

**Dinamik ve Darbeli Y¼kler Altında Yapıştırma
Bağlantılarının Mukavemetini Etkileyen Fakt¼rlerin
İncelenmesi**

Proje No: 105M214

Yrd.Doç.Dr. Tezcan ŞEKERCİOğLU
Prof.Dr. Alper G¼LSÖZ
Yrd.Doç.Dr. Volkan KOVAN
Araş.Gör. Murat ÖZENÇ

AğUSTOS 2008
DENİZLİ

ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında, yapıştırma bağlantılarının darbeli ve dinamik yükler altındaki davranışları incelenmeye çalışılmıştır. Darbe deneylerinde yapıştırılan malzemenin etkisi, yapıştırma kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğünün etkisi araştırılmıştır. Eksenel yorulma testlerinde ise çalışma frekansının etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca darbe test verilerinden yola çıkılarak, yapay sinir ağları yardımıyla darbe dayanımı tahmin modeli geliştirilmiştir.

Elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar ile literatürde eksikliği hissedilen konularda katkı sağlandığı düşünülmektedir.

Proje 105M214 no ile TÜBİTAK - MAG tarafından desteklenmiştir. İki yıl proje süresi boyunca bize her konuda yardımcı olan TÜBİTAK personeline, projenin değerlendirme aşamalarında görev alarak değerli görüşleri ile bizi yönlendiren öğretim üyelerine ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

Ağustos, 2008 DENİZLİ

Proje Yöneticisi:
Yrd.Doç.Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU

Yardımcı Araştırmacılar:
Prof.Dr. Alper GÜLSÖZ
Yrd.Doç.Dr. Volkan KOVAN
Araş.Gör. Murat ÖZENÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
TABLolar LİSTESİ.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Bilgisi.....	2
1.1.1 Darbeli ve Dinamik Yükleme.....	2
1.1.2 Yapay Sinir Ağları (YSA).....	9
1.2 Projenin Amacı.....	10
2. GENEL BİLGİLER.....	11
2.1 YAPIŞTIRMA VE YAPIŞTIRMANIN TEMEL KAVRAMLARI.....	11
2.1.1 Yapışma İşlemi.....	11
2.1.2 Yapışmayı Etkileyen Faktörler.....	12
2.1.3 Yapıştırma Geometrisi.....	13
2.1.4 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri.....	13
2.1.5 Yapıştırıcıların Kullanım Yerleri.....	17
2.1.6 Yapıştırmanın Avantajları.....	20
2.1.7 Yapıştırmanın Dezavantajları.....	20
2.2 YAPIŞTIRICI ÇEŞİTLERİ.....	21
2.2.1 Akrilikler.....	21
2.2.2 Anaerobikler.....	21
2.2.3 Siyanoakrilatlar.....	22
2.2.4 Modifiye Edilmiş Fenolikler.....	22
2.2.5 Poliüretanlar.....	23
2.2.6 Epoksiler.....	23
2.2.6.1 Epoksi Reçineleri.....	23
2.2.6.2 Epoksi Yapıştırıcıları.....	25
2.3 DARBE YÜKÜ, YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA DARBE YÜKÜNÜN ÖNEMİ VE TEST YÖNTEMLERİ.....	27
2.3.1 Darbenin Tanımı.....	27
2.3.2 Sünek ve Gevrek Malzemelerin Darbe Davranışı.....	28
2.3.3 Yapıştırma Bağlantılarında Darbe Yükünün Önemi.....	29
2.3.4 Yapıştırıcıların ve Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Testleri İçin Kullanılan Deneysel Yöntemler.....	29
2.3.4.1 Sarkaç Testi (Pendulum Test).....	30
2.3.4.2 Ağırlık Düşürme Testi (Drop-Weight Tester).....	31
2.3.4.3 Split-Hopkinson Çubuğu (Kolsky Bar).....	32

2.4 YAPAY SİNİR AĞLARI	33
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	34
3.1 DARBE TESTLERİ	34
3.1.1 Deney Düzeneği.....	34
3.1.2 Yükleme Durumu	34
3.1.3 Deney Numuneleri	35
3.1.4 Deneylerde Kullanılan Yapıştırıcının Teknik Özellikleri	37
3.1.5 Yapıştırma İşlemi	38
3.2 EKSENEL YORULMA TESTLERİ.....	40
3.2.1 Deney Düzeneği.....	40
3.2.2 Deney Numuneleri	40
3.2.3 Deneylerde Kullanılan Yapıştırıcının Teknik Özellikleri	41
3.2.4 Yapıştırma İşlemi	42
3.3 YAPAY SİNİR AĞLARI İLE DARBE DAYANIMI TAHMİNİ.....	42
4. BULGULAR	44
4.1 GİRİŞ.....	44
4.2 DARBE DENEYLERİ	44
4.2.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Darbe Dayanımına Etkisi.....	44
4.2.2 Yapıştırma Kalınlığının Darbe Dayanımına Etkisi	47
4.2.3 Yapıştırılan Malzemenin Darbe Dayanımına Etkisi	49
4.3 EKSENEL YORULMA TESTLERİ.....	52
4.4 YAPAY SİNİR AĞLARI YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN VERİLER	53
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	58
6. REFERANSLAR	61
7. EKLER.....	66
EK – 1 (Yurtiçi Bildiri).....	67
EK – 2 (SCI-Expanded Makale).....	75
8. TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU	81

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Anaerobik yapıştırıcılar için ticari örnekler	22
Tablo 2.2 Siyanoakrilat yapıştırıcılar için ticari örnekler	22
Tablo 2.3 Fenolik reçineler için ticari örnekler.....	23
Tablo 2.4 Poliüretanlar için ticari örnekler	23
Tablo 2.5 Epoksi reçinelerinde kullanılan serleştirciler	24
Tablo 2.6 Epoksi yapıştırıcılar için ticari örnekler.....	26
Tablo 3.1 Loctite 3421'in fiziksel ve mekanik özellikleri	37
Tablo 3.2 Loctite 638'in fiziksel özellikleri	41
Tablo 3.3 Yapay sinir ağı modelinde kullanılan veriler.....	42
Tablo 4.1 Yüzey pürüzlülüğü etkisinin tespitinde uygulanan deney şartları	45
Tablo 4.2 Yapıştırma kalınlığı etkisinin tespitinde uygulanan deney şartları.....	47
Tablo 4.3 Paslanmaz Çelik ve Delrin malzeme için uygulanan deney şartları	49
Tablo 4.4 Eksenel yorulma testi deney şartları	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Adhezyon ve kohezyon olayının şematik olarak gösterilmesi.....	11
Şekil 2.2 Yapıştırma bağlantı geometrileri.....	14
Şekil 2.3 Temel hasar tipleri	15
Şekil 2.4 Adhezyon hasarının fotoğraf olarak gösterilmesi	16
Şekil 2.5 Kohezyon hasarının fotoğraf olarak gösterilmesi	16
Şekil 2.6 Cıvataların çözülmeye karşı yapıştırıcı ile emniyete alınması.....	17
Şekil 2.7 Otomobilde yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar	18
Şekil 2.8 Peugeot yarış arabasının tahrik milinde yapıştırıcı kullanımı	18
Şekil 2.9 Uçak yapılarındaki sandviç panellerde yapıştırıcı kullanımı.....	19
Şekil 2.10 Uçaklarda yapıştırıcının kullanıldığı bölgeler	19
Şekil 2.11 Yük-çökme eğrisi	28
Şekil 2.12 Sünek ve gevrek malzemelerin yük-zaman eğrileri.....	29
Şekil 2.13 Deney numunesinin çentik (Izod) darbe cihazına bağlanması.....	30
Şekil 2.14 Sarkaç tipi darbe uygulamalı kamalı deney düzeneği.....	31
Şekil 2.15 Ağırlık düşürerek eğilme momenti uygulanması	31
Şekil 2.16 Darbe çeki yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısı	32
Şekil 2.17 Split-Hopkinson basınç çubuk test sistemi.....	32
Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan Izod darbe cihazı	34
Şekil 3.2 Deney numunesinin çentik (Izod) darbe test cihazına bağlanması	35
Şekil 3.3 Deney numunelerinin boyutları	36
Şekil 3.4 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	37
Şekil 3.5 Ölçülen yüzey pürüzlülüklerine ait değerler ve grafikler	38
Şekil 3.6 Yapıştırılmış deney numuneleri	39
Şekil 3.7 Eksenel yorulma test cihazı	40
Şekil 3.8 Deney numunesi boyutları	41
Şekil 3.9 Geliştirilen YSA modelinin öğrenme ve test aşama. performansı	43
Şekil 4.1 Çelik num. yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci değerlerine etkisi	46
Şekil 4.2 Al numune. yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci değerlerine etkisi	46
Şekil 4.3 Bakır numunelerde yüzey pürüz. darbe direnci değerlerine etkisi.....	47
Şekil 4.4 Al malzeme için yapıştırma kalınlığının darbe direncine etkisi	48
Şekil 4.5 Bakır malzeme için yapıştırma kalınlığının darbe direncine etkisi.....	48

Şekil 4.6 $R_a=0,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve darbe arasındaki ilişki	50
Şekil 4.7 $R_a=1,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve darbe arasındaki ilişki.....	51
Şekil 4.8 $R_a=2,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve darbe arasındaki ilişki	51
Şekil 4.9 Frekans değişimi ile yük tekrar sayısı arasındaki ilişki	53
Şekil 4.10 Çelik numuneler için yüzey pürüzlülüğü - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	54
Şekil 4.11 Alüminyum numuneler için yüzey pürüzlülüğü - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	54
Şekil 4.12 Bakır numuneler için yüzey pürüzlülüğü - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	55
Şekil 4.13 Yüzey pürüzlülüğü $R_a=0,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme – darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	55
Şekil 4.14 Yüzey pürüzlülüğü $R_a=1,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme – darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	56
Şekil 4.15 Yüzey pürüzlülüğü $R_a=2,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme – darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	56
Şekil 4.16 Bakır malzeme için yapıştırıcı kalınlığı - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler	57
Şekil 4.17 Alüminyum malzeme için yapıştırıcı kalınlığı - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler.....	57

ÖZET

DİNAMİK VE DARBELİ YÜKLER ALTINDA YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MUKAVEMETİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

Proje Yöneticisi: Yrd.Doç.Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU
Proje No: 105M214

Ağustos 2008, 81 Sayfa

Malzemeler; cıvata, perçin, kaynak, lehimleme, yapıştırma gibi değişik metotlar kullanılarak birleştirilebilmektedir. Bu metotlardan yapıştırma bağlantılarının günümüz endüstrisinde kullanımı hızla artmaktadır. Yapıştırma bağlantıları ile birleştirmelerde hafiflik sağlanmakta, farklı özelliklerdeki ve kalınlıklardaki malzemeler birleştirilebilmekte, düzgün bir gerilme dağılımı elde edilebilmekte ve daha ekonomik birleşimler meydana getirilebilmektedir. Bu avantajları nedeniyle yapıştırma bağlantıları diğer mekanik birleştirme yöntemlerine alternatif olarak kullanılmaya başlamıştır.

Yapılan bu çalışmada, tek taraflı bindirme bağlantılarının, değişik yüzey pürüzlülüklerinde ($R_a=0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5\mu m$), farklı yapıştırma kalınlıklarında ($s=0,1; 0,3; 0,5mm$) ve farklı malzemeler kullanarak (çelik, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır ve plastik) darbe dirençlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Deney numuneleri ASTM D950-03 standardına göre imal edilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, her bir parametrenin darbe direncini etkilediği görülmüş ve her parametre için optimum darbe dayanımını veren değerler belirlenmiştir.

Silindirik yapıştırma bağlantılarının aksenal yorulma deneyleri yapılarak, frekansın etkisi incelenmiştir. Frekansın artmasıyla yük tekrar sayılarında önemli azalmalar gözlemlenmiştir.

Yapay sinir ağları (YSA) yöntemi kullanılarak, darbe dayanımı tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu model ile tahmin edilen darbe dayanım değerleri, yöntemin uygun ve etkili bir tahmin yöntemi olduğunu göstermiştir. Deney sonuçları ile büyük bir uyum sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Yapıştırıcı, Yapıştırma Bağlantıları, Darbe Yüğü, Yorulma, Yapay Sinir Ağları (YSA)

ABSTRACT

AN INVESTIGATION OF ADHESIVELY BONDED JOINTS STRENGTH UNDER DYNAMIC AND IMPACT LOADING

Project Director: Asst. Prof. Dr. Tezcan SEKERCIOGLU

Project Number: 105M214

August 2008, 81 Pages

The materials can be connected by welding, soldering, using rivets, bolts or adhesives. In today's industries usage of adhesive bonding joints has been rapidly spreading. The adhesively bonded joints provide some advantages such as joining of different thickness materials, joining of different type materials, lighter constructions, more uniform stress distribution. Because of these advantages adhesive bonding joints were started to be used as an alternative to the other bonding methods.

In this study; the variation of impact resistances of single lap joints with different average surface roughness (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 μ m), different adhesive thickness (0,1; 0,3; 0,5mm) and different adherent materials (steel, aluminium, copper) were investigated. These samples were prepared according to ASTM D950-03. At the end of the experimental studies, it was observed that each of the parameters affects the impact resistance and an optimum value of impact resistance for each parameter value was determined.

The axial fatigue tests of adhesively bonded tubular lap joints were made and the effect of frequency was investigated. When the test frequency was increased, the cycle number of the joint was decreased.

Additionally, an impact strength prediction model was developed using artificial neural network (ANN). The impact strength prediction results showed that developed artificial neural network model was convenient and powerful tool for impact strength estimation of adhesively bonded joints.

Keywords: Adhesive, Adhesively Bonded Joints, Impact load, Fatigue, ANN

1. GİRİŞ

Eskiden olduğu gibi bugün de malzemeleri birbirine eklemek, birleştirmek ve onları bir bütün olarak kullanım süreleri içerisinde bir arada tutmak maksadıyla birçok teknik ve malzeme kullanılmaktadır. Bunların arasında cıvata, perçin gibi elemanlar, kaynak, lehim ve yapıştırma gibi teknikler bulunmaktadır. Ancak bu yöntemlerden daha pratik ve kullanımı daha basit olan yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kullanımı giderek artmaktadır. Günümüzde, yapıştırıcı teknolojisindeki gelişmelerden dolayı yapıştırıcı ile bağlama tekniği birçok mühendislik alanında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

Sanayide özellikle havacılık endüstrisinin öncülüğünde 1940'lardan günümüze hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerde hızlı gelişmeler meydana gelmiştir. Kompozit malzemeler ve onların üretim yöntemlerinde özellikle son 15 yılda önemli atılımlar gerçekleştirilmiştir. Bu durum hava taşıtlarının birçok parçasında polimer matris kompozitlerin yeni uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemelerde meydana gelen bu hızlı gelişim, yapısal elemanların birleştirme yöntemlerinde etkili ve güvenilir ilerlemelerin ortaya çıkmasını, dolayısıyla mekanik birleştirme yöntemlerinden uzaklaşmasını zorunlu hale getirmiştir.

Yapıştırıcıların farklı malzeme, kompozit ve plastiklerin birleştirilmesinde tercih edilmelerinden dolayı, kullanım alanları hızlı bir şekilde artmaktadır. Yapıştırma; kaynak, lehim, perçin vs. yanında endüstriyel anlamda bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmaya başladığından beri, başarılı bir yapıştırma için önemli tasarım parametrelerini tespit etmek amacıyla birçok araştırma, geliştirme ve mühendislik çalışması yapılmış olup çalışmalar artan oranlarda hala devam etmektedir. Yapıştırma işleminde, önemli tasarım parametreleri olarak, yapıştırma boşluğu, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı tipi, yapıştırılan malzeme, yapıştırma geometrisi, yüzey pürüzlülüğü, yüzeye yapılan ön işlemler, çalışma sıcaklığı, ısıl yaşlanma vs. sayılabilir.

Günlük hayatımızı kolaylaştıran ürünlerin birçoğunda yapıştırılmış birleştirmeler mevcuttur ve bunlar zaman içerisinde değişken yüklere maruz kalmaktadır. Örnek olarak, otomobil ve yolcu otobüslerinde kaynaklı birleştirmeler kadar yapıştırma bağlantıları da mevcuttur. Kapı panelleri, motor kaportası ve birçok plastik aksam uygun geometrilerde yapıştırma işlemi ile birleştirilmektedir. Bu yüzden kaza durumunda ani çarpmalara karşı bu bağlantıların davranışları önem arz etmektedir.

