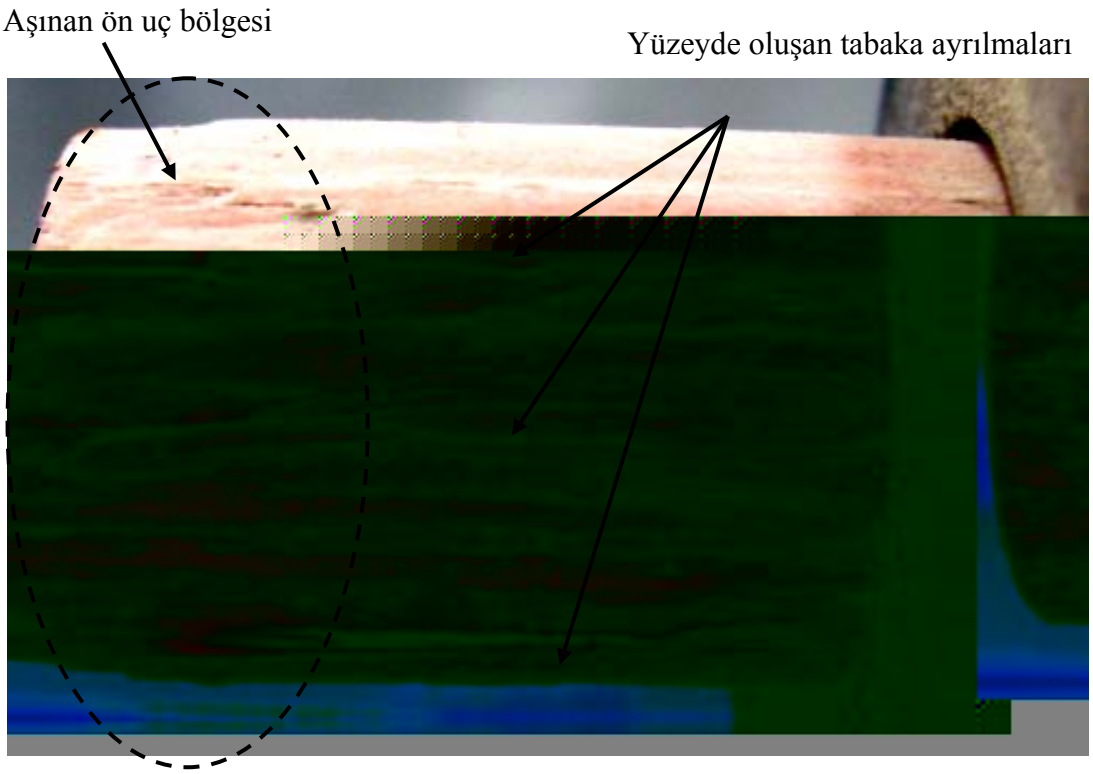
Numunelerde görülen hasar tipleri genellikle zamana bağlı reaksiyon kuvvetlerinin farklılığıyla paralellik göstermektedir. Yani benzer kuvvet karakteristiklerine sahip çarpışmalarda yine benzer hasar tipleri görülmüştür. Oluşan hasar tipleri iki gurupta incelenmiştir.

5.2.2.1 1.Tip hasar

Kalıp giriş eğimi olmayan deney guruplarında, en sık görülen hasar tipidir. Şekil 5.21-5.24 bu hasar oluşumlarını detaylı olarak göstermektedir. Detayları inceleme amacıyla seçilen örnek kombinasyon 6_18_5_0 numunesine aittir. Şekil 5.21'de malzemenin kalıba giriş anında ön uç köşelerinin aşırı şekilde aşındığı ve yüzeyde tabaka ayrılmalarının oluştuğu görülmektedir.

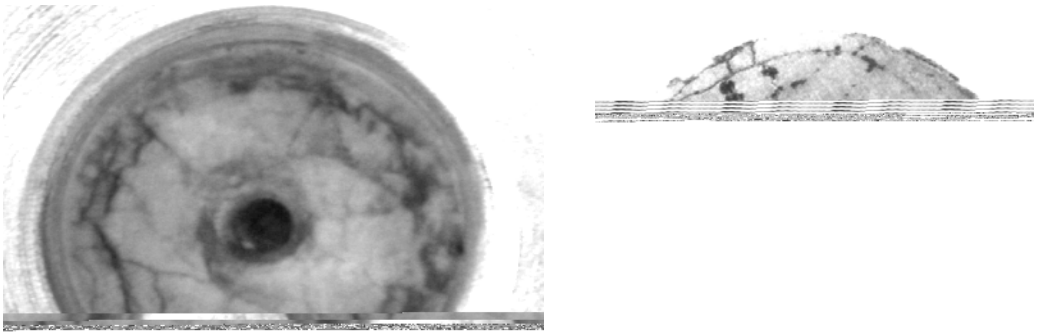


Şekil 5.21: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar oluşumu: genel görünüş :Numune ve kalıbın testten sonraki görünüşü



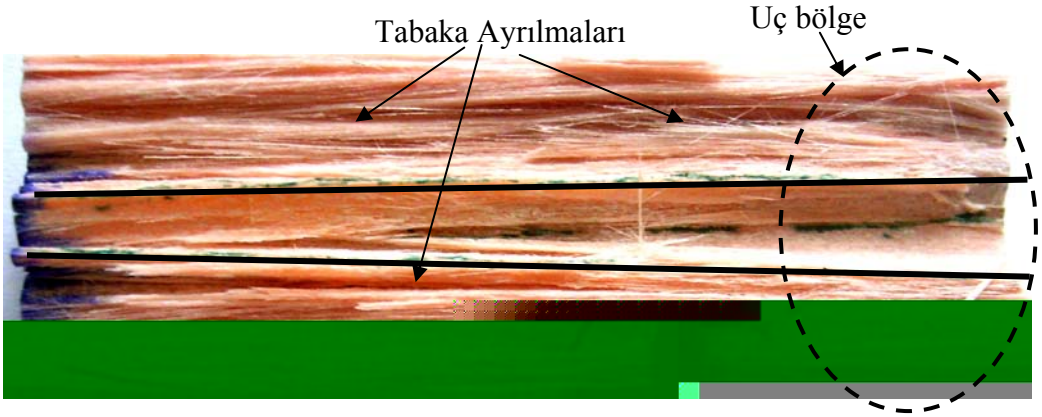
Şekil 5.22: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar oluşumu: Şekil 5.21' de A detayı

Deneyden sonraki aşamada, malzemenin kalıba girmeyen artık kısmı kesilmiştir. Malzemenin kalıp içerisinde kalan ve artık kısmın kesilmesiyle açığa çıkan çatlaklar yüzeye sıvı penetrasyon maddesi sürülüp zımparalanarak Şekil 5.23'te görüldüğü gibi belirginleştirilmiştir. Kalıp kanalı içerisinde sıkışan kompozit çubuk kesitinde, kalıp içerisinden çıkarıldıktan sonra bir genişleme görülmektedir. Bu durum Şekil 5.23.a ve 5.23.b'de görülen iç delik ve radyal çatlaklardaki gözle görülür derecedeki genişlemeyle de anlaşılmaktadır. Şekil 5.24'te ise, malzemenin kalıptan çıktıktan sonra boyuna kesit alınmış hali görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 5.23: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar: a)- Kalıp içerisinde sıkışan numunenin enine kesit görünüşü, b)- Kalıptan çıkarılan numunenin enine kesit görünüşü

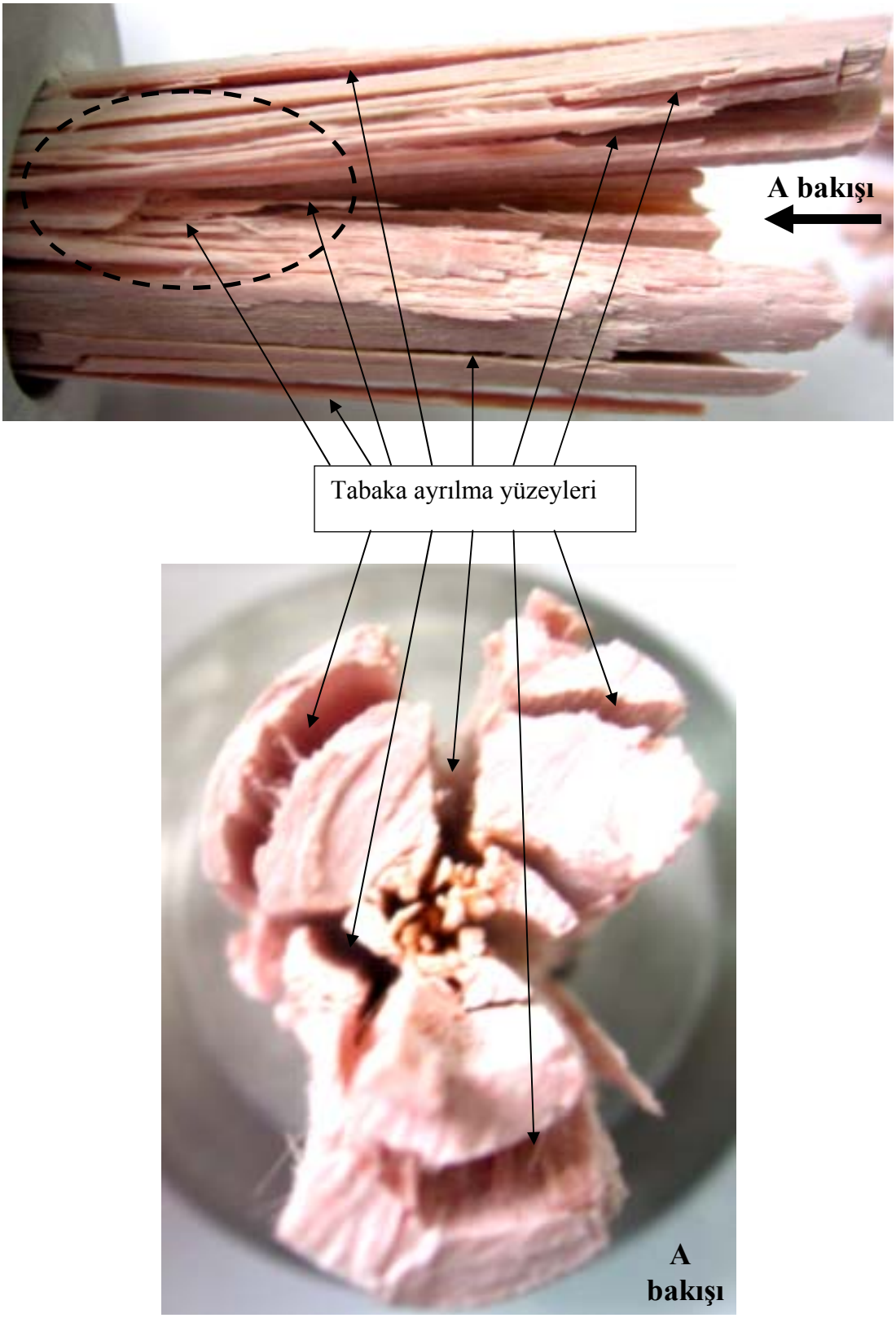


Şekil 5.24: Dinamik çarpma sisteminde 1.Tip hasar : Numunenin boyuna kesit görünüşü

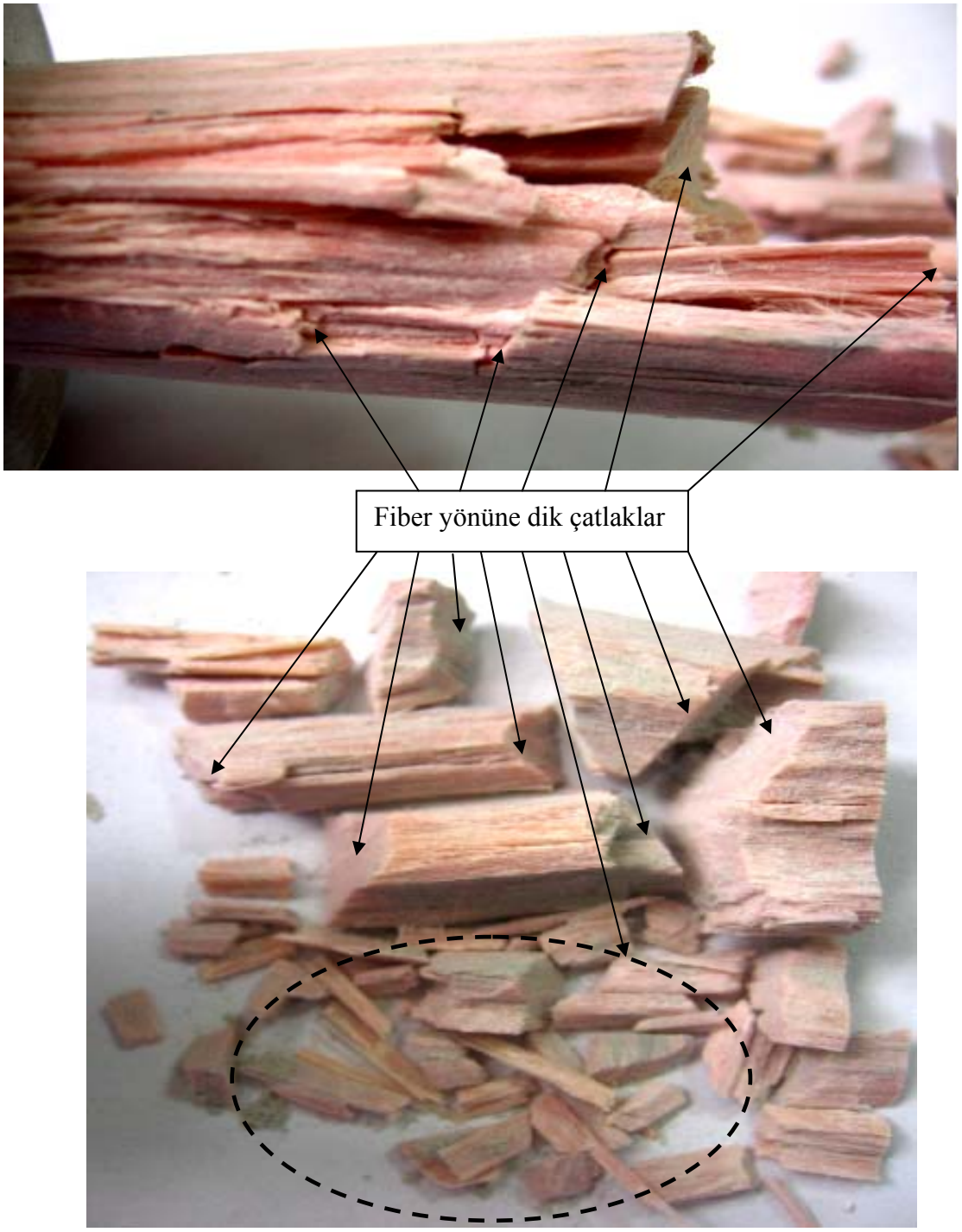
Şekilden malzemenin gittikçe sıkışan bir yapısı olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun, kalıp giriş açısı olmayan malzemelerde, malzemenin uç bölgesinin ilk zorlamayla birlikte aşınmasının bir nedeni olduğu söylenebilir. Çünkü uç bölgesinden kopan parçacıklar kalıp girişindeki fatura kısmında yığılmakta ve doğal bir eğim açısı oluşturmaktadırlar. Bu eğim açısı oluştuktan sonra malzeme radyal kuvvetlerine maruz kalmakta ve deforme olmaktadır. Bu tip çarpışmalarda enerji sönümleyici ana etken radyal baskı ile oluşan sürtünme kuvvetleri ile bu radyal kuvvetlerin oluşturdukları ayrılma yüzeyleridir.

5.2.2.2. 2.Tip hasar

2.Tip hasar oluşumu, kalıp iç delik çapının 18 mm ve kalıp giriş kanalının eğimli olduğu test numunelerinde en sık rastlanılan hasar tipi olarak belirlenmiş olup literatürde rastlanılmayan bir hasar mekanizmasını tanımlamaktadır. Çünkü literatür taramasında belirtildiği gibi, literatürdeki çarpışma testlerinde açıklanan hasar mekanizmalarında, tabaka ayrılması ve fiberlerin mikro burkulmalar göstermesiyle oluşan fiber kırılmaları sonucu enerji sönümlendiği açıklanmaktadır. Ancak 2.Tip hasar oluşumunda, sürtünme kuvvetleri ve ayrılma yüzeylerine ek olarak farklı bir kırılma tipi daha görülmüştür. Malzemelerin fiberlere dik yönde bir çok çatlak içerdiği 2.Tip hasar, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da detaylı olarak 3_18_10_10 kombinasyonu için gösterilmektedir.



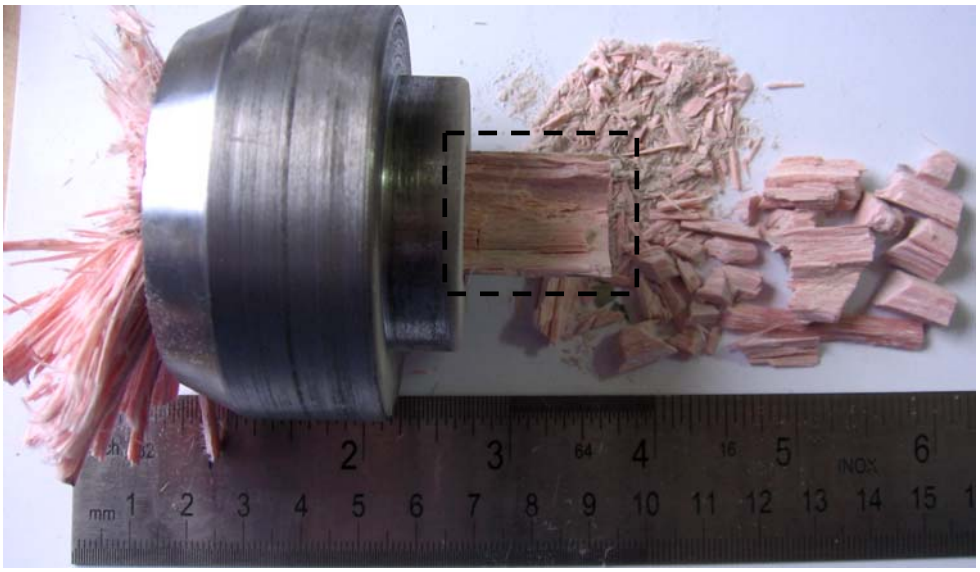
Şekil 5.25: 2.Tip hasarda tabaka ayrılmaları



Şekil 5.26: 2.Tip hasarda fibere dik çatlaklar

Daha önceki açıklamalarda da belirtildiği gibi malzeme kalıp kanalı girişinde ani kesit daralmasına ve radyal sıkıştırma kuvvetlerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle kalıp kanalı içerisinde ilerlemesi esnasında malzeme içerisinde ayrılma yüzeyleri oluşmaktadır. 2.Tip hasarda ise bu duruma ek olarak, daha sonraki aşamada ani kesit daralması ile malzeme boyunda oluşan uzamanın malzemeyi çekme kuvvetlerine

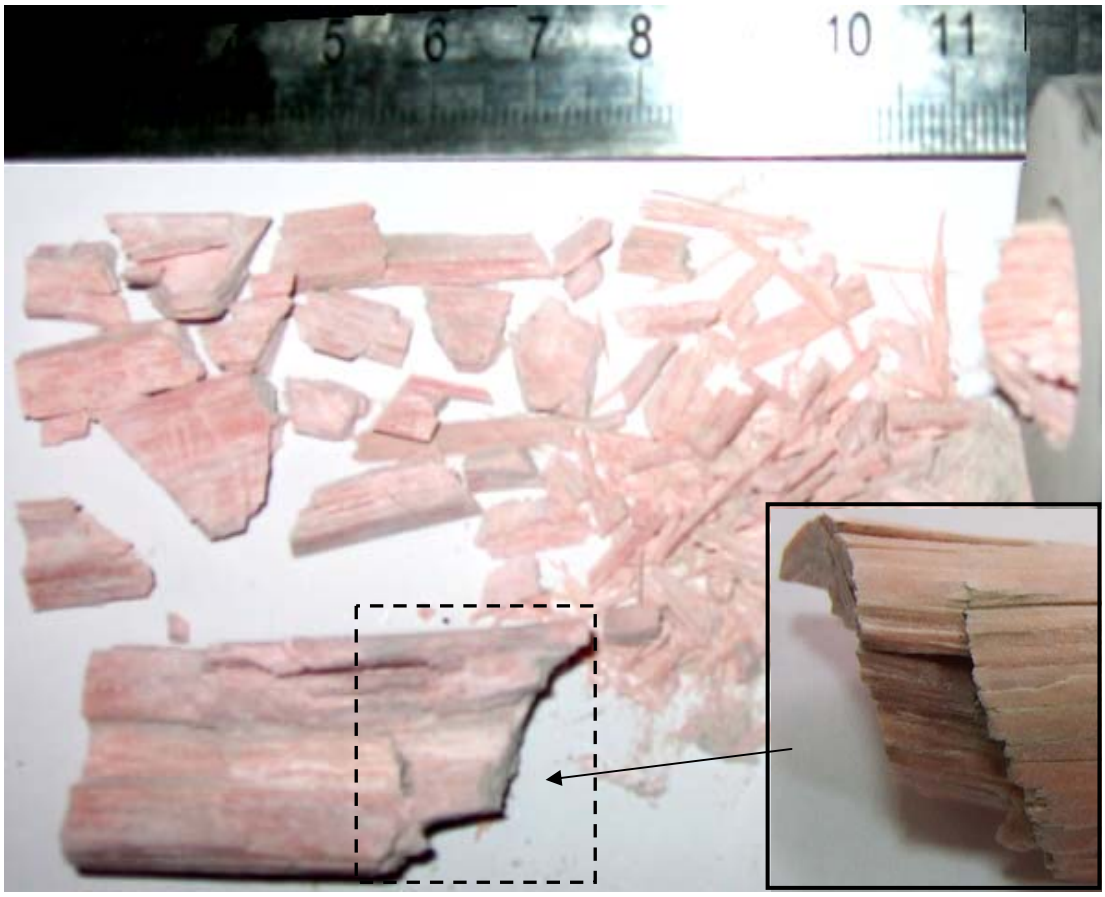
maruz bıraktığı söylenebilir. Bu çekme kuvvetleri ise tabakalara ayrılan malzeme içerisinde, tabakaların kopmasına sebep olan fiber yönüne dik çatlaklar oluşturmaktadır (Şekil 5.26). Fiber yönüne dik oluşan bu çatlakların fiberlere paralel yönde oluşmuş tabaka ayrılma yüzeyleriyle kesişmeleri sonucunda Şekil 5.26'da görüldüğü gibi malzeme küçük parçalara ayrılmaktadır. Şekil 5.27'de ise 0_19_10_10 numunesinin tabaka ayrılması ve 2.Tip hasar biçimlerine aynı anda maruz kaldığını göstermektedir. Şekil 6.28'de ise 3_19_10_10 numunesinin 2.Tip hasar ile deforme olduğu görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 5.27: Dinamik çarpma sisteminde 2.Tip hasar oluşumu: 0_19_10_10 numunesi



Şekil 5.28: Dinamik çarpma sisteminde 2.Tip hasar : 3_19_10_10 numunesi

Şekil 5.26-5.28'deki incelemelerden detaylı olarak anlaşılamayan bir diğer durum ise kırılan parçacıklar içerisinde de çok sayıda çatlağın oluşmasıdır. Şekil 5.27.a'da numunenin kalıptan çıkan kısmına ait, kesikli çizgi ile çerçeve içerisinde belirtilen bölgenin 10 kat büyütülerek çekilen detay resmi Şekil 5.29'da verilmiştir. Detay görüntü, kırılan parçaların da çok sayıda enine çatlak içerdiğini göstermektedir.