Diğer geleneksel metotlara (kaynak, perçin bağlantıları vs.) göre sahip olduğu avantajlardan dolayı, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar birçok araştırmacı tarafından analitik, nümerik ve deneysel olarak statik durumlar için incelenmiş olup araştırmalar halen devam etmektedir. Dinamik ve darbeli yükleme durumları için yapılan çalışmalar da gün geçtikçe artmaktadır. Yapıştırıcıların, uzay, uçak ve makine tasarımlarında dinamik ve darbeli yükler altında kullanılmaları, yapılan çalışmalar açısından önem kazanmaktadır. Özellikle insan can güvenliğinin söz konusu olduğu bu tür uygulamalarda dinamik ve darbe yüklerine maruz kalmış yapılarda oluşabilecek hasarların ve gerilmelerin tahmin edilip sonuçlarının değerlendirilebilmesi gerekmektedir.

1.1 Literatür Bilgisi

1.1.1 Darbeli ve Dinamik Yükleme

Yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışının tespit edildiği farklı deneysel yöntemler olmasına rağmen, basit geometrileri, üretim proseslerinin kolay oluşundan dolayı, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek taraflı bindirme bağlantılarının deneysel yöntemlerde kullanımı daha yaygındır (ASTM D1002, ISO 4587, ASTM D3165, ASTM D950-03). Birçok yapıştırma bağlantı modeli tek taraflı bindirme bağlantı geometrisi kullanılarak geliştirilmiştir (ANDRUET, 1998).

Çekme yüküne maruz farklı yapıştırılan malzemelerin yapıştırılması ile oluşturulmuş tek taraflı bindirme bağlantısı iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak analiz edilmiştir. Ara yüzeyde oluşan gerilme dağılımı üzerine, yapıştırılan malzeme kalınlığı, yapıştırıcı tabakasının kalınlığı ve yapıştırılan malzemelerin elastisite modülü farklarından oluşan etkileri analiz edilmiştir. Yapıştırılan malzeme kalınlığı ve elastisite modülünün, yapıştırmanın yapıldığı bölgenin serbest uçlarında oluşan gerilme dağılımları üzerine son derece büyük bir etkisinin olduğunu belirtilmiştir (SAWA ve diğerleri, 2000).

Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı tabakasının elastoviskoplastik davranışını dikkate alarak, sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi yapılmış, yapıştırılan malzemelerin elastik davranış sergilediklerini varsayılmış ve yapıştırıcı tabakasının akma davranışında modifiye edilmiş Von-Mises akma kriterleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, bindirme uzunluğundaki artışla maksimum soyulma ve kesme gerilmelerinde azalmanın olduğu ve gerilme dağılımları üzerinde sınır şartlarının son derece önemli etkisinin bulunduğu ifade edilmiştir (PANDEY ve diğerleri, 1999).

Tek taraflı bindirme bağlantılarının dayanım ve deformasyon davranışı üzerine yapıştırılan malzemelerde oluşturulan çentiğin etkisini incelenmiştir. Önce sonlu elemanlar yöntemini kullanarak optimum çentik yeri, boyutları ve geometrisinin tespitini yapılmıştır. Bu parametrik çalışmalardan sonra daha detaylı sonlu elemanlar analiziyle bu verilerin farklı hasar kriterlerine uygulanabilirliğini değerlendirmek için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde ise pik gerilme değerinde %27'lik bir azalma olduğunu rapor edilmiştir (SANCAKTAR ve Simmons, 2000).

Silindirik tek tesirli bindirme bağlantısı üzerinde sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan çalışmada, yapıştırıcı tabakasının serbest uçlarında ciddi gerilme yığılması olduğu vurgulanmıştır. Bunun sonucu olarak silindirik tek tesirli bindirme bağlantısında dikkate değer deformasyonların olduğu belirtilmiş ve aynı zamanda bindirme uzunluğundaki artışın, yapıştırıcı tabakasının pik gerilme değerlerinde düşüşe sebep olduğu belirtilmiştir (APALAK ve diğerleri, 2003),

Tek taraflı bindirme bağlantılarında ara yüzeydeki kayma ve soyulma gerilmeleri üzerine yapıştırıcı tabakası kalınlığının etkisini incelemiş olup, ara yüzeyde serbest uçlara yakın bölgede oluşan gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla arttığını tespit edilmiştir. Bu ara yüzeyde oluşan gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığının belirlenmesinde önemli rol oynadığı anlamına gelmektedir (SAWA ve Uchida, 1997).

Farklı özelliklere sahip iki farklı yapıştırıcı kullanarak oluşturulmuş ve dört noktadan eğme yüküne maruz tek taraflı bindirme bağlantısında sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sayısal analizle, yapıştırılan malzeme kalınlığının bağlantı performansı üzerine son derece önemli bir etkisinin olduğunu gösterilmiştir (OZEL ve diğerleri, 2003).

Eğilme momentine maruz yapıştırma bağlantılarında elastisite teorisini kullanarak gerilme analizi yapan bir formülasyon geliştirilmiş ve bağlantının dayanımını tam olarak tahmin edebilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Sonuçta yapıştırılan malzemelerin elastisite modülü arttıkça bağlantı dayanımının arttığını gözlemlenmiştir (LIU ve Sawa, 2000).

Sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak alın yapıştırma bağlantılı delikli silindirik numunelerde gerilim dalga ilerlemesi, statik ve darbe yükü altında, elastik ve elasto-plastik deformasyon aralıklarında analiz edilmiştir. Darbe yükü olarak ağırlık düşürülmüştür. Yapıştırma ara yüzeyinde gerilim dalga ilerlemesine, yapıştırıcı kalınlığının ve Young modülünün etkileri incelenmiştir. Bağlantıya darbe yükü uygulandığında, yapıştırıcının Young modülünün artmasıyla gerilmenin maksimum değeri artmış, yapıştırıcının kalınlığının artmasıyla gerilmenin maksimum değeri azalmıştır. Statik yük uygulandığında ise, yapıştırıcının Young modülünün azalmasıyla ve yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla gerilmenin maksimum değeri artmıştır. (SAWA ve diğerleri, 2002)

Tek taraflı bindirmeli bağlantılarda gerilim dalga ilerlemesi ve gerilim dağılımı elastik üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Yapıştırılacak malzemenin Young modülü, yapıştırma uzunluğu, yapıştırıcı ve yapıştırılacak malzemelerin kalınlıklarının gerilme dalga ilerlemesi ve gerilme dağılımı üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda yapıştırıcının Young modülünün artmasıyla maksimum gerilme değeri artmıştır. Yapıştırma uzunluğunun, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin kalınlıklarının artmasıyla gerilme değerlerinde azalma görülmüştür (SAWA ve diğerleri, 2002).

T-şeklindeki alüminyum malzemenin epoksi yapıştırıcı kullanarak alından yapıştırılıp darbe eğilme momenti uygulanarak gerilme dalga ilerlemesi ve gerilme dağılımı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Malzemenin Young modülünün artmasıyla birlikte ara yüzeydeki maksimum gerilme de artmıştır. Malzemede uygulanan yapıştırma uzunluğu flanş uzunluğuna eşit alındığında, malzemenin

Young modülü azaldıkça ara yüzeydeki maksimum gerilme artmıştır. Ayrıca yapıştırma kalınlığının azalmasıyla gerilme değeri artmıştır (HIGUCHI ve diğerleri, 2003).

Darbe altında yapıştırma tabakalarındaki kayma gerilmelerini ölçmeyi kolaylaştırmak amacıyla deneysel ekipmanlar geliştirilmiştir. Yapıştırılacak malzemeler bir hegzagonal prizma ve üzerinde gerilim gideren yarık bulunan iki adet dikdörtgen plakadan oluşmaktadır. Sonlu elemanlar metoduyla elde edilen sonuçlar ile ekipmanlar vasıtasıyla elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki durumda da bağlantılardaki kırılma davranışı, meydana gelen gerilme dalgasının seviyesine bağlıdır (KIHARA ve diğerleri, 2003).

Deneysel ve nümerik olarak yapılan bir çalışmada, küçük şekil değiştirme oranları ile darbe eğilme momenti altında, tek taraflı yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımı ve elastik gerilme dalga ilerlemesi sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Bu gerilme değerlerine, yapıştırma uzunluğunun, yapıştırma kalınlığının, yapıştırılan malzemelerin kalınlığının ve Young modülünün etkileri incelenmiştir. Yapıştırılan malzemenin Young modülü ve yapıştırma uzunluğu artarken maksimum gerilmede artmıştır ama bu sonuçlar statik eğilme momenti sonuçları ile tezat oluşturmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığı artarken ve yapıştırıcı kalınlığı azalırken maksimum gerilme değeri artmıştır. Nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbirine yakın değerler olarak bulunmuştur (HIGUCHI ve diğerleri, 2002).

Yapılan bu deneysel çalışmada, numuneler, üç farklı yapıştırıcının beş farklı tabaka kalınlığında, üç farklı test hızıyla test edilmiştir. Yapıştırıcı davranışına test hızının etkisi, hangi yapıştırıcının daha çok enerji absorbe ettiği, yapıştırıcı kalınlığının darbe davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan test sonuçlarında silindirik çubuk malzemelerin darbe testlerine en uygun olduğu kanısına varılmıştır. Aynı test hızında ve uygulanan darbe enerjisi karşısında en fazla absorbe edilen enerji, poliüretan yapıştırıcıda 0,5mm yapıştırıcı kalınlığında elde edilmiştir. Epoksi için optimum kalınlık, en fazla enerji absorbe ettiği 0,25mm yapıştırma kalınlığı olarak bulunmuştur. Hava tabancası ile yapılan test sonuçlarında, 15J' lük darbe enerjisi uygulandığında epoksi uygulanan 0,1mm yapıştırma kalınlığında statik yük durumuna göre %90, ağırlık düşürme testine göre %35 daha fazla enerji absorbe ettiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle yüksek test hızlarında daha yüksek enerji absorbe edildiği sonucuna varılmıştır (BEZEMER ve diğerleri, 1998).

Epibond 1590 A/B yapıştırıcısı modifiye edilerek yapışan çalışmada, ara yüzeyi dayanıklı hale getirmek için küçük yüzdelerde yüksek moleküler ağırlıkta carboxylated acrylonitrile butadiene (XNBR) ilave edilmiştir. Statik ve dinamik yükler altında ara yüzey dayanıklılığını belirlemede 0%, 5%, 7,5% ve 10% XNBR oranları çalışılmıştır. Statik yük altında Mod I ve II kırılma dayanıklılığı ve dinamik yük altında ara yüzeyin darbe hasar alanı belirlenmiştir. Çalışmada en iyi performans 7,5%

XNBR oranında modifiye edilmiş Epibond 1590 A/B ile elde edilmiştir (KUMAR ve diğerleri, 2005).

Yapıştırma bağlantısı hazırlanırken uygulanan yüzey hazırlama yöntemi, ısıtma ve soğutma oranı, birleştirme işlemi süresince uygulanan basınç, erime ve yeniden kristalleşme sıcaklığında kalma süresi bağlantının dayanımı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri arasındaki fark yukarıda bahsedilen özelliklerle birleşince yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeylerinde artık gerilme oluşumuna neden olur. Ara yüzeydeki iç gerilmelerin varlığı yapıştırma bağlantısının performansı üzerinde farklı etkiler oluşturabilir (RAMANI ve Zhao, 1997).

Adhezyon olayının açıklanmasında kullanılan teoriler incelenerek, adhezyon olayını tek bir teori ile açıklamanın yeterli olmadığı sonucuna varılmış, teorilerden birkaçının bir araya gelmesi ile oluştuğu belirtilmiştir. Yapıştırma yüzeylerinin hazırlanması ve yapıştırıcıların sertleşme mekanizmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışları ve kırılma mekaniği hakkında açıklamalar yapılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik yükleme durumları hakkında bilgiler verilerek servis ömürleri açıklanmaya çalışılmıştır (KINLOCH, 1987).

Bu çalışmada, yapıştırıcıların kullanımlarındaki gelişmeler, otomotiv sanayisindeki ve uçak sanayisindeki kompozit malzeme yapımında kullanılmaları üzerinde durulmuştur. Yapıştırıcıların kullanılma nedenleri ve kullanımını kısıtlayan faktörler vurgulanmış, konstrüktif olarak dikkat edilmesi gereken kurallar üzerinde durulmuş adhezyon, kohezyon ve curing (sertleşme) olayları açıklanmaya çalışılmıştır. Soyulma kuvvetlerine maruz birleştirmelerdeki geometrinin etkisi teorik olarak incelenmiştir. Çevre şartlarının yapıştırma bağlantısının nihai ömrü üzerindeki etkilerinin önemi açıklanmıştır (KINLOCH, 1997).

Kompozitlerin yapıştırma bağlantıları üzerine yapılan bir çalışmada, iki kompozit (SMC) plaka epoksi yapıştırıcı ile birleştirilerek, statik ve yorulma dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, statik kopma yükünün yapıştırıcı kalınlığı kadar bindirme uzunluğuna da bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Maksimum kesme kuvveti 0,33mm yapıştırıcı kalınlığında bulunmuştur. Bağlantının 10^6 yük tekrarındaki yorulma dayanımının, statik dayanımın %50 ile %54'ü arasında değiştiği bulunmuştur (MAZUMDAR ve Mallick, 1998).

Kesme mukavemeti, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Yapıştırıcı ile malzeme arasındaki bağ kuvveti (adhezyon kuvvetleri), yapıştırıcının kendi içerisindeki bağ kuvvetlerinden (kohezyon kuvvetleri) daha fazladır. Sıcak yapıştırıcı olarak kullanılan epoksi ile yapılan deneysel bir çalışmada 0,1–0,5mm yapıştırma boşluğu aralığında kesme mukavemetinde düşme gözlenmiştir. Optimum yapıştırma kalınlığı 0,05–0,15mm aralığı olarak elde edilmiştir. Çok ince yapıştırma

kalınlıklarında ise yapıştırıcının bütün yüzeylere teması mümkün olmayabilir. Bunun için yapıştırma bağlantılarında yapıştırma alanının bütünüyle kullanılıp kullanılmadığı gözden kaçırılmamalıdır (CIBA, 1999).

Alüminyum alaşımı plakalar epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş ve bağlantının statik ve yorulma mukavemeti, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar yardımıyla incelenmiştir. Statik deneylerde 0,3mm yapıştırıcı kalınlığı, 0,1mm kalınlığa nazaran daha yüksek kopma kuvvetleri göstermiştir. Yorulma deneylerinde ise kalınlığın değişmesi, sürekli mukavemet değerlerini çok fazla değiştirmemiştir (KRENK ve diğerleri, 1996).

Yapıştırma boşluğu ile ilgili olarak Loctite El Kitabı'nda verilen bir grafiğe göre, silindirik yapıştırma bağlantılarında, çaptaki boşluğun 0,05mm'ye kadar uygun olduğu belirtilmiş ayrıca 0,0–0,15mm aralığı tavsiye edilmiştir. Bağlantının 0,3mm boşluktaki mukavemet değerleri, 0,05mm boşluğa göre % 50 oranında azalmaktadır (LOCTITE, 1998)

Yüzey pürüzlülüğü $R_a=2\mu\text{m}$ olan çelik/kompozit bağlantısında, yapıştırıcı olarak epoksi reçinesi kullanılmış, yapıştırma boşluğu 0,1–0,2mm olan bağlantılarda maksimum yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir (LEE ve diğerleri, 1999).

Yapıştırıcı olarak epoksi reçinesi kullanılan diğer bir çalışmada maksimum moment taşıma kapasitesi, yapıştırma boşluğu 0,05–0,15mm olan bağlantılarda elde edilmiştir. Yapıştırma boşluğu dolayısı ile yapıştırıcı kalınlığı yükseldikçe moment taşıma kapasitesi azalmıştır (LEE ve Lee, 1996).

Yapıştırma bağlantılarında, bindirme uzunluğu boyunca, gerilmenin üniform olarak kalması yapıştırıcı kalınlığının kontrol altında tutulması ile sağlanabileceği, fakat dayanım değerlerinin optimum olabilmesi için yapıştırma boşluğunun sınırlandırılması gerektiği belirtilmiştir. Anaerobik yapıştırıcılar için yapıştırma boşluğu olarak 0,05–0,15mm aralığı önerilmektedir (ROMANOS, 1999).

Anaerobik yapıştırıcı kullanılarak üç farklı malzeme yapıştırılmış, sertleşme prosesleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Alüminyum malzemenin yapıştırılmasındaki sertleşme süresi, paslanmaz çelik ve bakır malzemelerinkinden daha yüksek bulunmuştur. En reaktif yüzeyin bakır olduğu belirtilmiştir. En yüksek mukavemet değeri de bakırda bulunmuştur. Ayrıca reaksiyon hızının çok fazla olması durumunda, yapıştırıcının gevrek bir yapı alabileceği özellikle vurgulanarak, sıcaklıkla birlikte kontrol altında tutulması gerektiği ifade edilmiştir (GEORGE ve diğerleri, 1998).

Kamalı darbe metodu kullanılarak 2m/s ve 3m/s test hızlarında yapısal yapıştırıcıların kırılma dirençleri ölçülmüştür. Deneylerde çelik ve alüminyum alaşımlı malzemeler servohidrolik test cihazında -40°C ve 23°C sıcaklıkta test edilmiştir.

Deney sonuçlarında oluşan çatlağın düzenli ve düzenli olmayan bir şekilde ilerlediği ve her iki durumda da kohesiv bir hasarın olduğu gözlemlenmiştir. Yapıştırıcıların, kamalı darbe testi sonuçlarında elde edilen kırılma enerjileri, belirlenmiş olan kırılma mekaniği yaklaşımları ile ilişkili değerler çıkmıştır. Deneysel şartlar sonlu elemanlar analizi ile modellenerek, deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır (WANG ve diğerleri, 2000).

Yapıştırma alanının, bağlantı mukavemeti üzerine etkisini araştırmak için yapılan deneysel bir çalışmada, yapıştırma alanı artırıldığında bağlantının kesme mukavemetinin önemli oranda azaldığı belirtilmiştir. Buna neden olarak da, küçük alanlarda olan deformasyon direncinin, büyük alanlarda olan deformasyon direncinden daha fazla olduğu ileri sürülmüştür (PFEIFFER ve Shakal, 1998).

Darbeli yüklemeler altındaki yapıştırma bağlantılarının dinamik deformasyonları incelenmiş ve uygun geometri belirlenmeye çalışılmıştır. Aynı yapıştırma uzunluğunda açılı bindirme bağlantısının, düz bindirme bağlantısına göre daha uygun olduğu ve gerilme yoğunluğunu azalttığı hem statik hem de dinamik yükleme için olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir (SATO ve diğerleri, 1997, 2000).

Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırılacak yüzeylerin çok parlak olmaması gerektiği, çok parlak yüzeylerde pürüzlülüğün kama etkisinin ortadan kalktığı ve yüzey pürüzlülüğünün $R_a=0,8-3,2\mu\text{m}$ aralığında olması gerektiği belirtilmiştir (LOCTITE, 1998).

Epoksi yapıştırıcı ile çelik silindirik malzemeler yapıştırılarak burulma yorulmasına tabi tutulmuşlardır. Deneylerde yüzey pürüzlülüğünün ve yapıştırma kalınlığının yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir. $R_a=0,56-5\mu\text{m}$ aralığında yapılan deneylerde, maksimum yorulma dayanımı (statik kesme kuvvetinin %15' i kadar yüklenmesi durumunda) $R_a=3\mu\text{m}$ ve 0,17mm yapıştırıcı kalınlığı için bulunmuştur. Araştırma sonucunda, ortalama gerilmenin hem yüzey pürüzlülüğüne hem de yapıştırıcı kalınlığına çok bağımlı olduğu, yüzey pürüzlülüğü ve yapıştırıcı kalınlığı arttıkça gerilme değerinin düştüğü belirtilmiştir. Bağlantı dizayn aşamasında iken, yüzey pürüzlülüğü ve yapıştırma kalınlığının çok dikkatli bir şekilde göz önünde bulundurulması gerektiği vurgulanmıştır (KWON ve Lee, 2000).

Alüminyum alaşımı malzemelerin tek tesirli bindirme bağlantısında kullanılan, FM 73 ve SBT 9244 yapıştırıcılarının bağlantıdaki performanslarını değerlendirmek amacıyla, yapıştırılan malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğunun bağlantı dayanımı üzerine etkisi farklı yükleme şartlarında (çekme ve dört noktadan eğme) deneysel olarak incelenmiştir. Her iki yapıştırıcı içinde çekme deneylerinden elde edilen kesme dayanımı ve hasar yükünün yapıştırılan malzeme kalınlığına son derece bağımlı olduğu ve yük taşımada artışın oluştuğu tespit edilmiştir. Bindirme uzunluğunun artmasıyla birlikte, her iki yapıştırıcı içinde çekme deneylerinden elde edilen kesme dayanımı ve hasar yükü artmıştır. Malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları

dikkate alınarak ve non-lineer sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, çekme ve dört noktadan eğme durumu için tahmin edilen hasar yükleri, deneysel çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırıldığında sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu sonucuna varılmıştır (AYDIN, 2003).

Yapıştırma ile birleştirilmiş olan kompozitler servis ve üretim esnasında darbe davranışlarına maruz kalır. Bu darbe etkisi, yapıştırma ile birleştirilmiş kompozit malzemelerden oluşturulmuş mühendislik parçalarının bütününde mukavemeti azaltıcı olarak etkilemektedir. Bu çalışmada, ağırlık düşürme darbe tekniği kullanılarak değişik enerji oranlarında (5-20J) grafit/epoksi malzemeler için darbe testi yapılmıştır. Ayrıca yapıştırma kalınlığının darbe etkisi de araştırılmıştır. Deneylerde ultrasonik C-tarama metodu kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, darbe sırasında, yapıştırma kalınlığının artması ile maksimum temas kuvvetine ulaşılmaktadır. Bunlara ek olarak, yapıştırma tabakalarında yapışmamış alanların boyutları ve şekli göstermiştir ki bu olay yapıştırma kalınlığı ve darbe enerjisine bağlıdır (WOLDESENBET, 2007).

Yapılan bir deneysel çalışmada, sarkaç çekiç vasıtasıyla bindirme bağlantılı deney numunelerine darbe yükü uygulanmıştır. Bu bağlantılar statik ve dinamik yükler altında incelenmiştir. Deneylerde çelik numuneler epoksi yapıştırıcısı (Hysol 3425) ile birleştirilmiştir. Numuneler soyulma ve kayma darbe yükleri altında kırılarak, bindirme uzunluğunun, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kalınlığının etkileri incelenmiştir. Ortalama kayma gerilmesi değerleri, yapıştırıcının kalınlığının ve yapıştırılan malzeme kalınlığının artmasıyla azalmıştır (GOGLIO ve Rosetto, 2007).

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak elektronik devrelerin model analizi tanımlanmaya çalışılmış ve doğal vibrasyon frekansı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, iletken yapıştırıcı serileri formülize edilerek onların dinamik özellikleri ve darbe performansları çalışılmıştır. Yüksek sönümlenme özelliğine sahip iletken yapıştırıcı malzemeler sonlu elemanlar analizi kullanılarak vibrasyon frekansı aralığında yüksek darbe performansı göstermiştir (WONG ve diğerleri, 2004).

Alüminyum tabakalar, epoksi yapıştırıcılar kullanılarak birbirleri ile birleştirilmiştir. Kullanılan bu yapıştırıcılar farklı kimyasal maddeler kullanılarak modifiye edilmiş ve yapıştırıcı kompozisyonunun ara yüzey kırılma enerjisi üzerine etkisi DCB (double cantilever beam) testi ile ölçülmüştür. Yapıştırıcının mekanik davranışları darbe testi ile belirlenmiştir. DCB testinin sonucunda, plastik parçacıklarının eklenmesi, epoksinin ara yüzey kırılma enerjisini artırırken, SiC parçacıklarının azalttığı tespit edilmiştir (BAGHERI ve Marouf, 2007).

Zamana bağlı olarak yük tekrarı konstrüksiyona göre büyük önem taşımaktadır. Uygulamadaki birleştirmeler çok değişik frekanslarda yorulmalara maruz kalmaktadırlar. Bunun sonucu olarak frekansın etkisi değişik araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Tekli ve çiftli bindirme bağlantılarında $2 \cdot 10^{-4}$ Hz'den 30Hz'e kadar

deneyler yapılmış ve düşük frekanslarda daha büyük hasarlar tespit edilmiştir (MARCEAU ve diğerleri, 1977).

İki farklı epoksi kullanılarak yapılan deneysel çalışmada, numuneler 0,5Hz'den 5Hz'e kadar farklı frekanslarda farklı deneylere tabi tutulmuşlar ve frekansın yorulma davranışına fazla bir etkisinin olmadığı bulunmuştur (LUCKYRAM ve Vardy, 1988).

Yapılan diğer bir çalışmada, frekans azaldıkça yorulma çatlak büyüme oranı artmıştır. Gerilim oranıyla birlikte yapıştırıcının dayanımındaki değişme, farklı proses bölge büyüklüklerinde frekansın azalmasıyla FCGR (Yorulma altında çatlak büyüme oranı)'nin artmasına imkan vermektedir (XU ve Crocombe, 1996).

1.1.2 Yapay Sinir Ağları (YSA)

Ti-6Al-4V titanyum alaşımlarının zaman-sıcaklık-dönüşüm (TTT) diyagramları, YSA kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen modelin titanyum alaşımlarında çeşitli problemlerin çözümünde pratik uygulamalar için kullanışlı olduğu rapor edilmiştir (MALINOV ve Sha, 2002).

Kaynak, yapay sinir ağlarının en çok kullanıldığı alanlardan birisidir. YSA ile geliştirilen model, kaynak kalitesinin kontrolünde kullanılan kırılma testinde absorbe edilen enerji miktarının tahmini için kullanılmıştır. Çalışmada, kaynaklı ferritik çeliklerin Charpy çentik darbe dayanımı, kaynak yöntemi, kimyasal bileşim, deney sıcaklığı ve mikro yapının bir fonksiyonu olarak tahmin edilmiştir (BHADESHIA, 1999).

%0,0037'den %0,79'a kadar karbon içeren ostenitik çeliklerin çekme deneyi altındaki davranışlarının tahmini YSA kullanarak yapılmıştır. Deneylerde yedi farklı çelik kullanılmış ve deneyler 900, 1000, 1100°C'de gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması sonucu, YSA'nın çekme davranışını tahmin için kullanılabileceği rapor edilmiştir (KONG ve Hodsgo, 1999).

Dökme demirlerde erime sırasında oluşan fiziksel ve kimyasal olayların bu malzemelerin özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak geliştirilen modelin dökümhanelerde üretim kontrolü için pratik bir araç olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (PERZYK ve diğerleri, 2001).

Gaz nitro-karbürleme sonrası çeliklerin mikro sertlik profillerinin tahmini için YSA kullanılmıştır. Çelik bileşimi, soğutma, zaman ve sıcaklık değerlerini girdi olarak alan modelleri, çıkış değeri olarak çeliğin mikro sertliğini vermektedir. Sonuç olarak, oluşturulan YSA ile ticari çeliklerin ve gerçek nitro-karbürleme şartları için mikro sertlik profillerini başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Deneysel veriler ve tahmin edilen değerler birbirine çok yakındır (MALINOVA ve diğerleri, 2001).

7175 Alüminyum alaşımının ayrışım sertleştirilmesi davranışları YSA ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Giriş değerleri olarak katı çözeltiliye alma sıcaklığını ve yaşlanma süresini kullanan modelleri çıkış değeri olarak sertlik değerlerini vermektedir. Çalışmanın sonucu oluşturulan ağ ile 7175 alüminyum alaşımının özelliklerinin YSA ile iyileştirilebileceği ve malzeme biliminin çeşitli alanlarında YSA'nın geniş bir kullanım alanı bulacağı sonucuna varılmıştır (SONG ve diğerleri, 1995).

Demir esaslı toz metal parçaların yoğunlukları YSA ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. YSA'da eğitim işlemi giriş değerleri olarak sıkıştırma basıncı, sinterleme sıcaklığı kullanılmış, çıkış değeri olarak yoğunluk elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen değerler ile YSA değerlerinin iyi bir yaklaşım göstermekte olduğunu rapor edilmiştir (OHDAR ve Pahsa, 2003).

YSA'nın kaynak işleminde kullanılması ile ilgili diğer bir çalışmada, giriş değerleri olarak kaynak hızı, ortalama güç, darbe enerjisi ve süresi, çıkış değeri olarak da kaynak havuz şekli alınmıştır. Kaynak havuz şekli için derinlik, genişlik ve alan tahmin edilmiştir (VITEK, 1999).

1.2 Projenin Amacı

Bu projede, ASTM D950–3 standardına göre imal edilmiş tek taraflı bindirme bağlantılarında yüzey pürüzlülüğünün, yapıştırılan malzemenin ve yapıştırma kalınlığının değişiminin darbe dayanımını nasıl etkilediği deneysel ve Yapay Sinir Ağları yöntemi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca silindirik yapıştırma bağlantıları farklı frekanslarda yorulma deneylerine maruz bırakılarak, frekansın yorulma dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır.

Literatür taramasından da anlaşılacağı gibi yapıştırma bağlantılarının üzerine yapılan araştırmaların çoğu teorik ve deneysel olarak statik yüklemeler için yapılmıştır. Dinamik ve darbeli yüklemelerin etkisi deneysel olarak fazla incelenmemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ile literatürde ki bu eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 YAPIŞTIRMA VE YAPIŞTIRMANIN TEMEL KAVRAMLARI

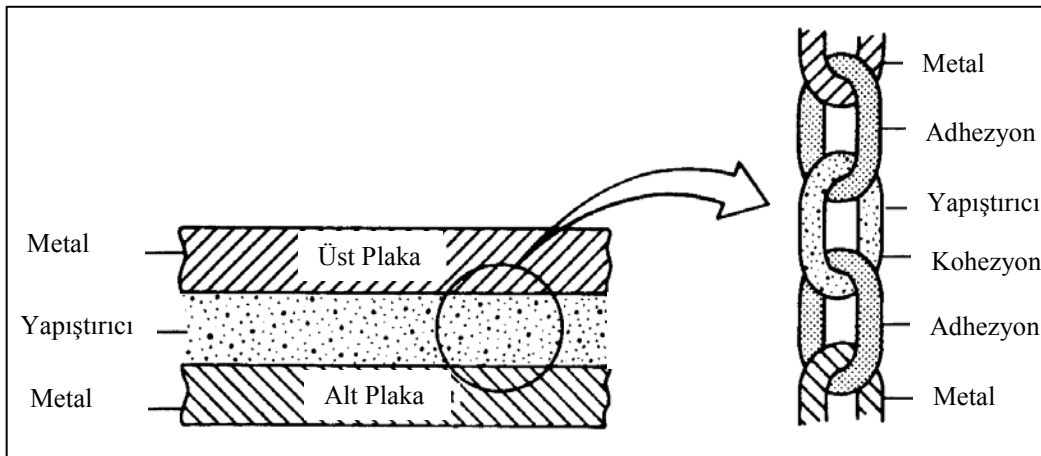
2.1.1 Yapışma İşlemi

Yapışma işlemi, yapıştırıcının kendi içinde ve yapıştırıcı ile malzeme arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda gerçekleşir. Bu olaylar;

Adhezyon (Adhesion): Bu olay yapıştırıcı ile yapıştırılacak yüzey arasında meydana gelir. İki yüzeyin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Literatürde (ADAMS ve diğerleri, 1997) adı geçen belli başlı adhezyon teorileri şunlardır;

- Mekanik kilitleme teorisi
- Difüzyon teorisi
- Fiziksel adsorbsiyon teorisi
- Elektrostatik teori
- Kimyasal yapışma teorisi
- Zayıf sınır tabaka teorisi

Kohezyon (Cohesion): Bu olay yapıştırıcının kendi içerisinde meydana gelir. Yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin kimyasal (monomerler arasındaki bağ kuvvetleri) ve fiziksel kuvvetler (Van der Waals kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Bu olay yapıştırıcının polimerisasyon aşamasında meydana gelir.



Şekil 2.1 Adhezyon ve kohezyon olayının şematik olarak gösterilmesi (ASM, 1990)

2.1.2 Yapışmayı Etkileyen Faktörler

Yapıştırıcı formülasyonunda yer alan yapıştırıcıdan sorumlu polimerik maddeler, bazı fiziki ve kimyasal faktörlerin etkisiyle yapışma sağlamaktadır. Aşağıda yapışmayı etkileyen faktörlerden en önemlileri yer almaktadır. Yapışmanın gerçekleşmesinde faktörlerden biri veya birden fazlası etkili olabilmektedir. Bir yapıştırıcı için etkili olan faktör diğeri için geçerli olmayabilir. Bu sebeple, yapıştırıcıların yapıştırma fonksiyonlarını yerine getirmesinde yapışmayı sağlayan polimerik madde kadar yapışmadan sorumlu olan fiziksel ve kimyasal faktörlerde önemlidir. Yapışmayı etkileyen faktörler;

Sıcaklık: Yapıştırıcıların çoğu oda sıcaklığında etkili olurlar. Ancak yüksek sıcaklıkla yapıştırıcı daha etken olur ve yapışma süresi kısalır. Birçok kimyasal reaksiyonda olduğu gibi sıcaklıkla reaksiyon hızında artış olur. Ancak sıcaklığın kontrolü yapılmalıdır. Aksi halde yapıştırıcıyı oluşturan polimerik maddenin bozunması ihtimaliyle karşılaşılır.