Şekil 5.29: 0_19_10_10 numunesinin 10 kat büyütülmüş detay görüntüsü

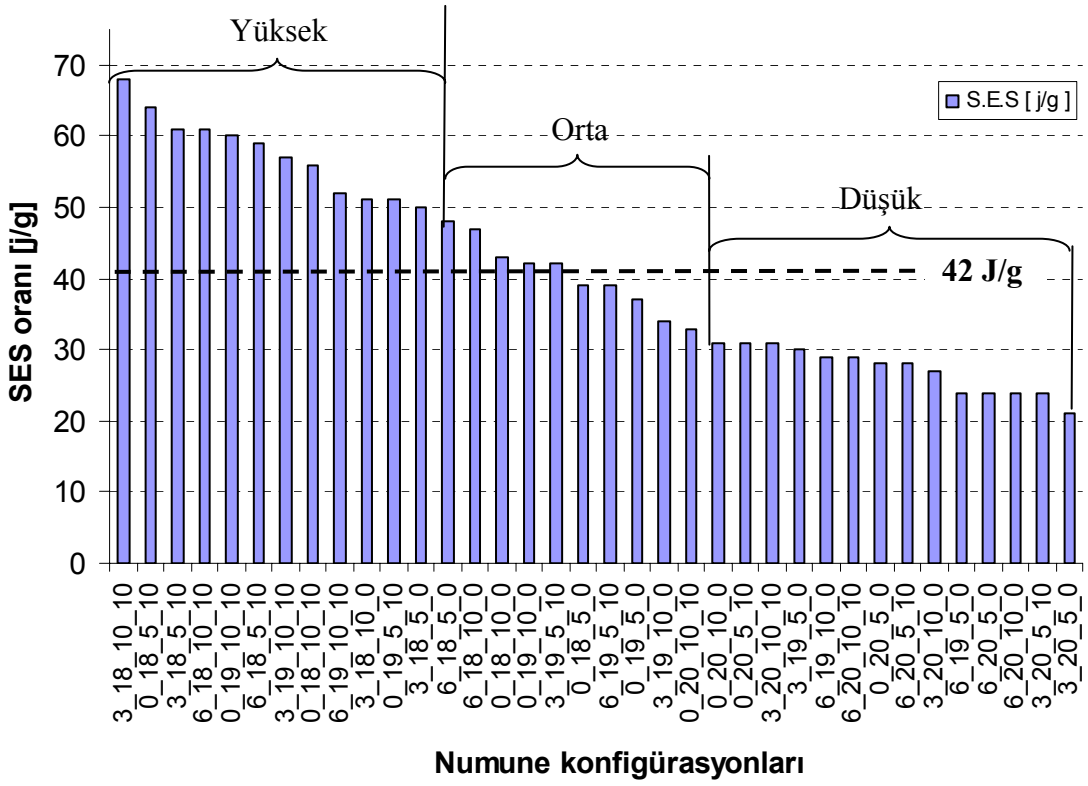
5.2.3 Test kombinasyonlarına ait çarpışma karakteristiklerinin belirtilmesi

Dinamik çarpışma testlerinden elde edilen konum-zaman değişimleri ile elde edilen hız bilgileri ve bu hız bilgilerinden momentum denklemleri ile analitik olarak hesaplanılan kütlelerin sahip oldukları momentum bilgileri, kütlelerin momentumlarının değişimine neden olan impulsif kuvvetler ve çarpışma öncesi ve sonrasındaki hızların bir fonksiyonu olan çarpışma katsayısı gibi büyüklükler hesaplanılarak Tablo 5.3'te verilmektedir.

Tablo 5.3 Kompozit numune kombinasyonları için elde edilen çarpışma karakteristikleri

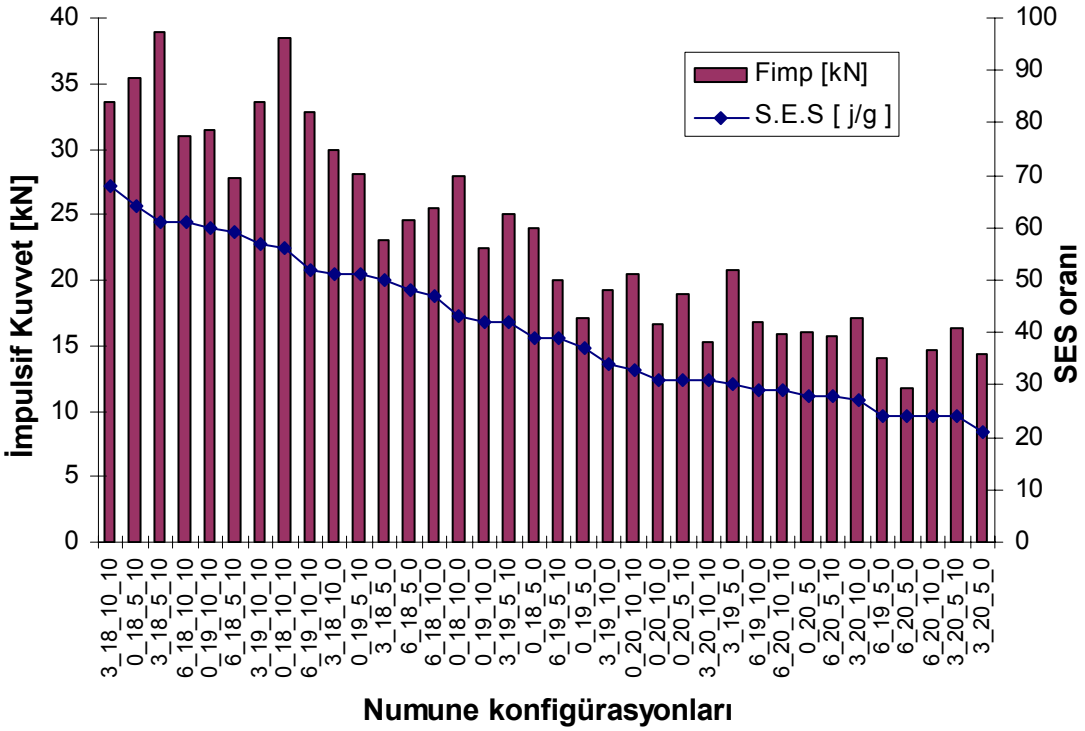
Konf No	Numune Kodu	v_1' [m/s]	v_2' [m/s]	e	F_{imp} [kN]	Es [j]	SES [j/g]
1	3_18_10_10	3.65	3.83	0.024	33.6	1174	68
2	0_18_5_10	3	4.7	0.221	35.44	1184	64
3	3_18_5_10	3.5	4.16	0.086	38.96	1223	61
4	6_18_10_10	3.55	3.9	0.047	30.96	1163	61
5	0_19_10_10	3.75	3.8	0.007	31.52	1197	60
6	6_18_5_10	3.7	3.75	0.007	27.76	1166	59
7	3_19_10_10	3.65	3.8	0.02	33.6	1165	57
8	0_18_10_10	3.63	3.8	0.023	38.4	1159	56
9	6_19_10_10	3.4	4.15	0.099	32.8	1185	52
10	3_18_10_0	3.6	4.25	0.083	30	1285	51
11	0_19_5_10	3.45	4.02	0.076	28.16	1165	51
12	3_18_5_0	3.28	4.82	0.19	23.04	1328	50
13	6_18_5_0	3.34	4.42	0.139	24.56	1240	48
14	6_18_10_0	3.8	4.01	0.027	25.44	1280	47
15	0_18_10_0	3.2	4.57	0.176	28	1228	43
16	0_19_10_0	3.2	4.4	0.158	22.4	1183	42
17	3_19_5_10	2.5	4.95	0.329	25.04	1040	42
18	0_18_5_0	3.45	4.32	0.112	24	1252	39
19	6_19_5_10	3.65	3.9	0.033	20	1196	39
20	0_19_5_0	3.2	4.62	0.182	17.12	1242	37
21	3_19_10_0	2.1	5.35	0.436	19.2	944	34
22	0_20_10_10	2.19	5.61	0.354	20.48	931	33
23	0_20_10_0	2.2	5.25	0.409	16.64	970	31
24	0_20_5_10	2.54	5.1	0.335	18.96	1088	31
25	3_20_10_10	3.4	4.42	0.13	15.2	1262	31
26	3_19_5_0	2.2	5.25	0.409	20.8	970	30
27	6_19_10_0	3	4.45	0.195	16.8	1121	29
28	6_20_10_10	3.1	4.82	0.217	15.84	1255	29
29	0_20_5_0	2.7	5.07	0.305	16	1150	28
30	6_20_5_10	2.2	5.25	0.409	15.68	970	28
31	3_20_10_0	2.1	5.35	0.436	17.12	944	27
32	6_19_5_0	2.4	5.21	0.369	14.08	1050	24
33	6_20_5_0	2.4	5.21	0.369	11.68	1050	24
34	6_20_10_0	2.2	5.25	0.409	14.64	970	24
35	3_20_5_10	2.2	5.25	0.409	16.4	970	24
36	3_20_5_0	2.2	5.25	0.409	14.4	970	21

Farklı geometrik etkenlere bağlı olarak kompozit çubuk numunelere ait SES oranı değerlerindeki değişim, en yüksek değerden en düşük değere göre Şekil 5.30'da verilmiştir. Dinamik yüklemeli testlerde, numunelere ait oluşan SES oranı değeri en yüksek 68 j/g olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte konfigürasyona göre değişen SES oranı değerinin en küçük 21 j/g olarak kaldığı görülmüştür. Şekil 5.30'da numune konfigürasyonları için elde edilmiş Dinamik yüklemeli dar kesit yöntemiyle yapılan testlerden elde edilen SES oranı değerleri, kompozit çubuk malzemesinin literatürdeki 42 j/g olan SES oranı değeriyle kıyaslanarak verilmiştir. Bazı numunelerde malzeme kendi enerjiyi sönümleme kapasitesine varamamıştır. Bu numunelerde, kalıp iç delik çapının 20 mm ve delik giriş açısının 0 derece olduğu dikkat çekmektedir. Yüksek SES oranı değerleri için ise, kalıp giriş eğim açısının olduğu ve numune ketsinin daralma miktarının yüksek olduğu numunelerden oluşmaktadır. Yine bu gurupta kanal boyunun uzun olduğu numunelerin çoğunlukta olduğu görülmektedir. Literatür çalışmalarında pultrusyon yöntemiyle üretilmiş cam elyafı takviyeli polimer matrisli kompozit çubuklar için belirtilen ve 42 j/g olan SES değerini 17 adet numunenin geçebildiği gözlenmiştir.



Şekil 5.30: Numune konfigürasyonlarına göre SES oranındaki değişim

Şekil 5.31'de her bir numune konfigürasyonuna ait SES oranı ve impulsif kuvvet değerleri gösterilmektedir. Şekil 5.31'den SES oranına bağlı olarak impulsif kuvvetlerde de bir artış olduğu görülebilmektedir. Ancak bazı numunelerde impulsif kuvvetlerin oldukça yüksek olmasına karşılık SES oranlarının yükselmediği görülmektedir. Bu durum, kalıp içerisinde sıkışarak çok yüksek pik değerine sebep olan malzemelerin yüksek SES değerine ulaşamamasıyla açıklanabilir. Ayrıca impulsif kuvvetler için şu nokta da belirtilmelidir ki; impulsif kuvvetler hız grafiklerinden elde edilmekte ve tüm temas süresi için hesaplanılmaktadır. Dolayısıyla, deneysel olarak ölçülen reaksiyon kuvvetleri impulsif kuvvetlere göre belirli oranlarda fazlalık göstermektedirler.