Basınç: Film ve bant halinde olan yapıştırıcıların kullanılması durumunda, hem buldukları yerin şeklini almaları hem de yapışmalarını sağlamak amacıyla hafif bir baskı kuvveti uygulanması etkin olmalarını sağlar ve yapışmanın zamanını azaltır.

Zaman: Yapıştırıcının kuruyarak, pişerek etkin hale gelmesi için birkaç saniyeden birkaç güne varan bir sürenin geçmesi gerekir. Geçen bu süre yapıştırıcının etkin olma süresidir. Bu süre basınç, sıcaklık veya katalizörler yardımıyla düşürülebilir.

Katalizör: Bazı yapıştırıcıların etkin olmaları için katalizör gibi reaksiyon artırıcı başlatıcı ve hızlandırıcı maddelerin formülasyonda bulunması gerekir. Bu amaçla kullanılan kimyasal maddelerin her biri değişik sıcaklıkta etkinliklerini göstererek yapışmayı sağlarlar. Termoset ve elastomerik yapıştırıcı türlerinde olduğu gibi tek ve iki bileşenli yapıştırıcılarda katalizörler büyük önem taşımaktadır.

Oksijen: Bazı yapıştırıcılar etkinliklerini ortamda oksijen olmadığı zaman (anaerobik) gösterirler ve oksijensiz ortamlarda yapışırlar. Oksijenin bulunduğu ortamda bozulmadan uzun süre saklanabilirler.

Çözücü: Su veya organik esaslı çözücüler kullanılarak hazırlanan yapıştırıcılar, yapışmayı, ortadan çözücü maddenin oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta buharlaşarak ayrılması sonucu sağlar.

Rutubet ve Su: Poliüretan, siyanoakrilat ve silikon türü yapıştırıcılar havada bulunan rutubet veya uygulandıkları yerdeki su ve rutubet vasıtasıyla reaksiyona girerler ve yapışmayı sağlarlar.

Ultraviyole Işınlara: Son zamanlarda geliştirilen bazı yapıştırıcılar ultraviyole ışıklardan etkilenerek yapışmayı sağlamaktadırlar. Tek bileşenli bazı akrilik türü yapıştırıcılar ultraviyole ışınları ile kürleşmektedirler.

2.1.3 Yapıştırma Geometrisi

Yapıştırma bağlantısının istenilen mekanik özellikleri taşıyabilmesi, bazı şartların yerine getirilmesi ile mümkün olur. Bunlar;

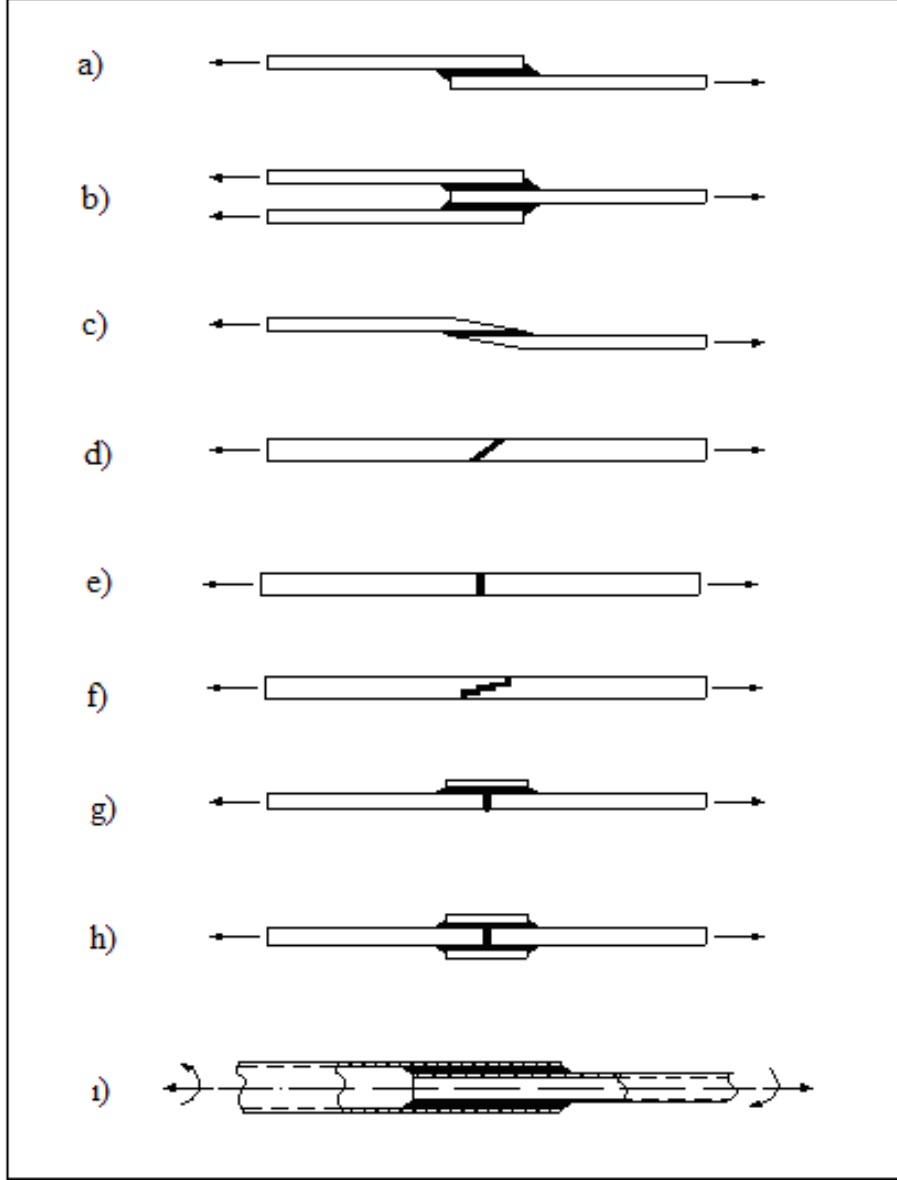
- Birleştirmenin konstrüksiyon içindeki konumu ve uygun yükleme durumu,
- Yapıştırılacak yüzeylerin uygun yüzey temizleme yöntemi ile temizlenmesi,
- Uygun yapıştırıcının seçimi ve uygulanması,
- Yapıştırma bağlantı geometrisinin uygun seçimidir.

Bir yapıştırma bağlantısı çekme, basma, kayma, soyulma veya tüm bu yükleme durumlarının kombinasyonu olarak yüklenebilir. Bu yüzden bir yapıştırma bağlantısı dizaynında bağlantının maruz kalacağı yük durumu mutlaka göz önünde bulundurulmalı ve yapıştırıcı hangi yükleme durumu için maksimum performans sergiliyorsa o yükleme durumuna uygun bağlantı tipi seçilmelidir. Mühendislikte kullanılan yapıştırma bağlantı tiplerinden en yaygın olanları Şekil 2.2'de verilmiştir.

2.1.4 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri

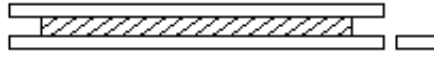
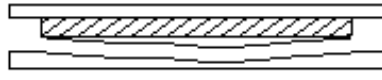
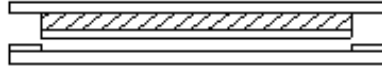



Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Bir grup malzeme veya parçanın yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki tip hasar modeli ile (adhezyon ve kohezyon hasarları) karşılaşılır (TS EN ISO 10365).

Temel hasar modelinin tayini bir yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasını sağlar. Temel hasar tipleri Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



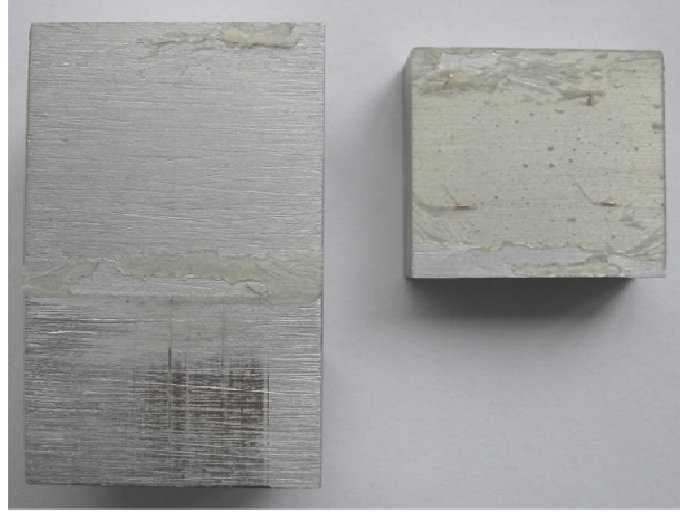
Şekil 2.2 Yapıştırma bağlantı geometrileri (ADAMS, 1997)

- | | |
|-------------------------------------|---|
| a) Tek taraflı bindirme bağlantısı | f) Kademeli bağlantı |
| b) Çift taraflı bindirme bağlantısı | g) Tek taraflı takviyeli alın bağlantılı |
| c) Pahlı bindirme bağlantısı | h) Çift taraflı takviyeli alın bağlantılı |
| d) Açılı bindirme bağlantısı | ı) silindirik bindirmeli bağlantı |
| e) Alın altına bağlantı | |

Hasar Tipleri	
Yapıştırılan Malzeme	 <p>Yapıştırılan malzemelerin biri veya ikisinde de hasarın olması</p>
	 <p>Kohosiv yapıştırılan malzeme hasarı</p>
	 <p>Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar</p>
Yapıştırıcı	 <p>Kohezyon hasarı</p>
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>
	 <p>Adhezyon hasarı</p>

Şekil 2.3 Temel hasar tipleri (TS EN ISO 10365)

Adhezyon Hasarı: Yapıştırıcı malzemenin, yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın olduğu kopma olayıdır. Deney sonuçlarında alüminyum numunede karşılaşılan adhezyon hasarının fotoğrafı Şekil 2.4'de verilmiştir



Şekil 2.4 Adhezyon hasarının fotoğraf olarak gösterilmesi

Adhezyon kopmasını önleyebilmek için;

- Uygun yapıştırma boşluğu, tolerans ve uygun malzeme seçilmelidir.
- Yüzeyler uygun temizleme yöntemleri ile temizlenmelidir.
- Sertleşme işleminin tam olarak gerçekleşip gerçekleşmediğinden emin olunmalıdır. Ortam sıcaklığı ve nem kontrol altında tutulmalıdır.
- Yüzey alanı genişletilmeli ya da uygun geometri ve kuvvet uygulanmalıdır.
- Çalışma sıcaklığına uygun yapıştırıcı seçilmelidir.

Kohezyon Hasarı: Bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın olduğu kopma şeklidir. Deney sonuçlarında bakır numunede karşılaşılan kohezyon hasarının fotoğrafı Şekil 2.5’de verilmiştir.



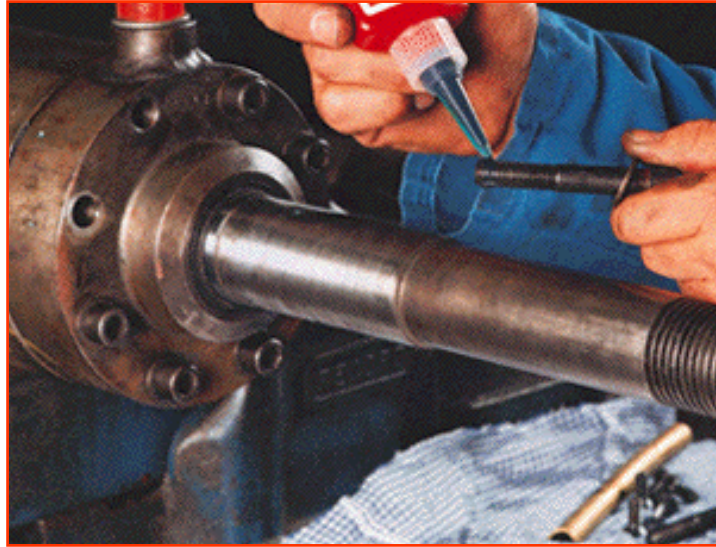
Şekil 2.5 Kohezyon hasarının fotoğraf olarak gösterilmesi

Normal şartlar altındaki yüklemelerde ve deneysel çalışmalarda, kohezyon kopmasının meydana gelmesi istenir. Eğer adhezyon kopması meydana geliyorsa yapıştırma prosesinde bir yanlışlık yapılmış sonucuna varılabilir.

2.1.5 Yapıştırıcıların Kullanım Yerleri

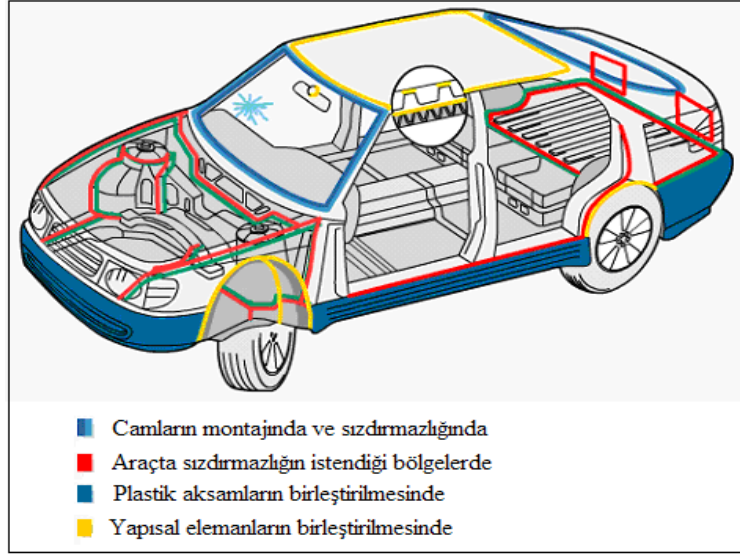
Yapıştırıcıların özelliklerindeki gelişmelerden dolayı, metallerin yapıştırılmasında da büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Kaynak veya diğer metotlarla birleştirilmeleri mümkün olmayan iki farklı metalin yapıştırılması, metal-kompozit birleştirmeleri, otomotiv endüstrisinde şasi üretiminde punta kaynağı ile birlikte kullanılmaları, uzay ve uçak sanayisinde hafiflik için tasarlanan petek yapı ile dış cidarın birleştirilmesi, dişli kutuları ve motor gövde bloklarında sızdırmazlık elemanı olarak kullanılmaları gün geçtikçe artmaktadır.

Cıvataların çözülmeye karşı emniyete alınmaları için yapıştırıcı kullanımı, diğer emniyete alma metotlarına (taçlı somun, tırtıklı somun vs.) nazaran daha ekonomik ve pratik imkânlar sunmaktadır. Şekil 2.6'da bir makine elemanında cıvataları çözülmeye karşı emniyete almak için yapıştırıcı kullanılmaktadır.



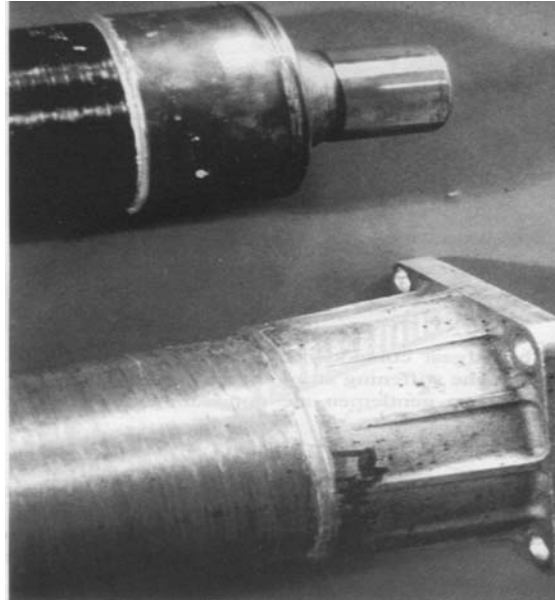
Şekil 2.6 Cıvataların çözülmeye karşı yapıştırıcı ile emniyete alınması (LOCTITE, 1998)

Otomotiv endüstrisinde de yapıştırıcıların oldukça geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Mil göbek bağlantılarının emniyete alınmasında, rulmanlı yatakların montaj işlemlerinde, motor bloğu-kapak sızdırmazlıklarının sağlanmasında sıvı conta olarak, kapı panellerinin oluşturulmasında ve birçok cam, plastik parçaların birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Şekil 2.7'de bir otomobilde yapıştırıcıların kullanım alanları gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Otomobilde yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar

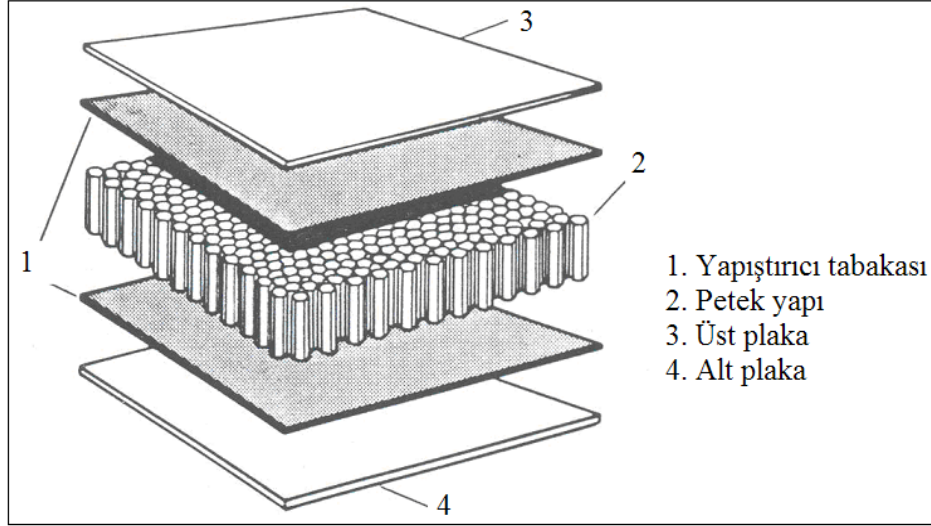
Şekil 2.8'de Peugeot yarış arabalarında kullanılan tahrik mili ve bir yatak görülmektedir. Yarış arabalarının hafif olması istendiğinden milin bir kısmı kompozit malzemeden, uç bağlantı kısmı ise metalik malzemeden yapılmış, bunlar daha sonra yapıştırıcı ile birleştirilmiştir.



Şekil 2.8 Peugeot yarış arabasının tahrik milinde yapıştırıcı kullanımı (KINLOCH, 1997)

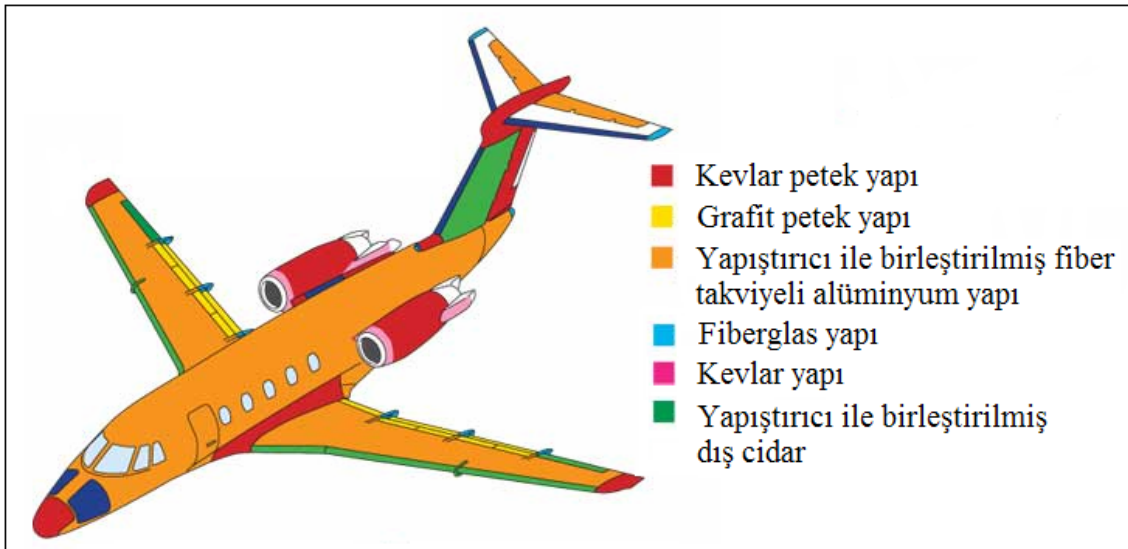
Günümüzde yapıştırıcıların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan birisi de uzay ve uçak sanayisidir. Uçak gövdelerinde ve kanatlarında büyük miktarlarda yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Şekil 2.9'da uçak konstrüksiyonlarında kullanılan ve yapıştırıcı kullanılarak imal edilen sandviç yapı görülmektedir. Bu yapıda alt ve üst kısımdaki

plakalar (genellikle alüminyum alaşımı), aradaki petek tipi yapılara, yapıştırıcı aracılığıyla birleştirilmektedir.



Şekil 2.9 Uçak yapılarındaki sandviç panellerde yapıştırıcı kullanımı (ASM, 1990)

Şekil 2. 10'dan da görüleceği üzere uçakların büyük bir kısmı kompozit yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılarda kullanılan petek dokulu sandviç yapılarda yapıştırıcı ile birleştirme tekniği kullanılmaktadır.



Şekil 2.10 Uçaklarda yapıştırıcının kullanıldığı bölgeler

2.1.6 Yapıştırmanın Avantajları

- Düzgün gerilme dağılımı ve daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi,
- Herhangi bir şekilde ince ve kalın malzemelerin birleştirilmesi,
- Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesi,
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı,
- Düzgün yüzeyli birleştirme olanağı,
- Değişik ortamlara karşı bağlantıda yalıtım olanağı sağlaması,
- Birçok teknolojiye kolaylıkla uygulanabilir,
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan olarak kullanılabilmesi,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümlenme kabiliyeti,
- Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranı,
- Mekanik birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve ucuz olması.

2.1.7 Yapıştırmanın Dezavantajları

- Parçaların birleştirilmesi zordur. Yüzey hazırlığı ve temizliği gerektirir.
- Yapıştırıcının mekanik özellikleri zaman ve sıcaklığa bağımlılık gösterir.
- Düşük soyulma dayanımı ve darbe dayanımı,
- Bağlantı ya da yapıştırıcın performansı ile ilgili verilerdeki eksiklikler
- Yapıştırma bağlantısının ömrü maruz kaldığı çevresel etkilere bağımlıdır.
- Kürleşme mekanizması pratik olmayabilir.

2.2 YAPIŞTIRICI ÇEŞİTLERİ

Yapıştırıcı, malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanabilir. Yapıştırıcılar; sıvı, katı, macun, bant gibi birçok fiziksel şekilde olabilir. Yapısal ve yapısal olmayan yapıştırma işlemi olarak iki temel yapıştırıcı ile birleştirme tipi vardır. Yapısal yapıştırma dizayn sınırları içinde yapının sürekliliğini kaybetmeden yük taşıyabilen yapıştırıcı ile birleştirme sistemidir. Yapısal yapıştırıcılar, yük taşıyabilen yapıştırıcılardır. Birleştirilecek elemanlara dayanım katarlar. Bu yapıştırıcılar uzay sanayi, otomotiv endüstrisi gemicilik vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Yaklaşık 10 tipte yapıştırıcı bu gruba girmektedir. Önemli olanlar;

- Akriklikler
- Anaerobikler
- Siyanoakrilatlar
- Modifiye edilmiş fenolikler
- Poliüretanlar
- Epoksiler

2.2.1 Akriklikler

Bu yapıştırıcılar genellikle daha kirli ve daha az yüzey hazırlığını tolere edebilecek kimyasal içeriğe sahiptirler. Kayma dayanımları epoksiler kadar iyidir. Soyulma ve darbe dayanımları iyidir. Esnek bağlantı oluştururlar. Akriklikler iki bileşenli yapıştırıcılardır. Reçine yapıştırılacak yüzeylerden birine uygulanırken, diğer bileşen öbür yüzeye uygulanır. Yüzeylerin birleştirilmesinden hemen birkaç dakika sonrasında tutunma dayanımı sağlanır. İşlem oda sıcaklığında sağlanabilir. Ticari örnek olarak Permabond Qickbond 5002, F246, F241, Vox vinil oksiran, Loctite 315, 322, 330, 3100, verilebilir.

2.2.2 Anaerobikler

En kolay uygulanabilen yapısal yapıştırıcılardan biridir. Yapışma işlemini oksijensizlik ya da havasızlık tetiklediğinden, vaktinden evvel işlem gerçekleşmez bu yapıştırıcılar akrilik polyester reçine esaslıdır. Yüksek kohezyon dayanımı oluşturmalarına rağmen düşük yapıştırıcı dayanımına sahiptirler ve geçirgen malzemelerle kullanıma uygun değildir. Çapta 0,25mm boşluklara kadar kullanılmaktadır. Bazı firmalara ait anaerobik yapıştırıcılar Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Anaerobik yapıştırıcılar için ticari örnekler

Üretici Firma	Ticari Adı
Loctite	638, 641, 648, 660, 222, 243, 366, 545
Loxreal	83-21, 12-36, 70-14, 70-90, 85-55, 26-18
Weicon	AN 302-21, AN 302-62, AN 305-86
Devcon	Retaining Compound 2609, 2680
Permabond	Perma-Lok A1042, A1044, A1046

2.2.3 Siyanoakrilatlar

Kolayca uygulanan ve çabuk yapışma işleminin gerçekleştiği yapıştırıcı çeşididir. Yapıştırılacak olan yüzeyler üzerinde bulunan nem ile reaksiyona girerek sertleşirler. Bazıları birkaç saniye içerisinde bağlantı dayanımı oluştururlar. Siyanoakrilatların en büyük avantajı plastiklerin kendileriyle veya diğer malzemeler ile birleştirilebilmesidir. Bu yapıştırıcılar düşük darbe dayanımına sahip olup neme ve kimyasal çözeltilere karşı oldukça hassastırlar. Küçük alanların birleştirilmesi için uygundur. Boşluk doldurma özellikleri iyi olmamakla beraber diğer yapıştırıcılara göre pahalıdırlar. Bazı firmalara ait siyanoakrilat yapıştırıcılar Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Siyanoakrilat yapıştırıcılar için ticari örnekler

Üretici Firma	Ticari Adı
Loctite	401, 406, 411, 454, 468, 480, 4210
Loxreal	ISTANT14, ISTANT17, ISTANT43
Weicon	VA1460, VA120, VM2000, VA300
Devcon	ZipGrip4404, ZipGripHV2200
Permabond	910, 2010, 792, 268

2.2.4 Modifiye Edilmiş Fenolikler

Fenol-formaldehit esaslıdır. Yüksek mukavemet gerektiren metal- metal, metal-ağaç, metal-kâğıt, metal-kompozit esaslı fen pabucu yapıştırımları için oldukça iyidir. Sertleştiklerinde termoset halini alırlar. Sertleşmeleri için ısı ve basınç uygulamak gerekir. Sertleştiklerinde fenolik reçineler gevrek bir yapı elde edilir. Bunu önlemek için bileşimlerine epoksi, neopran, nitril kauçuk gibi malzemeler ilave edilir.

Aşındırıcı taşların, zımparaların yapıştırılmasında da kullanılır. Günümüzde uçakların dış yüzey kaplamasında ve uzay sanayisinde de kullanılmaktadır. Nem, yağ solvent ve hidro karbonlara karşı dirençleri yüksektir. Kesmeye zorlanan

bindirme bağlantılarında mukavemet değerleri yüksektir. Bazı firmalara ait ticari örnekler Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3 Fenolik reçineler için ticari örnekler

Üretici Firma	Ticari Adı
Union Carbide	Plyophen 5023
Reichold	Bakalite BV 9700
Hooker	Durez 16227
Ciba	Redux 775

2.2.5 Poliüretanlar

Poliüretan yapıştırıcılar, tek ya da iki bileşenli ve hızla sertleşen yapıştırıcılardır. Tek bileşenli olanlar, yüzey nemi ile reaksiyona girerek, çift bileşenli olanlar ise aktivatör yardımı ile polimerize olurlar. Yüksek kohezyon dayanımı ve darbe mukavemetine sahiptirler. Aşınmaya karşı dirençleri yüksektir. Bazı firmalara ait poliüretan örnekleri Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4 Poliüretanlar için ticari örnekler

Üretici Firma	Ticari Adı
Loctite	3951, 5221
Bayer	Baydur, Bayflex, Desmocoll, Desmodur
BASF	Lumitol, Polyesteralkol, Elastophen
Hustman	Daltogel, Daltolac, Daltorez

2.2.6 Epoksiler

2.2.6.1 Epoksi Reçineleri

Epoksi reçineleri birden fazla epoksi grubu içeren ve termoset ürünlere dönüşen ön polimerlerdir. Epoksi reçinesi sertleştirilmemiş haliyle viskoz sıvı veya kırılğan katı halde bulunan ve ısıtıldığında sıvı hale gelen bir polimerdir.

Kürleşmemiş sıvı haldeki epoksi reçineleri, epoksi içeriği, viskozitesi, rengi, hidrolize olabilen klor ve uçucu madde miktarıyla karakterize olmaktadır. Katı halde olan epoksi reçineleri, yine epoksi içeriği, katı maddelerin erime sıcaklığı renk ve uçucu madde miktarı ile tanımlanmaktadır. Her iki durumda da epoksi miktarı en önemli özelliği arasında yer almaktadır.

Epoksi reçineleri kendi başlarına kullanılmazlar, formülasyona katılan başka maddelerle polimerize olarak veya çapraz bağlanarak değişik özelliklere sahip termoset yapıda plastik madde oluştururlar. Kimyasal reaksiyon sonucu elde edilen sert, geri dönüşü olmayan aşağıdaki özellikleri olan reçine meydana gelmektedir.

- Değişik yüzeylere mükemmel yapışma
- Aşınmaya karşı dayanıklılık
- İyi elektriksel özellikler
- Pişerek serleşme esnasında yan ürünlerin oluşmaması
- Pişme sonucu büzülmenin oluşmaması
- Boşluk doldurma özelliğine sahip olması
- Alkali, asit ve çözücülere rutubete karşı dayanıklılık
- Birbirine benzemeyen farklı malzemeleri yapıştırma
- Düşük sıcaklıklarda yük altında uzun süre kullanılması

Bu sonucu özelliği nedeni ile epoksi reçinesinde yapılan yapıştırıcılar, metallere, ahşap, cam ve seramiğe kolayca yapışırlar. Çok asidik bir ortam olmadıkça, kimyasal olarak değişik şartlar altında kimyasallara karşı oldukça dayanıklılık gösterirler.

Epoksi yapıştırıcıları, sıvı halde iken kürleşerek sert, katı hale dönüşmektedir ve kürleşme sırasında, termoplastik yapıdan termoset bir yapıya geçerler. Sertleştiriciler, polimerizasyon için ya bir katalizör ya da çapraz bağlama bileşimidir. Tablo 2.5’de epoksi reçinelerde kullanılan sertleştiriciler ve özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.5 Epoksi reçinelerinde kullanılan sertleştiriciler

Serleştirici	Kürleşme Süresi	Açıkta Kalma	Özellikleri
Aromatik Sulfonik Asit	2–5 dakika	1–2 dakika	Hemen sertleşme sağlar
Primer Aminler	2–4 saat	30 dakika	Oda sıcaklığında hızlı sertleşme
Poliamid	8 saat	4 saat	Oda sıcaklığında yavaş sertleşme
Aromatik Aminler	2 saat	12 saat	120°C de hızlı sertleşme, mükemmel ısı ve kimyasal direnç
Tersiyer Aminler	30 dakika	2–24 saat	120°C de hızlı kürleşme
Boron Tri Florür (Lewis Asidi)	4 saat	6 aya kadar	120°C de hızlı kürleşme, zayıf yapışma

Epoksi yapıştırıcılarının özellikle iki bileşenli olan yapıştırıcıların bileşenlerinden biri sertleştiricilerdir. Epoksi reçineleri, yapıştırıcı kullanılacağı zaman sertleştirici ile karıştırılmaktadır. Sertleştirici ile reaksiyona giren epoksi reçinesi kürleşerek malzemeleri yapışmalarını sağlarlar.

Kullanılan sertleştiricinin cinsine bağlı olarak değişik özelliklerde yapıştırıcı elde edilmektedir. Epoksi yapıştırıcılarında sertleştiriciler reaktivitelerine bağlı olarak 50-100% arasında kullanılırlar. Sertleştirici epoksi reçinesine karıştığı zaman reçine sertleşmeden önce yapıştırıcı kullanılmalıdır.