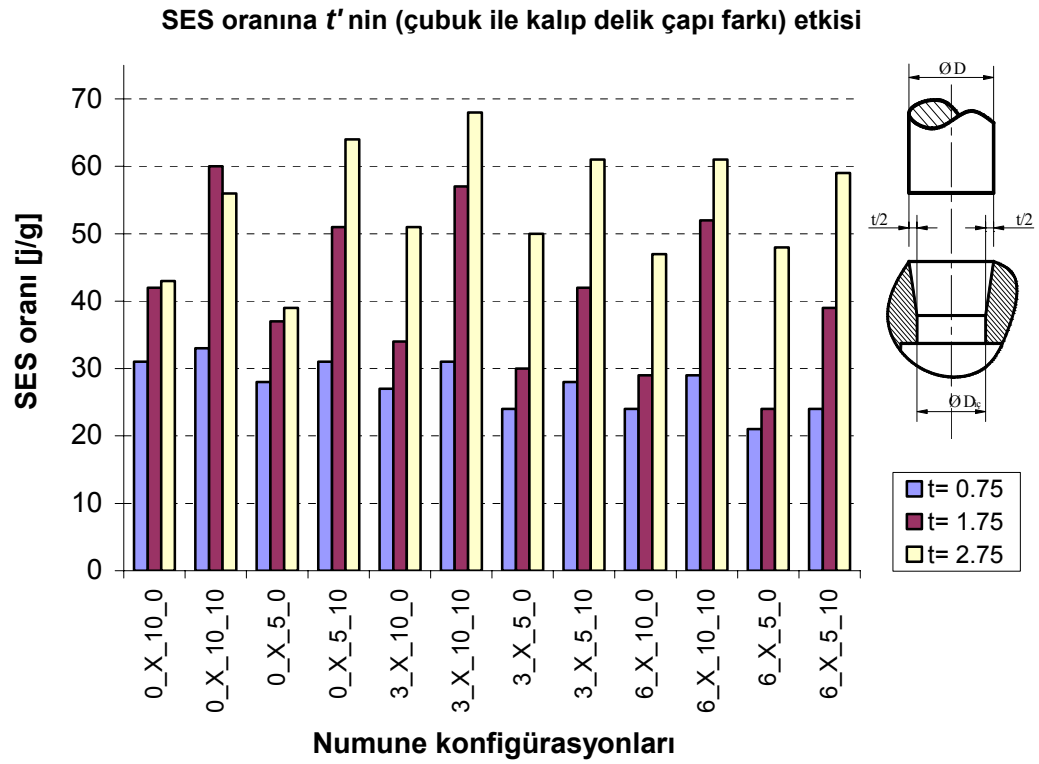


Şekil 5.31: İmpulsif kuvvetlerin SES oranına göre incelenmesi

5.2.3.1. SES oranında çubuk çapı ile kalıp delik çapı farkının etkisi

Kompozit çubuk çapı (D) ile kalıp iç delik çapı ($D_{iç}$) arasındaki fark miktarının (t) kompozit çubuk malzemelere ait SES oranlarına etkisi Şekil 5.32'de verilmektedir. Şekil 5.32'deki incelemede, kalıp iç çapının değişken ve diğer parametrelerin sabit olduğu toplam 12 adet karşılaştırma sunulmuştur. Böylece her bir karşılaştırmada, d,

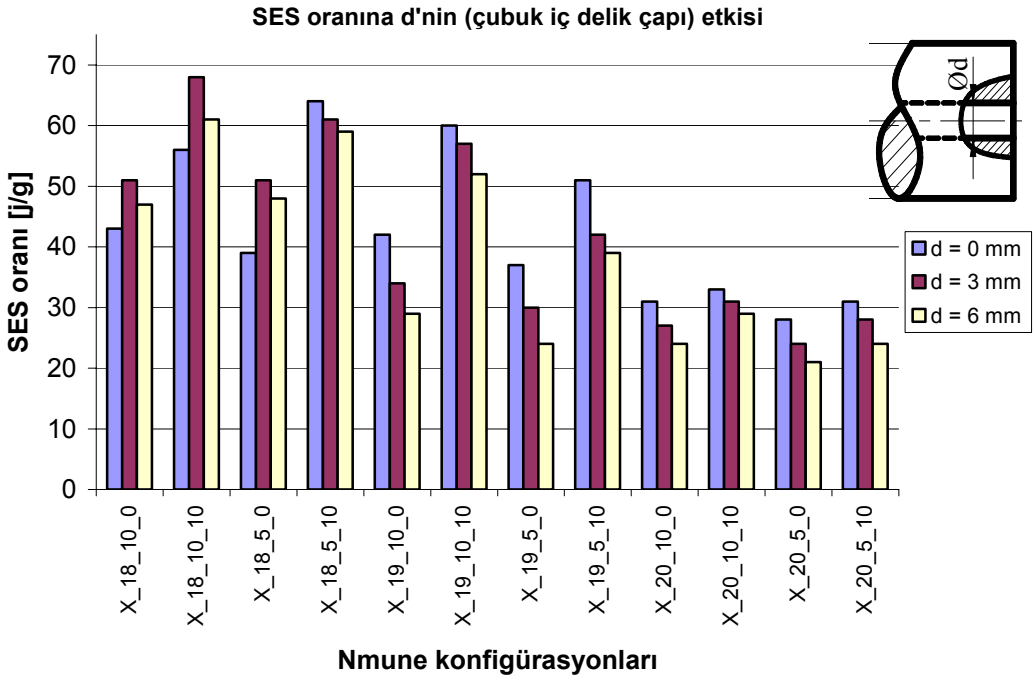
l ve β sabit tutularak t nin etkisi incelenmiştir. Numune isimlendirmelerinde kullanılan "X" sembolü, kalıp iç çapının sırasıyla18, 19 ve 20 mm olduğunu ifade etmektedir. İncelemede, t' nin SES oranına önemli etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, çap farkının 0.75mm ve 2.75 mm olduğu kombinasyonlarda, SES oranında ortalama %45 lik artış sağlamaktadır. Özellikle kalıp girişinin eğimli olması bu artışı %52'ye çıkarmıştır. Ancak çap farkındaki artışın, 0_X_10_10 numune konfigürasyonları için, 2.75 mm olması durumunda SES oranında bir düşüşe neden olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, malzemenin kesitten geçemeyecek kadar çok kalın olması ve kalıp girişinde sıkışıp düzgün bir enerji sönümleme karakteristiği gösterememesidir. Dolayısıyla, çubuk ile delik çapı farkının geometrik şartlara bağlı olarak bir üst limitinin olduğu anlaşılmıştır. Daralma etkisi enerji sönümlemede 2.Tip hasar oluşumuna etki eden en önemli bir parametre olarak görülmektedir. 3_X_10-10 ve 6_X_5_10 gibi sabit numune guruplarında daralma etkisi, SES oranının ani yükselmesi şeklinde kendini göstermektedir. 12 adet konfigürasyon incelendiğinde, çap farkı etkisi SES oranlarında doğrusal olmayan bir artış göstermektedir.



Şekil 5.32: SES oranında çubuk çapı ile kalıp delik çapı farkı (t) etkisi

5.2.3.2. SES oranına çubuk iç delik çapının (d) etkisi

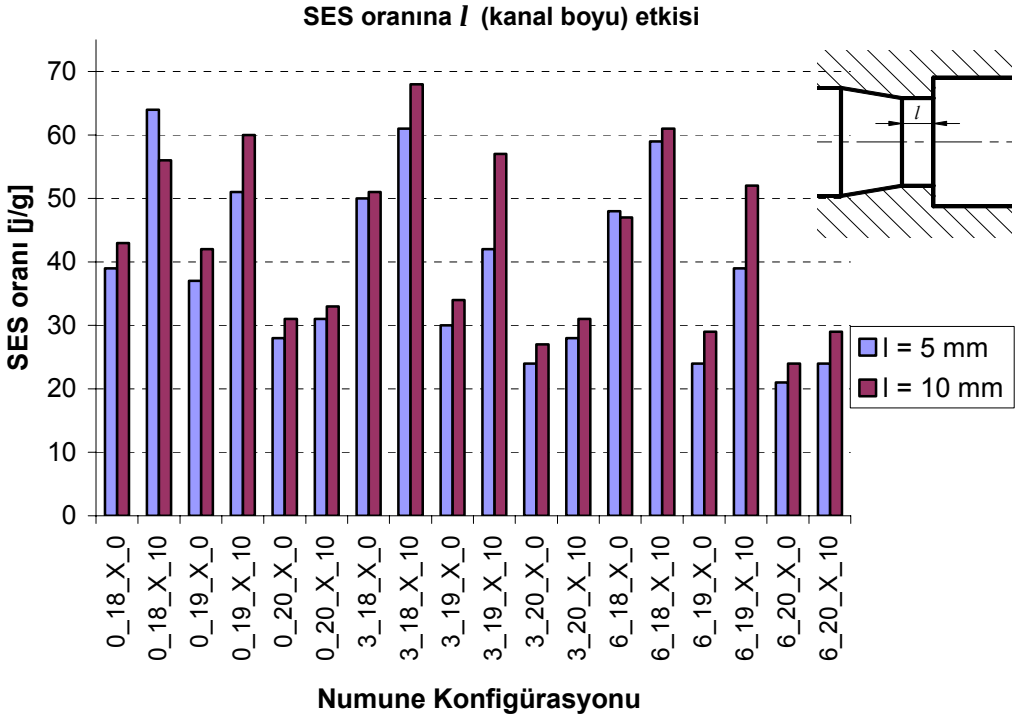
Kompozit çubuk iç delik çapı (d) 'nin çubuk malzemelere ait SES oranlarına etkisi Şekil 5.33'te verilmektedir. Şekil 5.33'deki incelemede, çubuk iç çapının değişken ve diğer parametrelerin sabit olduğu toplam 12 adet karşılaştırma sunulmuştur. Her bir karşılaştırmada, t, l ve β sabit tutularak d nin etkisi incelenmiştir. Numune isimlendirmelerinde kullanılan "X" sembolü, çubuk iç delik çapının sırasıyla 0, 3 ve 6 mm olduğunu ifade etmektedir. Şekil 5.33'den bütün numune konfigürasyonları için, delik çapı etkisinin SES oranını azaltıcı etki gösterdiği görülmektedir. Ancak yüksek reaksiyon kuvvetlerin de görüldüğü ve yüksek t (çubuk ile kompozit delik çapı) farkına sahip olan X_18_10_0 ve X_18_10_10 numune konfigürasyonlarında, çubuk içinde delik açılması halinde SES oranı değerinde ortalama %10'luk bir artış görülmektedir. Bunun nedeni, kalıp girişinde aşırı zorlanma sonucunda malzeme içerisinde merkeze doğru kayma düzlemlerinin oluşabilmesidir. Bu kayma düzlemlerinin oluşmasıyla malzemenin çapı daralmakta bu suretle kalıp deliğinden geçmektedir. Çubuk içerisindeki delik unsuru, yüksek çap farklılıklarının olması halinde oluşan yüksek reaksiyon kuvveti tepe değerlerinin indirgenmesinde kullanılabilir bir özellik olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.33: SES oranına d'nin (çubuk iç delik çapı) etkisi