Epoksi reçinelerine katılan farklı özellikleri olan sertleştiricilerle açıkta kalma süresi farklı olan yapıştırıcılar elde edilir. Açıkta kalma süresi, bir yapıştırıcının özellikle iki bileşenli yapıştırıcılarda sertleştirici katıldıktan sonra katılacağı için geçen süre olarak bilinmektedir.

2.2.6.2 Epoksi Yapıştırıcıları

Epoksi yapıştırıcıları, değişik özelliklere sahip olmaları ve çok kuvvetli yapışma sağlamaları nedeniyle yapıştırıcılar arasında en çok kullanım alanına sahip olan türlerdendir. Epoksi yapıştırıcıları, farklı malzemeleri ve yüzeyleri yapıştırmada çok etkindirler. Metaller, plastikler, ağaç, cam, seramik, beton ve benzeri malzemeler, epoksi yapıştırıcılarının yapıştırdığı malzemeler arasında bulunanların başlıcalarıdır. Bu kadar farklı özellikte olan malzemeleri ya kendilerine ya da başka malzemelere yapıştırmak, epoksi yapıştırıcılarının ıslatma, penetrasyon kabiliyetinden, düşük viskoziteli oluşlarından ve bünyesinde polar ve nonpolar grupları bulundurmasından kaynaklanmaktadır. Polar ve nonpolar fonksiyonel grupların oluşu, farklı polaritede olan malzemelerin birbirlerine karşı olan çekiciliğini artırır. Metallerin plastiklere, betonun kauçuğa yapıştırılması epoksi yapıştırıcılarının polaritesiyle ilgili olan dikkate değer örneklerdir.

Epoksi yapıştırıcılarının kendi molekülleri arasındaki çekim gücü (kohezyon kuvveti) diğer yapıştırıcılara göre en kuvvetli olanıdır. Ancak epoksi yapıştırıcılarının bu özeliği yapıştırıcıya katılan dolgu maddeleri ve modifiye edici maddelerle değişebilmektedir.

Epoksi yapıştırıcıları, uçaklarda otomobil endüstrisinde, elektrik ve elektronik sanayisinde, inşaat, gemi yapımında, ağaç, kâğıt, metallerin, seramik ve camın yapıştırılmasında kullanılmaktadırlar. Uçak sanayisinde alüminyum parçaların kendi içinde veya diğer metalik parçalara yapıştırılmasında, plastik maddeleri ve bu malzemelerden yapılmış petekleri yapıştırmada kullanılmaktadırlar. Otomotiv sanayisinde kaynak yerine ve birçok parçanın yapıştırılmasında, elektrik sanayisinde, elektrik motorlarının ve transformatörlerinin laminasyonunda, basılı devrelerin kapsül içine alınmasında ve korunmasında, sıcaklık ve sarsıntı ile yerinden oynaması

muhtemel parçaların tutturulmasında kullanılmaktadır. Bazı firmalara ait epoksi yapıştırıcılar Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6 Epoksi yapıştırıcılar için ticari örnekler

Üretici Firma	Ticari Adı
Loctite	3607, 3609, 3106, 3611, 3612, 3380
Loxreal	31-10, 31-40, 34-15, 35-44, 36-10, 36-15
Weicon	WeiconA, WeiconC, WeiconSF, WeiconWR
Devcon	One-Minute Epoxy Gel, HP-250
Permabond	E04, E32, ESP110

Epoksi reçineleri, termoplastik ve termoset reçineleriyle karıştırılarak değişik özelliklere sahip yapıştırıcıların yapılmasında kullanılırlar. Epoksi reçinelerinin diğer reçinelerle yapmış olduğu iki polimerli yapıştırıcılar, hem epoksi yapıştırıcılarına daha geniş bir kullanım alanı sağlamakta hem de özel maksatlarda ve değişik şartlarda kullanılabilen yapıştırıcıların elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Epoksi-polisülfite yapıştırıcısı: Polisülfite-epoksi karışımıyla elde edilen yapıştırıcının özellikleri polisülfite/epoksi oranına, kullanılan sertleştiriciye, dolgu maddesi ve diğer katkı maddelerine bağlı olarak değişmektedir. Formüle edilen yapıştırıcı genellikle sıvı haldedir ve yapıştırıcı oda sıcaklığında kürleşmektedir. İki bileşenli olarak hazırlanan yapıştırıcının kürleşmesi oda sıcaklığında uzun zaman almaktadır. 20°C sıcaklıkta 24 saat olan kürleşme süresi, sıcaklığın 100°C ye çıkmasıyla 15–20 dakikaya düşmektedir. Yapıştırıcı hava şartlarına, suya, hidrokarbon, alkol ve ketonlara karşı oldukça dayanıklıdır. Yapışma sonucu esnekliğin istendiği yerlerde kullanılmaktadır. Ancak normal epoksi yapıştırıcısına göre daha fazla büzülme meydana gelmektedir. Rutubeti emmesi ve bazı metallerde korozyona sebep olması, epoksi reçinesiyle yapılan yapıştırıcılara göre dezavantaj olarak görülmektedir.

Epoksi-fenolik yapıştırıcısı: Yapıştırıcılardan kullanım yerine göre yüksek sıcaklıklara karşı direnç sağlamaları ve daha uzun süre kullanılmaları istemektedir. Bu maksada uygun olarak hazırlanan epoksi-fenolik yapıştırıcısı 60°C ve 260°C gibi bir sıcaklık aralığında kullanılmaktadır. Bu kullanım sıcaklık aralığında karışım, oldukça iyi mekanik özelliklere sahip bulunmaktadır. Yapıştırıcının malzeme ile yaptığı yapışma kohezyon gücünden fazladır. Epoksi-fenolik yapıştırıcısı metali metale yağıştırmada, uçak ve füze yapımı gibi yapısal uygulamalarda

kullanılmaktadır. Takviye edilmiş plastiklerin yapıştırılması ve yüksek sıcaklıklarda kullanılan seramik parçaların yapıştırılmasında oldukça olumlu sonuçlar vermektedir. Yapıştırıcının kürleşmesi yüksek sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Epoksi-fenolik yapıştırıcıları yüksek sıcaklıkta başarıyla kullanılmalarının aksine kriyojenik sistemlerde kırılıp gırdırlar ve çatlamaktadırlar. Bu sebeple, düşük sıcaklıklarda kullanılmaları için formülasyonda değişiklik yapmak ve yapıştırıcının düşük sıcaklıktaki esnekliğini artırmak için ilave katkı maddeleri kullanmak gerekir.

Epoksi-poliamid yapıştırıcısı: Oda sıcaklığında iki bileşenli hazırlanan yapıştırıcıda, epoksi reçinesine katılan poliamid miktarının artması, yapıştırıcının daha esnek olmasını, ayırma gücünün kuvvetli olmasını sağlamaktadır. Poliamid miktarının az olmasıyla daha sert, aromatik ve alifatik çözücülere ve yağlara, tuzlu suya dayanıklı, çekme-uzama dayanımı kuvvetli olan bir yapıştırıcı elde edilir. Her iki durumda da hem mekaniksel özellikleri mükemmel, hem de yapıştırıcıdan beklenen şartların tamamının karşılandığı görmek mümkün değildir. Epoksi-poliamid karışımıyla değişik formülasyonlar hazırlanarak yapısal yapıştırıcı olarak, metal cam ve seramik gibi malzemelerin ya kendilerine ya da farklı malzemelere yapıştırılmasını mümkün kılan yapıştırıcılar üretilebilmektedir. Epoksi-poliamid yapıştırıcılarının en önemli özelliği, genleşmesi farklı olan malzemelerin yapıştırılması ve -70°C ile 120°C arasında değişen sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır.

Epoksi-naylon yapıştırıcısı: Epoksi-naylon karışımıyla elde edilen yapıştırıcı katı, sert ve kuvvetli bir yapıştırıcı vermektedir. Yapıştırıcı, -120°C ve 300°C gibi geniş sıcaklık aralığında kullanılmaktadır. Şok ve vibrasyona karşı üstün dayanma özelliği bulunmaktadır. Ancak rutubete ve kimyasallara karşı direnci azdır. Kürleşme için ısı ve basınca ihtiyaç duyulmaktadır. Metallerin yapıştırılmasında, alüminyumun oluklu sandviç sistemlerine yapıştırılmasında ve uçak sanayisinde kullanılmaktadır.

2.3 DARBE YÜKÜ, YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA DARBE YÜKÜNÜN ÖNEMİ VE TEST YÖNTEMLERİ

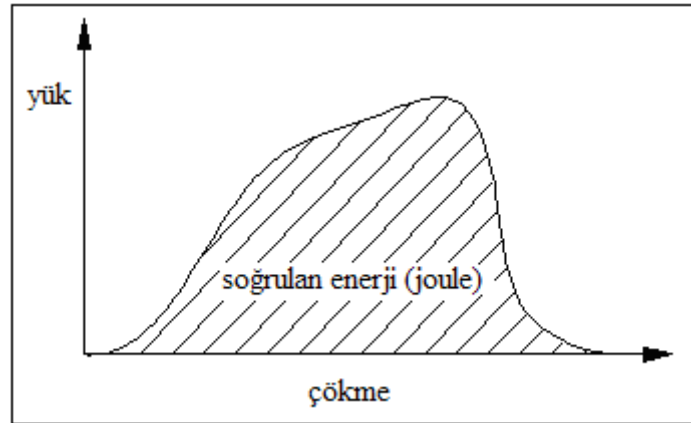
2.3.1 Darbenin Tanımı

Darbe; düşük, orta ve yüksek hızlarda çok kısa bir sürede malzeme üzerine kısmi veya çok büyük kuvvetlerin uygulanması şeklinde tanımlanır. Mühendislikte yaygın olarak kullanılan malzemelerin darbelere karşı davranışları elastik ve/veya plastik deformasyon olarak görülmektedir. Kompozit malzemelerde ise çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalan veya kalmayan bölgede de genellikle gözle görülemeyen veya çok zayıf şekilde görülebilen hasarlar meydana gelebilir. Darbe süresince malzeme tarafından soğurulan enerji, bu malzemenin mukavemetinin ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle düşük ve yüksek hızlarda deney

parçasının kırılmasında soğurulan enerji miktarını ölçmek darbe deneyinin en önemli amacı olmaktadır.

Malzemenin yüksek oranda ani yüklemelere karşı göstermiş olduğu dirence *darbe direnci* denir. Malzemelerin darbe yüklerine karşı davranışları oldukça karmaşıktır. Yüksek hızlardaki darbe malzeme üzerinde gözle görülür hasarlar meydana getirir. Fakat düşük ve orta hızlardaki darbe daha az önemli gibi görünse de malzemenin içerisinde mikro çatlaklara neden olabilir. Önceden görülemeyen ve potansiyel tehlike arz eden bu hasarlar çalışma esnasında büyüyerek büyük felaketlere sebebiyet verebilir. Malzemelerin darbe direncinin tespit edilmesi birçok mühendislik uygulamalarında parçaların çalışma ömrünün ölçülmesi bakımından oldukça önem arz etmektedir.

Darbe yükleri parça bünyesinde darbe enerjisine dönüşerek parça tarafından hasara uğrayana kadar soğrulacaktır. Şekil 2.11'de darbe esnasında yük-çökme eğrisi görülmektedir. Bu eğri altında kalan alan soğrulan enerjiyi vermektedir.

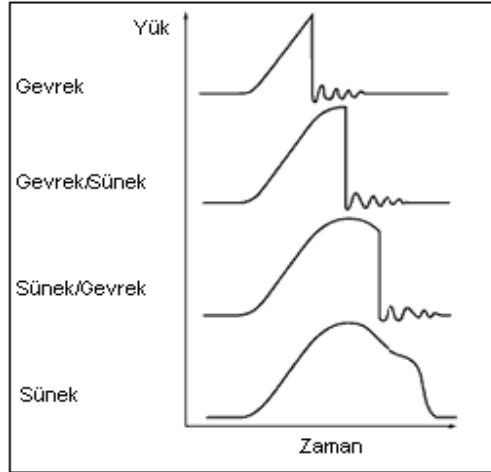


Şekil 2.11 Yük-çökme eğrisi

2.3.2 Sünek ve Gevrek Malzemelerin Darbe Davranışı

Darbe parça üzerine genelde tek eksenliden çok iki eksenli olarak etki eder. Parçanın sünek veya gevrek oluşu, kalıplama ile üretilen bir malzeme üzerinde gerilmelerin bulunması, plastik bir malzeme için polimerlerin dizilimi, zayıf nokta kaynakları ve parça geometrisi gibi birçok çeşitli faktörler darbe performansını etkiler. Birçok malzeme, test tipine ve sıcaklık koşuluna göre ya sünek ya da gevrek hasara uğratılabilir. Örneğin bir malzeme üzerine eğer plastik kaplama yapılabiliyorsa darbe özelliği bu kaplama ile değiştirilebilir.

Gevrek malzeme üzerinde küçük bir darbe enerjisiyle çatlak meydana gelir ve meydana gelen bu çatlakın zamanla büyümesiyle malzeme parçalanır.



Şekil 2.12 Sünek ve gevrek malzemelerin yük-zaman eğrileri

2.3.3 Yapıştırma Bağlantılarında Darbe Yükünün Önemi

Hayatımızı kolaylaştıran ürünlerin birçoğunda yapıştırma bağlantılı birleştirmeler mevcuttur ve bunlar zaman zaman darbe yüküne maruz kalmaktadır. Örneğin mobil telefonlarda bir takım bağlantılar yapıştırıcılar ile sağlanmaktadır. Telefon yere düşürüldüğünde veya başka nedenlerle darbelere maruz kalacağından bu tarz etkenler karşısında ürün garanti edilmelidir. Bir başka örnek olarak, yolcu araçlarında kaynaklı bağlantı kadar yapıştırma bağlantıları da mevcuttur. Kapı panelleri, motor kaportası ve birçok plastik aksam uygun geometrilerde yapıştırma ile birleştirilmektedir. Bu yüzden kaza durumunda ani çarpmalara karşı bu bağlantıların davranışları önem arz etmektedir.

Bu açıdan özellikle insan can güvenliğinin söz konusu olduğu durumlarda darbe yüküne maruz kalmış yapılarda oluşacak hasarların ve gerilmelerin tahmin edilip sonuçların değerlendirilebilmesi gerekmektedir.

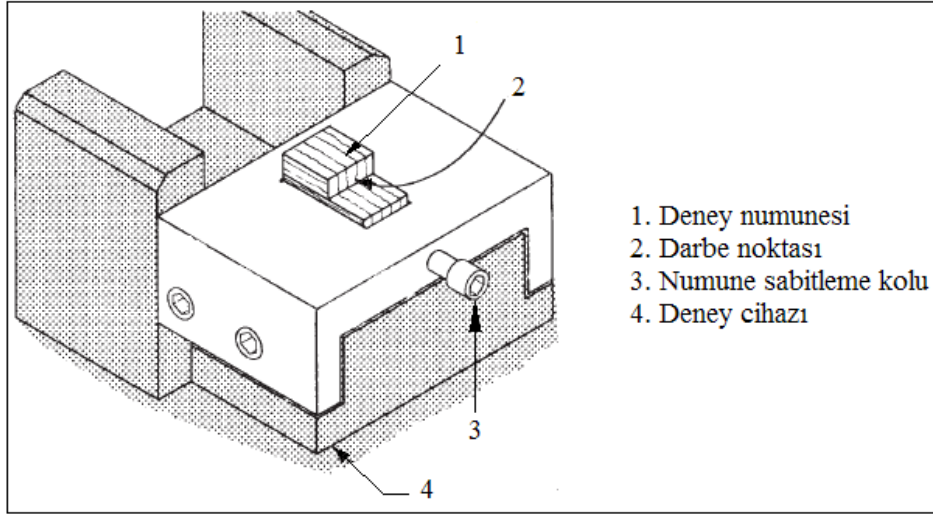
2.3.4 Yapıştırıcıların ve Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Testleri İçin Kullanılan Deneysel Yöntemler

Malzemelerin darbe performanslarını belirleyebilmek için birçok metot geliştirilmiştir ve bunların bir kısmı standardize edilmiştir. Bu metotlar içinde düşük darbe hızlarında en çok kullanılan sarkaç çekiç (pendulum hammer) in kullanıldığı IZOD ve CHARPY test metotlarıdır.