5.2.3.3. SES oranına kalıp kanalı boyunun (*l*) etkisi

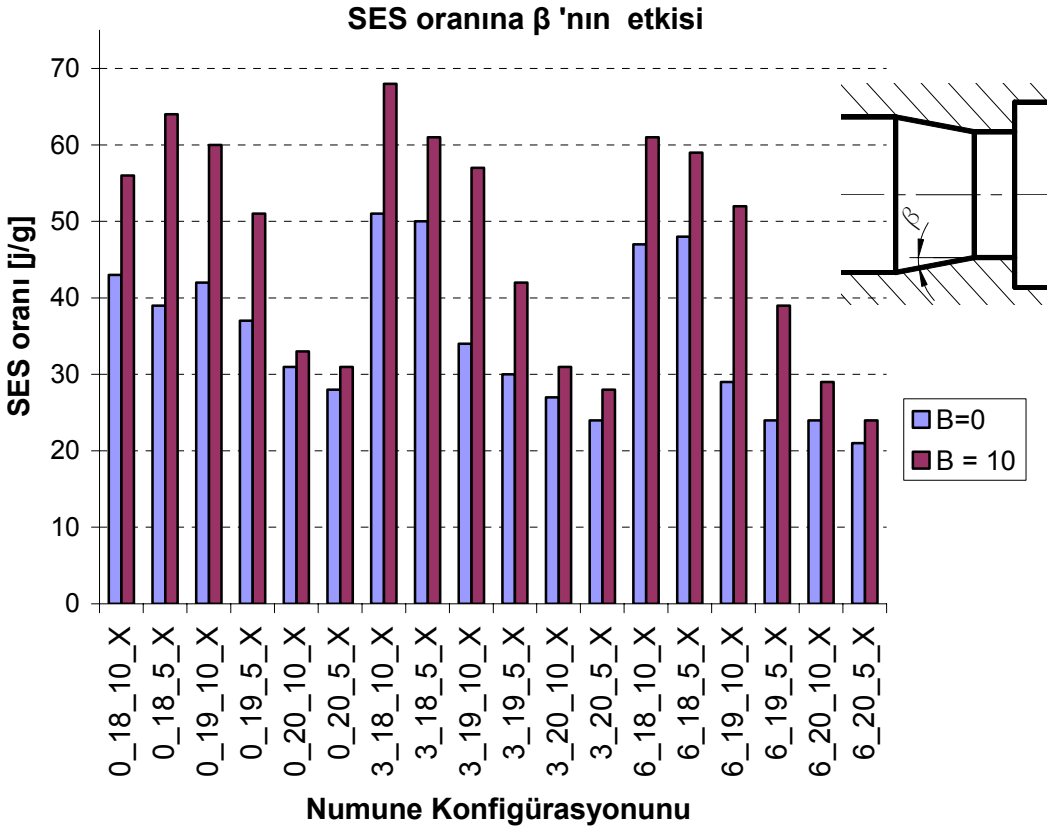
Kalıp kanal boyunun (*l*) çubuk malzemelere ait SES oranlarına etkisi Şekil 5.34'te verilmektedir. Şekil 5.34'teki incelemede, kalıp kanal boyunun değişken ve diğer parametrelerin sabit olduğu toplam 18 adet karşılaştırma sunulmuştur. Her bir karşılaştırmada, d, t ve β sabit tutularak *l* nin etkisi incelenmiştir. Numune isimlendirmelerinde kullanılan "X" sembolü, kalıp kanal boyunun sırasıyla 5 ve 10mm olduğunu ifade etmektedir. Kanal boyu etkisi SES oranı değerlerinde genelde bir iyileştirme göstermiştir. Kanal boyu, kompozit çubuk numunelerin radyal baskıya maruz kalan bölgelerin boyunu artırdığından bu bölgede oluşan fiber hasar miktarına da etki etmektedir. Ancak uzun kanal boyu, Şekil 5.34'te görüldüğü gibi yüksek çap farkı ile bir araya geldiği 0_18_X_10 kombinasyonunda SES değerini azaltıcı etki göstermiştir. Çünkü malzeme kalıp içerisinde sıkışmakta ve kalıp içerisinden geçememektedir. Dolayısıyla ise ani hasara uğramaktadır.



Şekil 5.34: SES oranına kalıp kanal boyunun (*l*) etkisi

5.2.3.4. SES oranına kalıp giriş eğim açısının (β) etkisi

Kalıp giriş eğim açısı (β) çubuk malzemelere ait SES oranlarına etkisi Şekil 5.35'te verilmektedir. Şekil 5.35'teki incelemede, kalıp kanalı giriş eğim açısı değişken ve diğer parametrelerin sabit olduğu toplam 18 adet karşılaştırma sunulmuştur. Her bir karşılaştırmada, d, t ve *l* sabit tutularak β nin etkisi incelenmiştir. SES oranı değeri, kalıp giriş eğim açısı verilen ve yüksek çap farkının olduğu numune konfigürasyonlarında ortalama %32 'lik bir artış göstermekte ve ortalama olarak ise %23' lük bir artış göstermektedir. Kalıp giriş eğim açısı, faturalı delik girişine göre daha yüksek enerji sönümleme miktarı sağlamaktadır. Faturalı sistemde numunelerin uç bölgelerinde aşınma oluşarak kopan parçalar fatura önünde doğal bir eğim oluşturmak için harcanmaktadır Böylece suni bir kama bölgesi oluşmasına kadar malzemenin büyük kısmı delik içerisinden çıkmış olmaktadır. Dolayısıyla enerji sönümlenmesinde numune hacmi verimli biçimde kullanılamamaktadır.



Şekil 5.35: SES oranına kalıp giriş eğim açısı (β) etkisi

5.2.4. SES oranı için tahmin denkleminin oluşturulması

Tablo 5.4 ’te belirtilen SES oranlarının, dört farklı tipte belirlenen geometrik faktörlere bağlı olarak tahmin edilebilmesi amacıyla bir regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizler ve hesaplama işlemleri MATLAB programı 2006a R14 versiyonu ile gerçekleştirilmiştir. Program bünyesinde yazılan alt program EK-C’de sunulmaktadır.

Tablo 5.4: Tahmin denkleminde kullanılan parametreler

Konf. No	**d** İç delik çapı	**t** Çap farkı	***l*** Kanal Boyu	**β** Kalıp giriş açısı	**SES Oranı**
1	3	2.75	10	10	68
2	0	2.75	5	10	64
3	3	2.75	5	10	61
4	6	2.75	10	10	61
5	0	1.75	10	10	60
6	6	2.75	5	10	59
7	3	1.75	10	10	57
8	0	2.75	10	10	56
9	6	1.75	10	10	52
10	3	2.75	10	0	51
11	0	1.75	5	10	51
12	3	2.75	5	0	50
13	6	2.75	5	0	48
14	6	2.75	10	0	47
15	0	2.75	10	0	43
16	0	1.75	10	0	42
17	3	1.75	5	10	42
18	0	2.75	5	0	39
19	6	1.75	5	10	39
20	0	1.75	5	0	37
21	3	1.75	10	0	34
22	0	0.75	10	10	33
23	0	0.75	10	0	31
24	0	0.75	5	10	31
25	3	0.75	10	10	31
26	3	1.75	5	0	30
27	6	1.75	10	0	29
28	6	0.75	10	10	29
29	0	0.75	5	0	28
30	6	0.75	5	10	28
31	3	0.75	10	0	27
32	6	1.75	5	0	24
33	6	0.75	5	0	24
34	6	0.75	10	0	24
35	3	0.75	5	10	24
36	3	0.75	5	0	21

Elde edilen tahmin denklemi, 0.928 korelasyon katsayısıyla geometrik değişkenlerin bir fonksiyonu olarak SES oranını tahmin edebilmektedir. Tahmin denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur;

$$\text{SES oranı} = k_1 + d*k_2 + t*k_3 + l*k_4 + \beta*k_5 \quad (5.2)$$

Burada, d numune içi delik çapını, t malzeme ile numune arasındaki çap farkını, l kalıp içi kanal boyunu, β ise kalıp girişi koniklik açısını belirtmektedir. Denklem 5.2'ye ait ve program aracılığı ile hesaplanan katsayılar ise aşağıdaki gibidir.

k_1= 7.7778

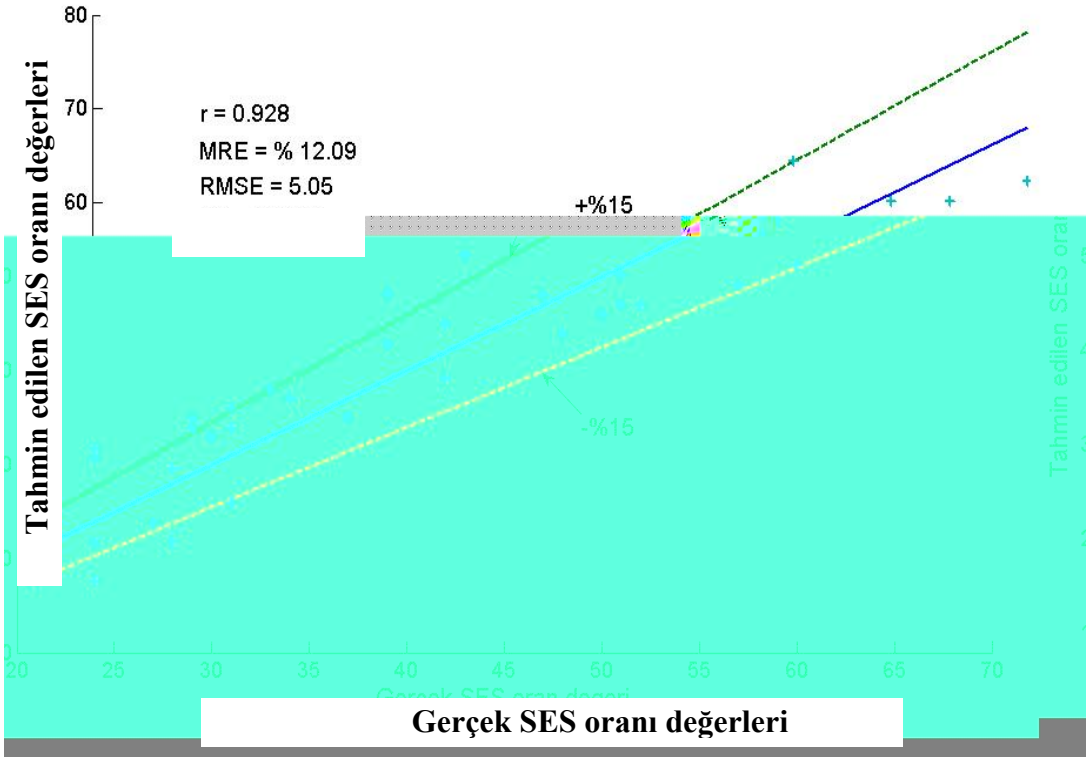
k_2= -0.7083

k_3= 13.1667

k_4= 0.8333

k_5= 1.2056

Numune kombinasyonlarına ait SES oranı için tahmin denklemiyle hesaplanan nümerik değerler ve bu kombinasyonlara ait gerçek değerler karşılaştırmalı olarak Şekil 5.36'da sunulmaktadır. Tahmin denkleminin doğruluk oranını göstermek amacıyla, tahmin değerleri ile bu değerlere göre oluşturulmuş ±%15'lik hata bandı, sırasıyla sürekli kalın çizgi ve kesikli çizgi biçiminde belirtilmişlerdir.



Şekil 5.36: Deneysel verilerden elde edilen gerçek SES oranı değerlerine karşılık olarak tahmin edilen SES oranı değerleri

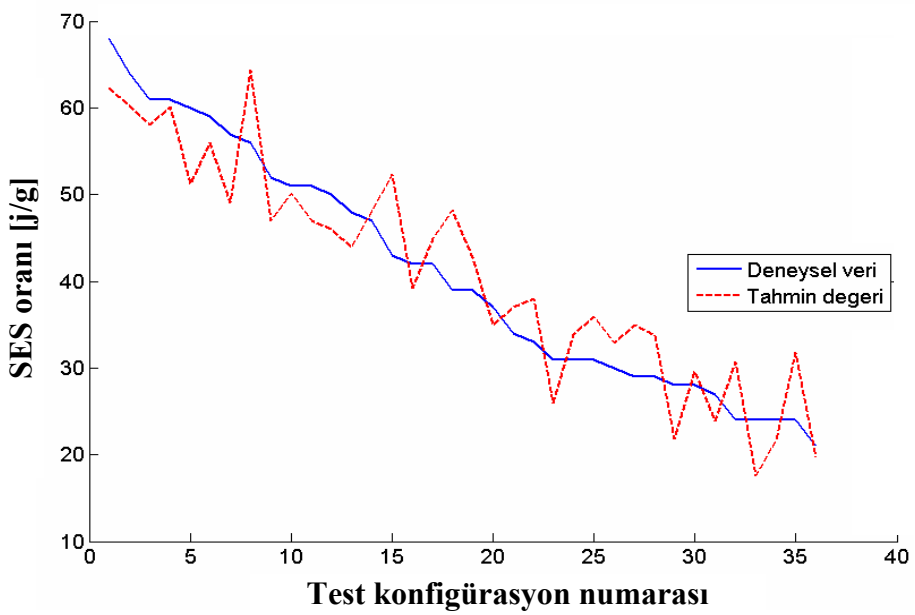
Şekil 5.36'da gösterilen,. deneysel değerlerin bir fonksiyonu olarak tahmin edilen SES oranı tahminlerinde %12.09 'luk bir ortalama hata değeri hesaplanmıştır. Ortalama hata Denklem 5.3 ile hesaplanabilmektedir.

$$\%\,\mathrm{MRE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|100\frac{(g_i - t_i)}{g_i}\right| \tag{5.3}$$

Burada MRE (mean relative error) ortalama hatayı, "g" test verilerini, "t" tahmin değerlerini ifade etmektedir. Tahmin denklemi sonuçlarına ait, hata kareleri ortalaması (root mean square error (RMSE)) değeri ise 5.05 olarak Denklem 5.4'ten hesaplanmıştır.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(g_i - t_i)^2} \tag{5.4}$$

Ayrıca her bir konfigürasyon için, elde edilen deneysel SES oranı değerleri ile tahmin edilen SES oranı değerlerinin numune kombinasyonlarına göre karşılaştırılmalı olarak Şekil 5.37'de gösterilmektedir.



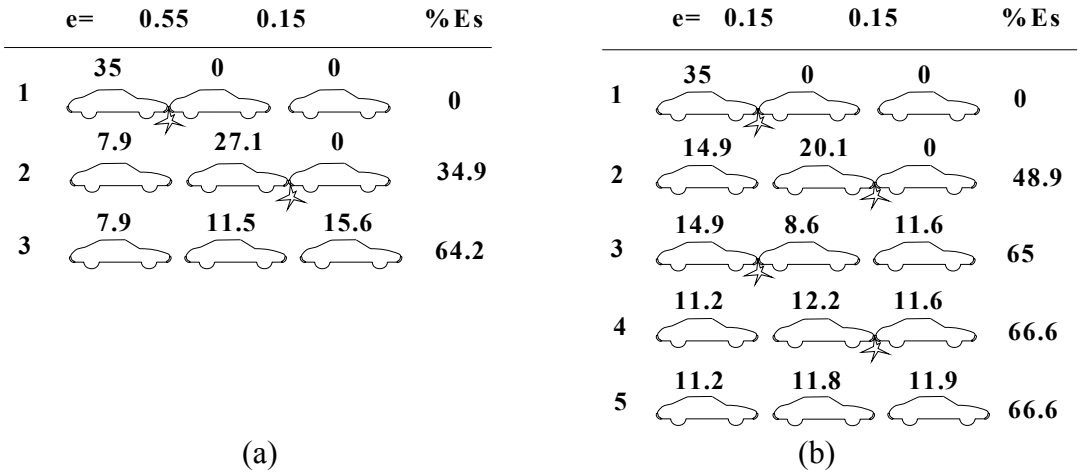
Şekil 5.37: Test konfigürasyonları için, gerçek ve hesaplanmış SES oranları

5.2.5. Çarpışma senaryolarında çarpışma katsayısı (e) etkisi

Malzemenin ve/veya sistemin çarpışma karakteristiklerinden olan ve taşıtlarda çarpışma senaryolarının belirlenmesinde büyük rol oynayan çarpışma katsayısı (e), sadece malzemenin deforme olduğu yani yük hücresi ile malzeme tutucu aparatın temasının oluşmadığı her bir test kombinasyonu için Tablo 5.3'te belirtilmiştir. Burada, önemli olan nokta ne tip bir çarpışma senaryosunun belirleneceğidir. Yani çarpışma katsayısının, $0.25 > e \geq 0$ seçilerek deformasyon ağırlıklı yani ivmenin indirgenebildiği bir çarpışma modeli kurulabilir. Özellikle çok kütleli çarpışmalarda bu durum önem kazanmaktadır. Bu duruma ait örnek bir çarpışma senaryosu Şekil 5.38'de verilmektedir.

Şekil 5.38 aynı kütleli üç adet taşıtın, birincisi 35 m/s ilk hız ile belli mesafelerle duran iki taşıta çarpması halinde, oluşan zincirleme reaksiyonu göstermektedir. Şekil 5.38.a'da çarpışma katsayısının birinci araç ile ikinci araç arasında $e_{1\text{-}2}$=0.55, ikinci

araç ile üçüncü araç arasında $e_{2\text{-}3} = 0.15$ olması durumunda birinci kütlenin hızındaki ani düşüş ve bunun neden olduğu yüksek yavaşlama ivmesi oluşmaktadır. Hızlanan ikinci aracın üçüncüsüne çarpması halinde $e_{2\text{-}3}=0.15$ olmasından dolayı anlık hız değişimleri fazla olmamaktadır. Şekil 5.38.b'de ise $e_{1\text{-}2} = 0.15$ ve $e_{2\text{-}3}=0.15$ olması halinde çarpışma beş aşamada oluşmaktadır. Dolayısıyla ivmelenmeler düşük miktarlarda kalmaktadır. Bu ise; yüksek ivmelenme sonucu meydana gelebilecek hasarların asgariye indirgenmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 5.38: Farklı çarpışma katsayısı için çarpışma senaryosu örneği a) $e_{1\text{-}2}=0.55$ olması durumunda oluşan çarpışma olayı, b) $e_{1\text{-}2}=0.15$ olması durumunda oluşan çarpışma olayı

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Kompozit çubuk malzemelerin enerji sönümleme karakteristiklerinin tanımlanması ve yeni bir yöntem olan "dar kesit" yöntemiyle iyileştirilmesine yönelik yapılmış bir dizi deney çalışmaları sonucunda elde edilen kazanımlar belirtilmiştir. "Dar kesit" yöntemi, yarı statik ve dinamik yüklemelerde kompozit çubukların enerji sönümleme performanslarını artırıcı yeni bir yöntem olarak ilk kez bu çalışmayla tanımlanmaktadır.

Yapılan çalışmada ilk olarak, mekanik özellikleri bilinen E-cam fiber takviyeli kompozit çubuk malzemesinin enerji sönümleme karakteristikleri yarı statik yükleme hızında tespit edilmiştir. Bu işlem literatürde yeni tanınan bir yöntem olan kıvırma testi, sabit tutulan numune büküm yarı çapının farklı değerleri için de gerçekleştirilmiştir. Kıvırma testi sonucunda; kompozit çubuk malzemesinin klasik yöntemlere göre literatürde [23,46] en yüksek 46 j/g olarak belirtilen SES oranı değeri, büküm yarıçapının minimum değere getirilmesiyle, 52 j/g olarak tespit edilmiştir. Böylece, kıvırma metoduyla klasik yöntemlerden %13.2 daha iyi sonuç elde edilmiştir. Mevcut metotlarla bulunabilecek en yüksek SES oranı değerine ulaşılmıştır. SES oranını etkileyecek faktörler; 1- oluşan ayrılma yüzeylerinin sayısının arttırılması, 2- bu yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetlerini sağlayan normal kuvvetlerin arttırılması 3- sürtünme kuvvetlerinin etkidiği mesafenin arttırılması olarak gözlenmiştir.

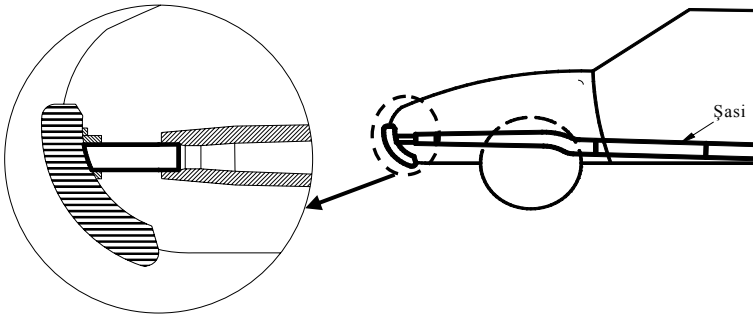
Yarı statik testlerde ikinci adım da ise; tasarlanılan yeni "dar kesit" yöntemi ile testler gerçekleştirilmiştir. Bu test sonuçlarına göre, kıvırma test metodunda kullanılan kompozit çubuklarla aynı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip çubuğun yeni SES oranı değeri, yöntemdeki kontrol parametrelerine bağlı olarak, en yüksek 58 j/g olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, uygulanılan bu yeni tasarım modeli ile kompozit çubukların SES oranında %11.5'lik bir artış sağlanmıştır.

Enerji sönümleme elemanlarının, dinamik yükler altındaki gerçek performanslarını ölçmek amacıyla, çift kollu sarkaç prensibiyle çalışan deney düzeneği tasarlanmış ve kurulmuştur (Şekil 4.14). Kurulan sistem, bu amaçla literatürde yapılan çalışmalar arasında kullanılan ilk sistem olma özelliğine sahiptir. Düzenekte sarkaç kollarının her biri 150 kg kütle ile 8 m/s hıza ulaşabilmekte ve çarpışma verileri bilgisayar ortamına aktarılarak kayıt altına alınabilmektedir.

Yapılan deney çalışmalarında dar kesit yönteminde etkili olan t, l, β ve d parametreleri değiştirilerek test numune konfigürasyonları için reaksiyon kuvveti–zaman değişimine etkileri şu şekilde tespit edilmiştir; 1- kesit daralma miktarı (t)'nin artmasıyla birlikte sönümleme karakteristiklerinde iyileşme olduğu Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Numune içine açılan delik çapının (d) sönümlenen enerji miktarını azaltıcı etki göstermekle birlikte Şekil 5.17'de gösterildiği gibi çarpma esnasında oluşan anlık şiddetli yük oluşumuna engel olmuştur. Kanal boyu (l) mesafesinin artmasının, yüksek çap farkı olması halinde kompozit çubukları kalıbın içinde sıkıştırarak ani hasar oluşturduğu Şekil 5.18 den görülmüştür. Ancak incelenen örnek numune dışındaki diğer konfigürasyonlarda sönümlenen enerjiyi artırmıştır. Kanal giriş açısı (β) ise, açısı olmayan faturalıı

õ

değerlerinin 20-35 kN değerleri arasında seyrettiğini göstermektedir. Bu sonuçlara bağlı olarak; kompozit çubuk yapılarının bu özelliklerinden dolayı taşıtlarda enerji sönümleme elemanı olarak verimli bir şekilde kullanılabileceği bu çalışma sunucunda gösterilmiştir. Bu kıyasla, Şekil 46'da gösterildiği gibi, kompozit çubukların uygun tampon bağlantılarda kullanılması halinde, orta şiddetli çarpmalarda 83 kN'a kadar oluşacak darbe kuvvetlerini sönümleyerek deformasyonun şasiye ulaşması engellenebilecektir.