2.3.4.1 Sarkaç Testi (Pendulum Test)

Yapıştırma bağlantılı birleştirmelerin darbe yükü altında gerilmelerini tayin etmek için sarkaç test metodlarından biri olan ASTM Block Impact Test (ASTM D950-3) standardı kullanılmaktadır.

Bu testte deney numunesi iki bloktan oluşmaktadır. Deney için test makinesine bağlanan büyük blok üzerine küçük blok yapıştırılarak çekici küçük bloğa çarptırmak suretiyle darbe yükü uygulanmaktadır. Sistem Şekil 2.13'de gösterilmiştir.

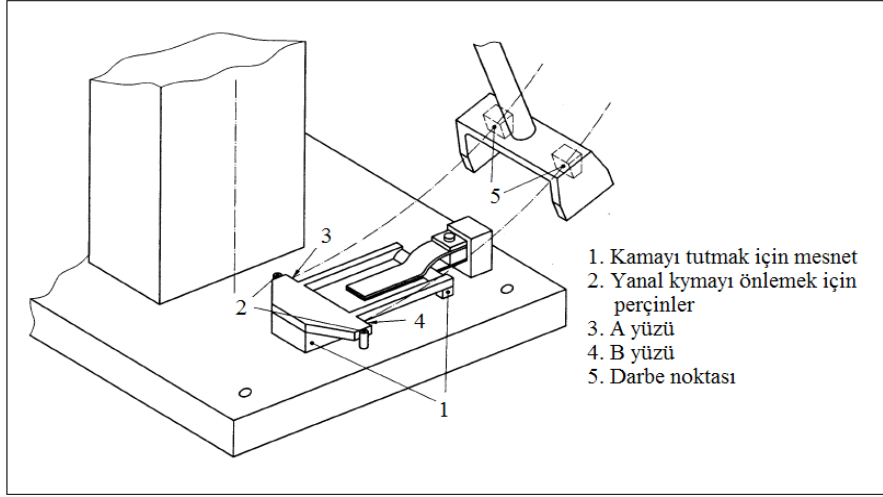


Şekil 2.13 Deney numunesinin çentik (Izod) darbe cihazına bağlanması (ASTM D950-3)

Yapıştırılmış numunenin deney sonunda absorbe ettiği darbe enerjisi, çekicinin ilk durumdaki potansiyel enerjisi ile çarpışma sonrasındaki potansiyel enerjisi arasındaki fark kadardır.

Sarkaç test metodlarından bir diğeri de iki metalik levhayı birbirine yapıştırmış yüksek mukavemetli yapıştırıcıların darbeleri uygulamalarda ayrılmaya karşı dinamik tayini için kullanılan Kamalı Darbe Metodu'dur (Wedge Impact Method, TS EN ISO 11343). Birbirine yapıştırılmış levhaların ayrılma işlemi, yüksek hızla hareket eden ve yer değiştirmesi bir darbe ile başlatılan bir kama yardımıyla yapılır (Şekil 2.14).

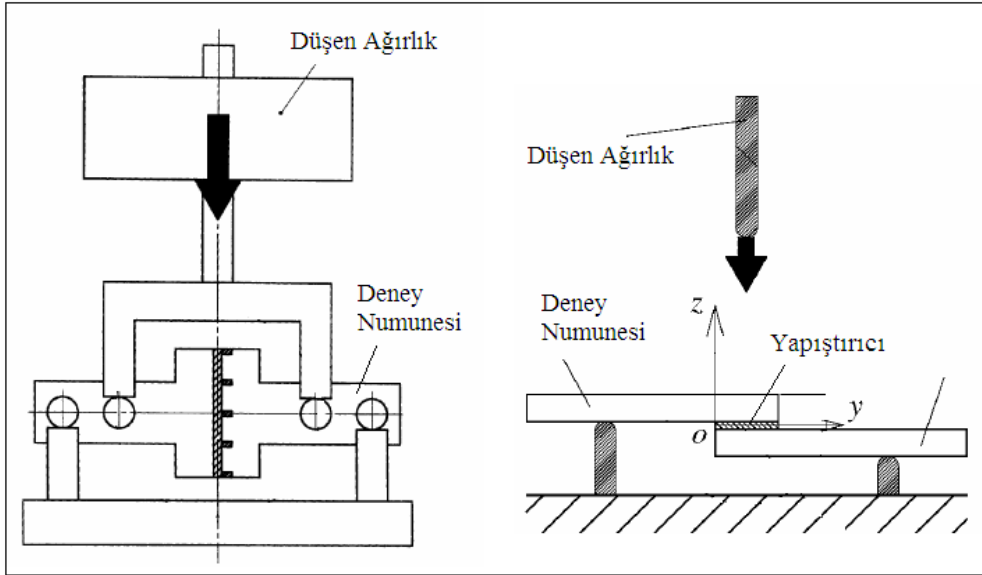
Deney sonuçlarında darbeleri uygulamaya ait kuvvet – zaman (veya kuvvet – yer değiştirme) verilerinden, ortalama ayırma kuvveti hesaplanır. Ortalama ayırma kuvveti deney numunesinin genişliğine bölünerek, numune genişliğinin her metresi başına kilo Newton (kN) cinsinden ayrılmaya karşı dinamik dayanım bulunur.



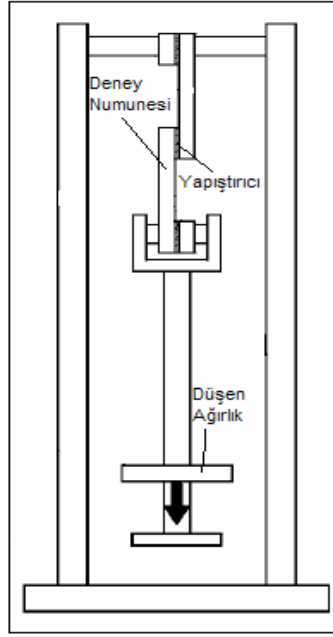
Şekil 2.14 Sarkaç tipi darbe uygulamalı kamalı deney düzeneği (TS EN ISO 11343)

2.3.4.2 Ağırlık Düşürme Testi (Drop-Weight Tester)

Sık kullanılan darbe test metotlarından biride ağırlık düşürmeli test metodudur. Sarkaç testlerinde darbe limiti sınırlıdır ancak ağırlık düşürmeli bir test cihazında istenilen darbe enerjisinde delme ve tekrarlı darbe uygulanması gibi testler yapılabilir. Literatürde (HIGUCHI ve diğerleri, 2002) yapılan çalışmalarda tek tesirli bindirme bağlantıları ve alın altına bağlantılar için ağırlık düşürme yöntemi kullanılarak darbe eğilme momenti, darbe çeki yükü gibi yüklemeler altında, x-y-z eksenlerinde meydana gelen gerilmeler ve çökmeler analiz edilmiştir.



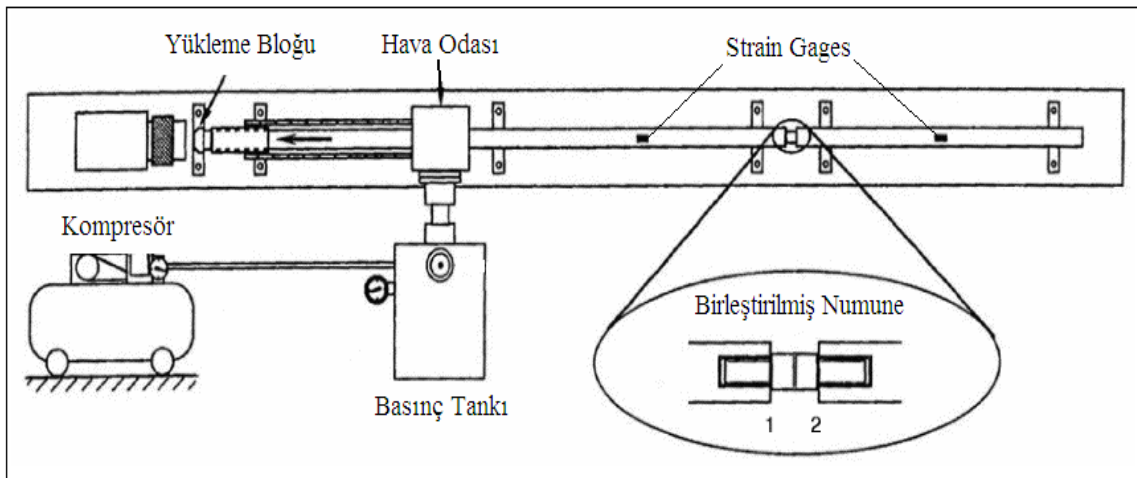
Şekil 2.15 Ağırlık düşürerek eğilme momenti uygulanması



Şekil 2.16 Darbe çeki yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısı

2.3.4.3 Split-Hopkinson Çubuğu (Kolsky Bar)

Bu test sistemi, yüksek gerinim hızlarında, gerilme-gerinim değerlerini ölçmede kullanılır. Sistem iki çubuk arasına yerleştirilmiş bir numune ile çubuklardan birine çarpan ve çarpma hızı bilinen bir diğer çubuktan oluşur. Çarpma sırasında çubuklardaki gerinim değişimleri ölçülür. Çubukların ve numunenin kesit alanları ve akustik empedansları arasındaki fark nedeniyle oluşan şok dalgası yansımalarından numune üzerindeki gerinim, gerilme ve gerinim hızı değerleri ölçülür. Ancak bu değerler eşeksenli gerilme varsayımı nedeniyle ortalama değerlerdir.



Şekil 2.17 Split-Hopkinson basınç çubuk test sistemi

2.4 YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapıştırma bağlantı dayanımlarının modellemesine karşı ilginin artması, model çeşitliliğini de beraberinde getirmiştir. Bilinen modelleme teknikleri yaygın şekilde kullanılırken, bazı yeni yöntemler de ön plana çıkmaktadır. Yapay Sinir Ağları (YSA) tekniği de bu yeni teknikler arasında en önemlilerinden birisidir.

Yapay sinir ağları, insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri herhangi bir yardım almadan otomatik olarak yapmak amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Bu yetenekleri geleneksel programlama yöntemleri ile gerçekleştirmek oldukça zor veya mümkün değildir. O nedenle, yapay sinir ağlarının, programlanması çok zor veya mümkün olmayan olaylar için geliştirilmiş uyarlayan (adaptif) bilgi işleme ile ilgilenen bir bilgisayar bilim dalı olduğu söylenebilir (ÖZTEMEL, 2003).

YSA' nın avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. YSA verilerden hareketle, bilinmeyen ilişkileri akıllıca hemen ortaya çıkarabilir. Bu özellikleri uygulama açısından son derece önemlidir. Ayrıca veri toplama için bir ön sorgulama ya da açıklama gerekmemektedir.
2. Ağlar genelleştirilebilir. Bir örnekten hareketle, diğer örneklerdeki benzerlikleri doğru olarak anlayabilirler. Genelleştirme yapılabilmesi çok iyi bir özelliğidir.
3. YSA lineer değildir. Bu özelliği nedeniyle daha karmaşık problemleri lineer tekniklerden daha doğru çözerler. Nonlineer davranışlar hissedilir, algılanır, bilinebilir ancak bu davranışları ya da problemleri matematiksel olarak çözmek zordur.
4. YSA son derece paralelliğe sahiptir. Bağımsız işlemleri aynı anda çok hızlı yürütebilir. Paralel donanımlar yapıları gereği YSA'ya uygun olduğundan alternatiflerinden daha elverişlidir.

Doğal olarak yapay sinir ağlarının da dezavantajları vardır. YSA'lardaki en büyük problem karmaşık sorunları çözmek için ya çok büyük, ya da çok katmanlı ve çok nöron içeren sinir ağlarına ihtiyaç duyulmasıdır. Ne yazık ki YSA'lar büyüdükçe çalışmaları üstel bir şekilde yavaşlamaktadır. Ancak bunu paralel işleme teknolojisi ile kısmen de olsa halletmek mümkündür. Paralel işleme konusundaki önemli ilerlemeler sağlanmış ve çalışmalar hala devam etmektedir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1 DARBE TESTLERİ

3.1.1 Deney Düzeneği

Deneylerde, proje kapsamında temin edilen, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan CEAST P/N 6958.000 marka Izod darbe cihazı kullanılmıştır. Test cihazı maksimum 25J'lük potansiyel enerjiye sahip olup farklı enerji kapasitelerinde çekiçler kullanılabilir. Cihaz termoplastik malzemelerin, esneklik davranışlarını standart gerilme durumlarında, darbe kırılmalıklarına bakarak değerlendirmektedir. şekil 3.1'de deney cihazı fotoğraf olarak verilmiştir.

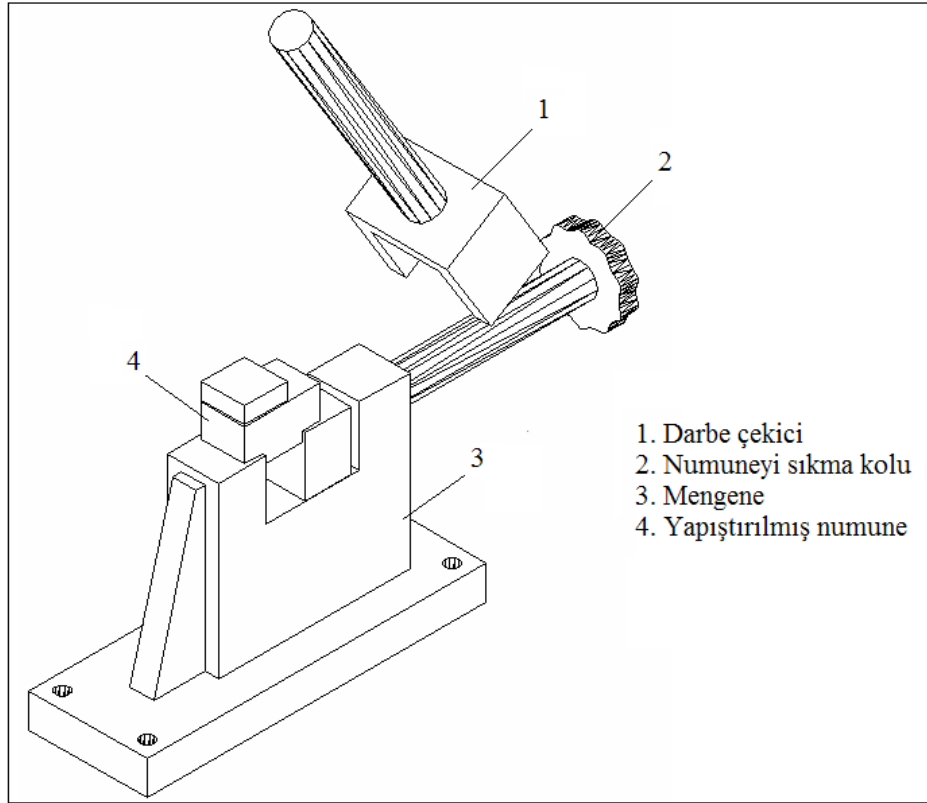


şekil 3.1 Deneylerde kullanılan Izod darbe cihazı

3.1.2 Yükleme Durumu

Deneylerde ASTM D 950-3 standardına göre yapıştırılmış deney numunelerinin darbe dayanımlarının tespit edilmesine çalışılmıştır. Sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için deney sonucunda absorbe edilen enerji, kullanılan çekiçin sahip olduğu potansiyel enerjinin %20'si ile % 80'i arasında bulunmalıdır. Bu nedenle yapılan ön denemelerden sonra çelik, alüminyum ve bakır numuneler için 25J'lük çekiçler kullanılmasına karar verilmiştir.