Şekil 5.39: Kompozit çubuğun taşıt üzerine montajı

Bu sistemin taşıtlarda uygulanabilirliğinin yanı sıra endüstrinin bir çok alanında çarpma darbe kuvvetlerine maruz kalabilecek sistemlere de (Asansör yastıkları gibi) uygulanması mümkündür

Çalışmada belirlenen ve etkileri araştırılan dört değişkene ek olarak, bu çalışmanın ışık tutacağı ileride yapılabilecek benzer çalışmalarla, malzemenin mekanik özellikleri (E_1, E_2, υ), malzeme boyutları (dış çap, boy, boru yapı ise kalınlık, numune koniklik açısı vb.) gibi sayılabilecek bir çok değişkenin SES oranı değerine etkisi, Denklem 5.2'deki modele bir faktör olarak eklenebilir. Taşıt tasarım sürecinde, faydalanılabilecek bu yeni metodolojik çalışma ve elde edilen matematiksel model ileriki proje çalışmalarında detaylandırılarak, enerji sönümleme sistemlerinin optimizasyonu yapılabilir.

Ayrıca bu çalışmada sadece silindirik kesitler incelenmiş olup, buna ek olarak, silindirik kesitlerin kare kesitlerinden, eliptik kesitli deliklerden, I profil çubukların farklı kesitlerden, kare kesitli çubukların farklı kesitlerden geçirilmesi gibi farklı çubuk ve delik kesiti için çalışmalar genişletilebilir.

7. KAYNAKLAR

[1]. Adam H., "Carbon fibre in automotive applications" ***Materials & Design***, 18, 349-355, (1997).

[2]. Göktan, A., "Taşıt Tasarımı", İTÜ Matbaası, İstanbul, (1982).

[3]. McConnell, V.P., "Automotive Composites: A Design and Manufacturing Guide", ***Ray Publishing*****,** Wheat Ridge, CO, 1, 6-7, (1997).

[4]. Piellisch, R., "Beyond Gasoline: Autos Remain Elusive for Carbon Composite Structures, but Alternative Cars Still Hold a Great Market Potential," ***SAMPE Journal***, 32, 5, 14-17, (1996).

[5]. Ashley, S., "Composite Car Structures Pass The Crash Test," ***Mechanical Engineering***, 118, 12, 59-63 (1996)

[6]. Wallentowitz, H., Adam, H., "The Use of Energy Absorbing Reinforcements in Automotive Applications," ***SAMPE Journal***, 31, 5, 23-28, (1995).

[7]. Karbhari, V.M., Falzon, P.J., Herzberg, I., "Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes," ***Journal of Composite Materials***, 31, 12.,1165-1186, (1997).

[8]. Alghamdi, AAA., "Collapsible Impact Energy Absorbers; an Overview", ***Thin-Walled Structure***, 39, 189-213, (2001).

[9]. Markiewicz, E., Ducrocq, P., Drazetic, P., "An Inverse Approach to Determine The Constitutive Model Parameters from Axial Crushing of Thin-Walled Square Tubes", ***International Journal of Impact Engineering***, 21, 433-449, (1998).

[10]. Yamazaki, K., Han J., "Maximization of The Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells", ***Advances in Engineering Software***, 31, 425–434, (2000).

[11]. Kim, H.S., "New Extruded Multi-Cell Aluminum Profile for Maximum Crash Energy Absorption and Weight", ***Thin-Walled Structures*** 40, 311–327, (2002).

[12]. Qiao J.S., Chen J.H., Che H.Y., "Crashworthiness Assessment of Square Aluminum Extrusions Considering The Damage Evolution", ***Thin-Walled Structures*****,** 44, 692-700, (2006).

[13]. Al Galib, D., Limam A., "Experimental and Numerical Investigation of Static And Dynamic Axial Crushing of Circular Aluminum Tubes", ***Thin-Walled Structures*****,** 42, 1103-1137, (2004).

[14]. Nakazawa, Y., Tamura K., Yoshida M., Takagi, K., Kano, M., "Development of Crash-Box for Passenger Car With High Capability for Energy Absorption", ***VIII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS VIII,*** CIMNE, 1-3, Barcelona (2005)

[15]. Seitzberger, M., Rammerstorfera, F.G., R. Gradingerb, Degischerc H.P., Blaimschein M., Walch C., "Experimental Studies on The Quasi-Static Axial Crushing of Steel Columns Filled with Aluminum Foam", ***International Journal of Solids and Structures***, 37, 4125-4147, (2000).

[16]. Santosa, S.P., Wierzbicki T., Hanssen A.G., Langseth M., "Experimental and Numerical Studies of Foam-Filled Sections", ***International Journal of Impact Engineering*****,** 24, 509-534, (2000).

[17]. Aktay, L., Toksoy A.K., Güden M., "Quasi-Static Axial Crushing of Extruded Polystyrene Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tubes: Experimental and Numerical Analysis", ***Materials & Design***, 27, 556-565, (2006).

[18]. Aktay, L., Kröplin B.H., Toksoy A.K., Güden M., "Finite Element and Coupled Finite Element/Smooth Particle Hydrodynamics Modeling of The Quasi-Static Crushing of Empty and Foam-Filled Single, Bitubular and Constraint Hexagonal and Square-Packed Aluminum Tubes", ***Materials & Design***, article in press, (2007)

[19]. Kocaoz, S., Samaranayake V.A., Nanni, A., "Tensile Characterization of Glass FRP Bars", ***Composites Part B: Engineering***, 36, 127-134, (2005).

[20]. Chen C.-H., Ma C.-C. M., "Pultruded Fiber-Reinforced PMMA/PU IPN composites: Processability and Mechanical Properties", ***Composites Part A****,* 28A, 65-72, (1996).

[21]. Warrior, N.A., Turner, T.A., Robitaille, F., Rudd, C.D., "Effect of Resin Properties and Processing Parameters on Crash Energy Absorbing Composite Structures Made by RTM" ***Composite Part A***, 34, 543-550, (2003).

[22]. Laura D.M., Keskkula, H., Barlow J.W., Paul D.R., "Effect of glass fiber and maleated ethylene–propylene rubber content on the impact fracture parameters of nylon 6" ***Polymer***, 42, 6161-6172, (2001).

[23]. Hamada, H., Nakatani, T., Nakai, A., Kameo, K., "The Crusing Performance of a Braided I-Beam", ***Composites Science and Technology***, 59, 1881-1890, (1999).

[24]. Karayaka, M., Kurath, P., "Deformation and Failure Behavior of Woven Composite Laminates", ***Journal of Engineering materials and Technology Transaction of the ASME***, 116, 222-232, (1994).

[25]. Zeng, T., Fang D., Lu T., "Dynamic crashing and impact energy absorption of 3D braided composite tubes", ***Materials Letters***, 59, 1491-1496, (2005).

[26]. Mahdi, E., Sahari B.B., Hamouda A.M.S., Khalid Y.A., "An Experimental Investigation Into Crushing Behaviour of Filament-Wound Laminated Cone–Cone Intersection Composite Shell", ***Composite Structures***, 51, 3, 211-219, (2001)

[27]. Turner, T.A., Warrior, N.A., Robitaille, F., Rudd, C.D., "The Influence of Processing Variables on the Energy Absorption of Composite Tubes", ***Composites Part A***, 36, 1291-1299, (2005).

[28]. Lee, D.G., Lim, T.S., Cheon, S.S., "Impact Energy Absorption Characteristic of Composite Structures", ***Composite Structures***, 20, 381-390, (2000).

[29]. Papadakis, N., Reynolds, N., Pharaoh, M.W., Wood P.K.C., Smith G.F., "Strain Rate Effects on The Shear Mechanical Properties of a Highly Oriented Thermoplastic Composite Material Using a Contacting Displacement Measurement Methodology–Part A: Elasticity And Shear Strength", ***Composite Structures***, 2005, 407-420, (2005).

[30]. Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Papapostolou, D.P., "On the Response of Thin-Walled CFRP Composite Tubular Components Subjected to Static and Dynamic Axial Compressive Loading: Experimental", ***Composite Structures***, 69, 407–420, (2005).

[31]. Song, H.W., Du, X.W., "Off-axis Crushing of GFRP Tubes", **Composite *Science and Technology***, 62, 2065-2073, (2002).

[32]. Corum, J.M., Battiste, R.L., Ruggles, M.B., Ren, W., "Durability-Based Design Criteria for a Chopped-Glass-Fiber Automotive Structural Composite", ***Composite Science and Technology*****,** 61, 1083-1095, (2001).

[33]. Dash, P.K., Chatterjee, A.K., "Effects of Environment on Fracture Toughness of Woven Carbon/Epoxy Composite", ***IE(I) journal-AS***, 85, 1-10, (2004)

[34]. Saito, H., Chirwa E.C., Inai R., Hamada H., "Energy Absorption of Braiding Pultrusion Process Composite Rods", ***Composite Structures*** 55, 407–417, (2002).

[35]. Kuo, W.S., Ko, T.H., Chen, H.I., "Elastic Moduli and Damage Mechanisms in 3D Braided Composites Incorporating Pultruded Rods", ***Composite Part A***, 29A 681-692, (1998).

[36]. Warrior, N.A., Turner, T.A., Robitaille, F., Rudd, C.D., "The Effect of Interlaminar Toughening Strategies on the Energy Absorbtion of Composite Tubes", ***Composites Part A***., 35, 431-437, (2004).

[37]. Bank, L.C., Nadipelli, M., Gentry T.R., "Local Buckling and Failure of Pultruded Fiber-Reinforced Plastic Beams", ***Journal of Engineering materials and Technology Transactions of ASME*****,** 116, 233-289, (1994).

[38]. Khalid, Y.A., Ali F.A., Sahari, B.B., Saad E.M.A., "Performance of Composite I-Beams Under Axial Compression and Bending Load Modes", ***Materials & Design***, 26, 127-135, (2005).

[39]. Velmurugan, R., Gupta, N.K., Solaimurugan, S., Elayaperumal, A., "The effect of stitching on FRP cylindrical shells under axial compression", **International *Journal of Impact Engineering***, 30, 923-938, (2004).

[40]. Solaimurugan, S., Velmurugan, R., "Progressive Crushing of Stitched Glass/Polyester Composite Cylindrical Shells", ***Composite Science and Technology*****,** 67, 422-437, (2007).

[41]. Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Papapostolou, D.P., "Crashworthy Characteristics of Axially Statically Compressed Thin-Walled Square CFRP Composite Tubes: Experimental", ***Composite Structures*****,** 63, 347-360, (2004).

[42]. Anghileri, M., Chirwa E.C., Lanzi, L., Mentuccia F., "An Inverse Approach to Identify the Constitutive Model Parameters for Crashworthiness Modelling of Composite Structures", ***Composite Structures*****,** 68, 65-74, (2005).

[43]. Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Papapostolou, D.P., "The Static and Dynamic Axial Collapse of CFRP Square Tubes: Finite Element Modeling", ***Composite Structures***, 74, 213-225, (2006).

[44]. El- Hage, H., Mallick P.K., Zamani, N., "A Numerical Study on The Quasi-Static Axial Crush Characteristics of Square Aluminum–Composite Hybrid Tubes", ***Composite Structures*****,** 73, 505-514, (2006).

[45]. Shin, K.C., Lee, J.J., Kim, K.H., Song, M.C., Huh, J.S., "Axial Crush and Bending Collapse of an Aluminum/GFRP Hybrid Square Tube and Its Energy Absorption Capability", ***Composite Structures*****,** 57, 279-287, (2002).

[46]. Güden. M., Yüksel, S., Taşdemirci, A., Tanoğlu, M., "Effect of Aluminum Closed-Cell Foam Filling on The Quasi-Static Axial Crush Performance of Glass Fiber Reinforced Polyester Composite and Aluminum/Composite Hybrid Tubes", ***Composite Structures*****,** 81, 480-490, (2007).

[47]. Han, H., Tahberi, F., Pegg, N., Lu, Y., "A Numerical Study on The Axial Crushing Response of Hybrid Pultruded and ±45° Braided Tubes", ***Composite Structures*****,** 80, 253-264, (2007)

[48]. Luo, R.K., Green, E.R., Morrison, C.J., "Impact Damage Analysis of Composite Plates", ***International Journal of Impact Engineering*****,** 22, 435-447, (1999).

[49]. Hosseinzadeh, R.H., Shokrieh, M.M., Lessard, L., "Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts" ***Composite Science and Technology*****,** 66, 61-68, (2006).

[50]. Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Ioannidis, M.B., Papapostolou, D.P., "On the Experimental Investigation of Crash Energy Absorption in Laminate Splaying Collapse Mode of FRP Tubular Components", ***Composite Structures***, 70, 413-429, (2005).

[51]. Selvadurai, A.P.S., "Matrix Crack Extension at a Frictionally Constrained Fiber" ***Journal of Engineering materials and Technology Transactions of ASME,*** 116, 398-402, (1994).

[52]. Brooks R., "Comprehensive Composite Materials Volume 6 Composites in Automotive Applications:Design" ***Pergamon*****,** 18-21, (2000).

[53]. Mizuno, K., Wani, K., Yonezawa, H., "Vehicle Crashworthiness in Full and Offset Frontal Impact Tests" ***SAE of Japan***, 24, 173-181, (2003).

[54]. Vasiliev, V.V., Morozov, E.V., "Mechanics and Analysis of Composite Materials" ***Elsevier***, 396-397, (1992).

[55]. Hull, D. Cylne, T.W., "An Introduction to Composite Materials", ***Cambridge University Press*****,** 10-15, (1996).

[56]. Gibson, R.F. "Principles of Composite Material Mechanics" ***McGraw-Hill, Inc.***, Singapore, (1994).

[57]. Mazumdar, S.K., "Composite Manufacturing: Materials, Product, and Precess Engineering", ***CRC Press***, (2002).

[58]. Jones, R.M., "Mechanics of Composite Materials", ***Taylor & Francis Inc.*****,** (1999).

[59]. Uçar, M., Cengiz, A., Çalışkan, A., "Tek Eksende Gergin ve Serbest Yönlendirilmiş Cam Elyaf takviyeli kompozitlerin Çekme Mukavemet Değerlerinin İncelenmesi", ***Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri sempozyumu MATİT2005****,* TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 16-17 Eylül (2005).

[60]. Thornton, P. H. "The Crush of Fiber-Reinforced Plastics," Handbook of Ceramics and Composites Volume 1: Synthesis and Properties, Cheremisin off, N. P. ed., ***Marcel Dekker Inc***., 307-337, New York, (1990).

[61]. Hull, D. "Energy Absorption of Composite Materials under Crash Conditions," ***Proceedings of the Fourth International Conference on Composite Materials (ICCM IV),*** 1, 861-870, (1982).

[62]. Farley, G.L. and Jones, R.M. "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," ***Journal of Composite Materials***, 26, No. 1, 37-50, (1992).

[63]. Hull, D. "A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes," ***Composite Science and Tech***., 40, 377-421, (1991).

[64]. Farley, G.L. "Energy Absorption of Composite Materials", ***Journal of Composite Materials****,* 17. 267-279, (1983).

[65]. Thornton, P. H., "Energy Absorption in Composite Structures," ***Journal of Composite Materials***, 13, 247-263, (1979).

[66]. Beer P.F., Johnston E.R., "Vector Mechanics for Engineers: Dynamics" ***McGraw-Hill Inc.,*** New York, (1962).

[67]. Browne, A.L., Jhonson, N.L., "Dynamic Crush Test Using a "Free-Flight" Drop Tower: Theory", ***Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition***, 43-46, Kasım (2001).

[68]. Browne, A.L., Jhonson, N.L., "Dynamic Crush Test Using a "Free-Flight" Drop Tower: Practical Aspects", ***Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition***, 47-49, Kasım (2001).

[69]. Williams, B.W., Oliveira D.A., Simha C.H.M., Worswick M.J., Mayer, R., "Crashworthiness of straight Section Hydroformed Aluminum Tubes" ***International Journal of Impact Engineering*****,** 34, 1451-1464, (2007).

[70]. Tan, K.S., Wong, S.V., Umar., R.S.R., Hamouda A.M.S., "An Experimental Study of Deformation Behaviour of Motorcycle front wheel-tyre Assembly Under Frontal Impact Loading", ***International Journal of Impact Engineering,*** 32, 1554-1572, (2006).

[71]. Griskevicius, P., Ziliukas, A., "The Crush Energy Aborbtion of the Vehicles Front Structures" ***Transport***, 18, 97-101, (2003).

EKLER

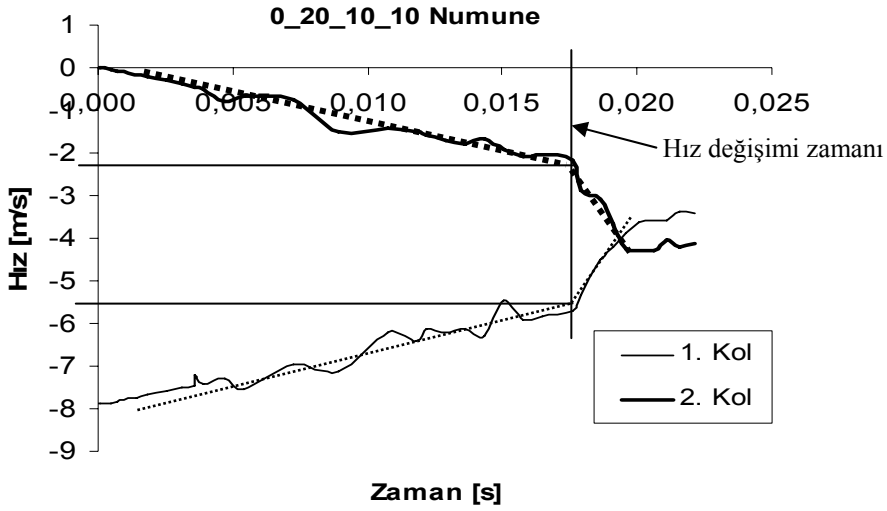
EK-A

Tablo A.1 Çarpma deney numuneleri için belirlenen geometrik büyüklükleri

sıra no	Numune Komb. Kodu	ØD	Ød	L	$ØD_{iç}$	$l_{iç}$	β	m_1	V_1
1	0_18_5_0	20.75	0	100	18	5	0	85	7.77
2	3_18_5_0	20.75	3	100	18	5	0	85	8.10
3	6_18_5_0	20.75	6	100	18	5	0	85	7.76
4	0_18_10_0	20.75	0	100	18	10	0	85	7.77
5	3_18_10_0	20.75	3	100	18	10	0	85	7.85
6	6_18_10_0	20.75	6	100	18	10	0	85	7.81
7	0_18_5_10	20.75	0	100	18	5	10	85	7.70
8	3_18_5_10	20.75	3	100	18	5	10	85	7.66
9	6_18_5_10	20.75	6	100	18	5	10	85	7.45
10	0_18_10_10	20.75	0	100	18	10	10	85	7.43
11	3_18_10_10	20.75	3	100	18	10	10	85	7.48
12	6_18_10_10	20.75	6	100	18	10	10	85	7.45
13	0_19_5_0	20.75	0	100	19	5	0	85	7.82
14	3_19_5_0	20.75	3	100	19	5	0	85	7.45
15	6_19_5_0	20.75	6	100	19	5	0	85	7.61
16	0_19_10_0	20.75	0	100	19	10	0	85	7.60
17	3_19_10_0	20.75	3	100	19	10	0	85	7.45
18	6_19_10_0	20.75	6	100	19	10	0	85	7.45
19	0_19_5_10	20.75	0	100	19	5	10	85	7.47
20	3_19_5_10	20.75	3	100	19	5	10	85	7.45
21	6_19_5_10	20.75	6	100	19	5	10	85	7.55
22	0_19_10_10	20.75	0	100	19	10	10	85	7.55
23	3_19_10_10	20.75	3	100	19	10	10	85	7.45
24	6_19_10_10	20.75	6	100	19	10	10	85	7.55
25	0_20_5_0	20.75	0	100	20	5	0	85	7.77
26	3_20_5_0	20.75	3	100	20	5	0	85	7.45
27	6_20_5_0	20.75	6	100	20	5	0	85	7.61
28	0_20_10_0	20.75	0	100	20	10	0	85	7.45
29	3_20_10_0	20.75	3	100	20	10	0	85	7.45
30	6_20_10_0	20.75	6	100	20	10	0	85	7.45
31	0_20_5_10	20.75	0	100	20	5	10	85	7.64
32	3_20_5_10	20.75	3	100	20	5	10	85	7.45
33	6_20_5_10	20.75	6	100	20	5	10	85	7.45
34	0_20_10_10	20.75	0	100	20	10	10	85	7.59
35	3_20_10_10	20.75	3	100	20	10	10	85	7.82
36	6_20_10_10	20.75	6	100	20	10	10	85	7.73

EK-B

Hız-Zaman grafiklerinde de kütlelere ait hız eğrilerinden anlık hız artışının oluşumu tespit edilebilmektedir. Buna bağlı olarak malzeme tarafından sönümlenen enerji, bu anlık hız değişiminin oluştuğu andaki kütlelerin hız bilgilerinin alınmasıyla hesaplanmıştır. Böyle durumlarda izlenilen metoda ait örnek bir hız zaman grafiği incelemesi, 0_20_10_10 kombinasyonlu numune için Şekil B.1'de verilmiştir.



Şekil B.1: Hız-Zaman grafiğinde anlık hız değişimin tespiti

Şekil B.1incelenmesiyle, sarkacın birinci koluna asılı olan kütlenin hızının (v_1) 7.8 m/s, ikinci kola asılı kütlenin ise durağan olduğu anlaşılmaktadır. Metal takozların temas etmeleri durumunda oluşan anlık hız değişimi zaman çizgisine kadar olan bölgenin incelenmesiyle; $v_1' = 5.5$ ve $v_2' = 2.1$ m/s olarak tespit edilebilmiştir.

EK-C

“Deney1.m” dosyası

```
clear all; close all; clc;
load deney1
X = [C D L B];
y = S;
katsayi = [1 1 1 1 1];
K = nlinfit(X,y,'my_fun',katsayi)

k1 = K(1);
k2 = K(2);
k3 = K(3);
k4 = K(4);
k5 = K(5);

Y = k1 + k2*C + k3*D + k4*L + k5*B;

n = 1:36;
plot(n,S,n,S,'+',n,Y,n,Y,'rx'); grid

figure;
N = 36;
r = min(min(corrcoef(Y,S)))

err = Y - S;
Ave_err = (sum(100*abs(err./S))/length(err))
RMS = sqrt(sum(err.^2)/N)
R2 = 1 - ((sum(err.^2))/(sum(S.^2)));
plot(S,S,S,S*1.15,'-',S,S*0.85,'-',S,Y,'+')
xlabel('Actual Value'); ylabel('Predicted Value');
gtext(['r = ',num2str(sprintf('%4.3f',r))]);
gtext(['MRE = ',num2str(sprintf('%3.2f',Ave_err)),' %']);
gtext(['RMSE = ',num2str(sprintf('%3.2f',RMS))]);
gtext(['R2 = ',num2str(sprintf('%3.4f',R2))]);
```

myfun.m alt dosyası,,,,,,, fonksiyon tipi ve katsayılar tanıtılmaktadır.

```
function yhat = my_fun(katsayi,X)
k1 = katsayi(1);
k2 = katsayi(2);
k3 = katsayi(3);
k4 = katsayi(4);
k5 = katsayi(5);

C = X(:,1);
D = X(:,2);
L = X(:,3);
B = X(:,4);

yhat = k1 + k2*C + k3*D + k4*L + k5*B;
```

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Van'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da lise öğrenimini İstanbul Haydarpaşa Teknik Lisesi'nde tamamladı. 1995 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü'nden 2000 yılında Teknik Öğretmen olarak mezun oldu. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2002 Haziran döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2002 yılının güz döneminde aynı ana bilim dalında doktora eğitimine başladı. Halen Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup evli ve bir çocuk babasıdır.