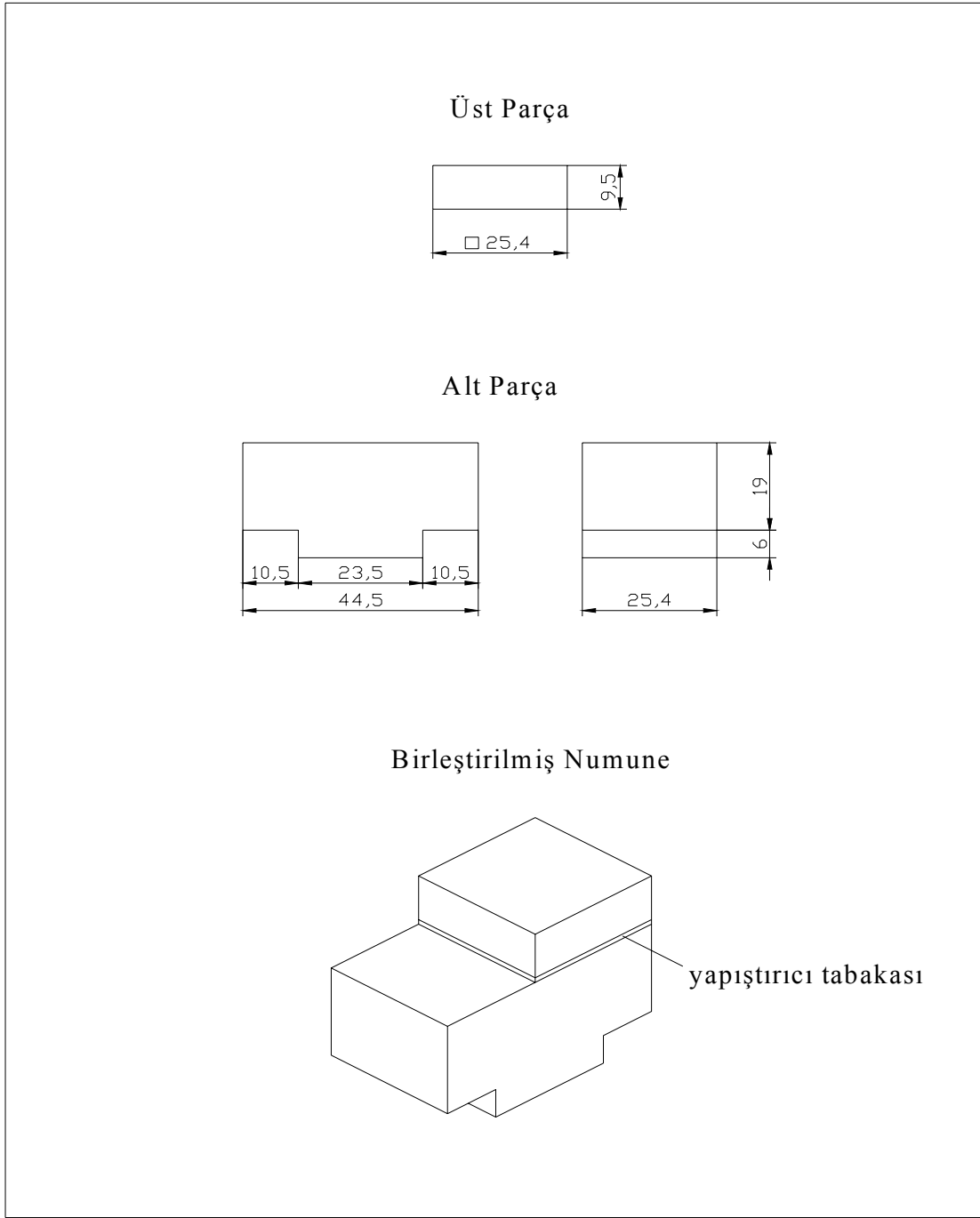
Deney öncesinde, ortam sıcaklığı, kullanılan çekicin potansiyel enerjisi, kullanılmak istenen standart, deney numunesinin eni, boyu, test hızı vb. değerler cihaz üzerindeki kontrol panelinden girilmektedir. Deney sonunda absorbe edilen enerji (J), darbe direnci (kJ/m^2), darbe test hızı (m/s) ve darbe sonrası çekicin yükselme açısı cihazın ekranından okunmaktadır. Elde edilen verileri bilgisayara aktarmakta mümkündür. Şekil 3.2’de yapıştırılan numune üzerine darbe yükünün nasıl uygulandığı gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Deney numunesinin çentik (Izod) darbe test cihazına bağlanması

3.1.3 Deney Numuneleri

Deneylerde sanayide en çok kullanılan malzeme türleri dikkate alınarak çelik, paslanmaz çelik, bakır, alüminyum ve plastik (Delrin) olmak üzere beş farklı malzeme kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, ASTM D 950–3 standardında verilen boyutlara göre imal edilmiştir. Numune boyutları Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Deney numunelerinin boyutları (ASTM D950-03)

İmalatı gerçekleştirilen deney numunelerinin yüzey pürüzlülükleri, proje kapsamında temin edilen ve Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan Mahr Perthometer M2 marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm yapılan cihazın fotoğrafı Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

3.1.4 Deneyleerde Kullanılan Yapıştırıcının Teknik Özellikleri

Deneyleerde Loctite Hysol 3421 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında yavaşça kürleşebilen iki bileşenli (epoksi+hızlandırıcı) bir yapıştırıcıdır. Viskozitesinin düşüklüğü, 180 dakikalık uygulama öncesi yapıştırma süresi ve 1mm'lik yapıştırma kalınlığına kadar, geniş yüzeylerin birleştirilmesi için uygundur. Neme karşı gösterdiği yüksek direnç sayesinde su borularının, deniz botlarının, metal, ağaç, seramik, plastik vb. malzemelerin birleştirilmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Uygulanma sonrasında 240 dakikalık sabitleme süresine sahip yapıştırıcı için üretici firma tarafından belirtilen başlıca fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

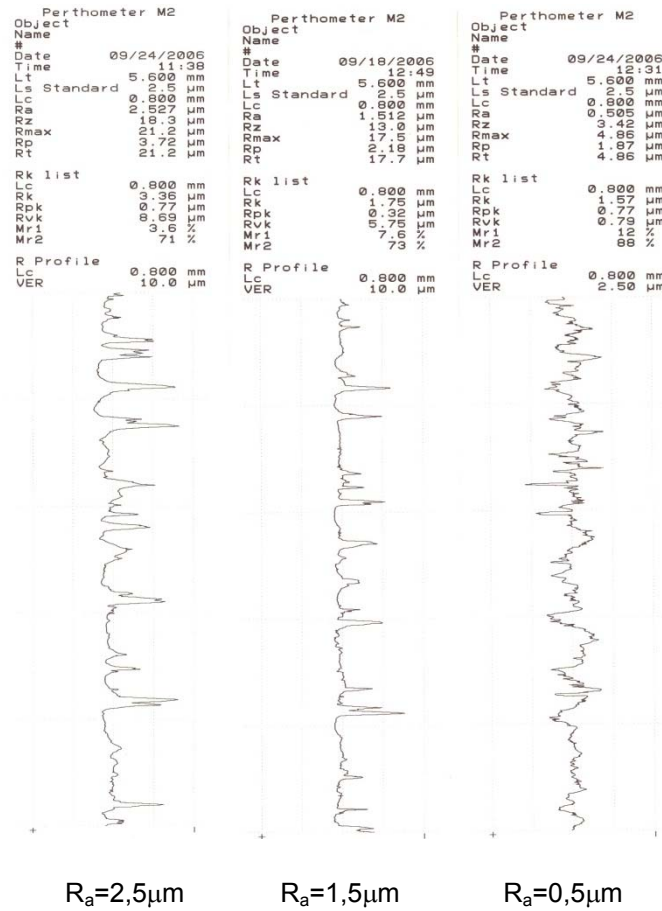
Tablo 3.1 Loctite 3421'in fiziksel ve mekanik özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Kimyasal Bileşim	Epoksi - Hızlandırıcı
Viskozite (25°C'de, mPa.s)	40.000
Maksimum Yapıştırma Kalınlığı	1,0 mm
Çalışma Sıcaklığı	+125°C'ye kadar
Kayma Gerilmesi (ISO 4587)	20-25 N/mm ²
Soyulma Direnci (ISO 8510-2)	2,5 N/mm
Çekme Gerilmesi (ISO 6922)	13-19 N/mm ²
Kürleşme Süresi (22°C'de)	240 Dakika

3.1.5 Yapıştırma İşlemi

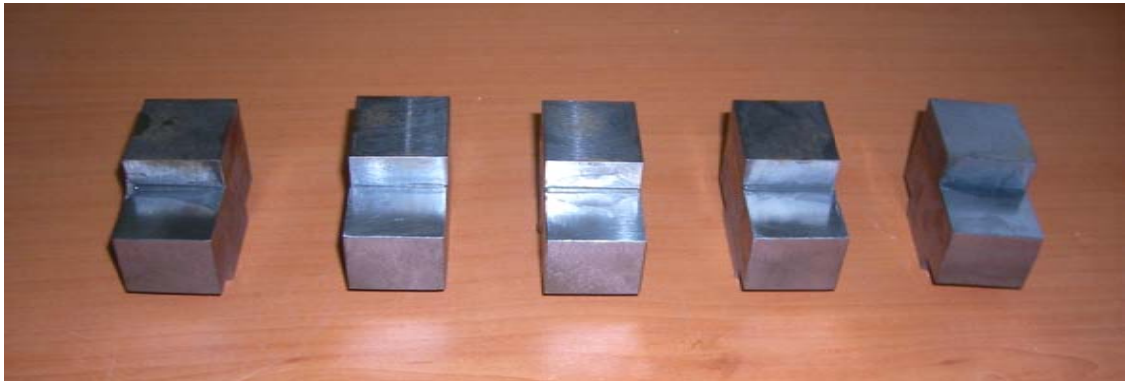
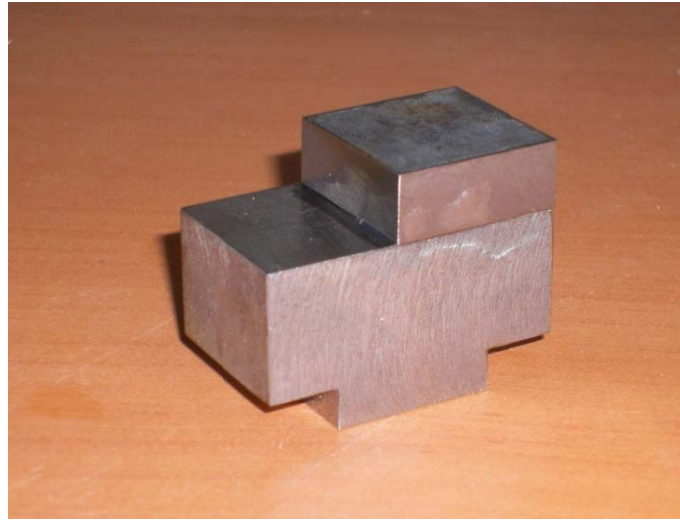
İncelenecek her bir parametre için 5'er adet numune hazırlanarak deneyler yapılmıştır. ASTM D 950-3 standardında imal edilen numuneler istenilen yüzey pürüzlülüğüne getirilmiştir. Farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip yüzeyler elde edebilmek için malzeme cinsine göre kimyasal ve mekanik yöntemlerle yüzey aşındırma işlemleri yapılmıştır. Mekanik yöntem olarak bakır ve alüminyum numuneler için farklı numaralarda zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Kimyasal yöntem olarak ta çelik numuneler için hidroklorik asit kullanılarak, numunelerin asit içinde bekleme sürelerine göre istenilen yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Şekil 3.5'de ölçülen yüzey pürüzlülüklerine ait değerler ve grafikler verilmiştir.

Yüzey pürüzlülükleri ayarlandıktan sonra yüzey temizleme işlemine geçilmiştir. Deney numunelerinin yüzeyini temizlemek ve yağlardan arındırmak için Loctite 7063 marka solvent tabanlı endüstriyel bir temizleyici kullanılmıştır. 2 mPa.s gibi çok düşük viskoziteye sahip temizleyici yüzeye uygulandığında, oda sıcaklığında 60 saniyeden kısa bir sürede buharlaşmaktadır. Temizleyicinin yüzeye uygulanması, yapıştırıcının kürleşme hızına ve gerilme değerlerine herhangi bir etki etmemektedir.



Şekil 3.5 Ölçülen yüzey pürüzlülüklerine ait değerler ve grafikler

Numunelerin yapıştırılmasında Loctite Hysol 3421 epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. İki bileşenli olan bu yapıştırıcı, homojen bir karışım elde edilinceye kadar iyice karıştırılmıştır. Elde edilen karışım spatula yardımıyla birleştirilecek yüzeylere tatbik edilmiştir ve yüzeylerin tamamen ıslanmış olmasına dikkat edilmiştir. Yapıştırıcının uygulandığı numunelerden küçük parça büyük parça üzerine bastırılarak birleştirme gerçekleştirilmiştir ve taşan fazlalıklar temizlenmiştir. Birleştirilmiş numuneler oda sıcaklığında (20–25°C) 24 saat bekletilerek yapıştırıcının kürleşmesi beklenmiştir. 24 saatin sonunda numuneler deneye tabi tutulmuştur. Şekil 3.6'da deneye hazır birleştirilmiş numunelerin fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.6 Yapıştırılmış deney numuneleri

3.2 EKSENEL YORULMA TESTLERİ

3.2.1 Deney Düzeneği

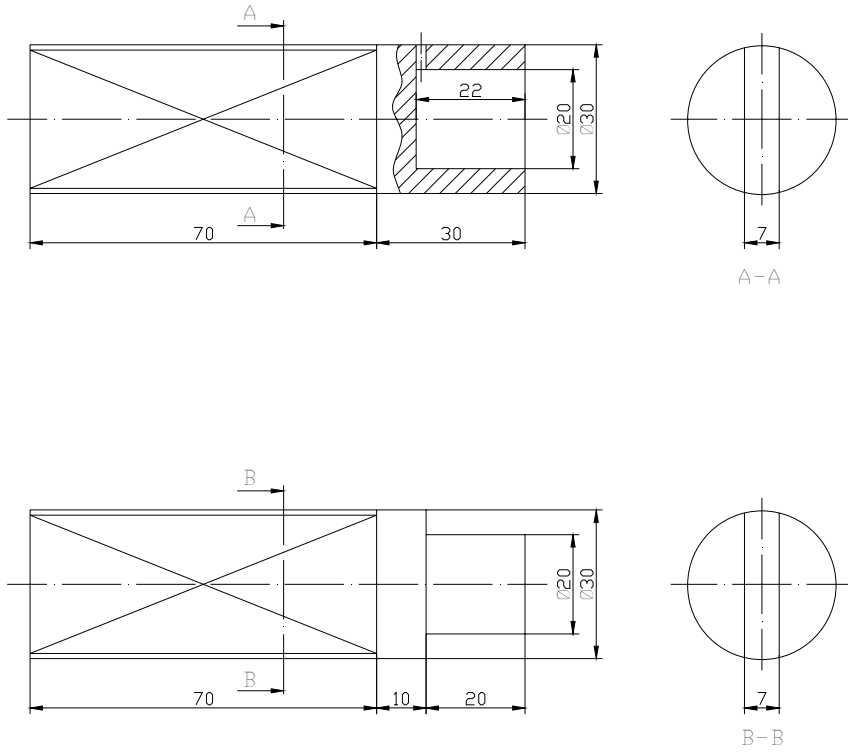
Eksenel yorulma testleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Instron 8801 marka eksenel yorulma cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7). Bu test cihazı, eksenel doğrultuda çeki-bası yüklemeleri yapabilmekte, kuvvet genliği ve frekans değerleri otomatik olarak değiştirilebilmektedir.



Şekil 3.7 Eksenel yorulma test cihazı

3.2.2 Deney Numuneleri

Deneylerde, sanayide en çok kullanılan malzeme türü olan çelik alınarak dokuz adet numune test edilmiştir. Proje kapsamı haricinde bir cihaz kullanımı, test cihazının yoğunluğu ve zaman darlığı nedeniyle sınırlı sayıda numune test edilebilmiştir. Deneylerde kullanılan numune boyutları Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8 Deney numunesi boyutları

3.2.3 DeneYlerde Kullanılan Yapıştırıcının Teknik Özellikleri

DeneYlerde yapıştırıcı olarak ise Loctite 638 kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcının fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2 Loctite 638’in fiziksel özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
Kimyasal Bileşim	Üretan Metakrilat
Renk	Yeşil
Viskozite (25°C’de, mPa.s)	2500
Özgül Ağırlık (g/ml)	1,09
Max. Boşluk Doldurma (mm)	0,25
Yanma Noktası	> 93 °C
Tutma Mukavemetine Erişim (20 °C’de)	Çelik, 20 min
İşlevsel Tutma Mukavemetine Erişim	Çelik, 1 h
Nihai Tutma Mukavemetine Erişim	Çelik, 5 – 6 h
Isıl Genleşme Katsayısı (K ⁻¹)	80.10 ⁻⁶
Isıl İletkenlik (W/mK)	0,1
Kesme Mukavemeti (ISO 10123)	22 – 40 N/mm ²
Çalışma Sıcaklığı	+125 °C’ye kadar

3.2.4 Yapıştırma İşlemi

Her bir frekans değeri için 3 adet numune hazırlanarak 3 farklı frekansda deneyler yapılmıştır. Yüzey pürüzlülükleri ayarlandıktan sonra yüzey temizleme işlemine geçilmiştir. Deney numunelerinin yüzeyini temizlemek ve yağlardan arındırmak için, darbe numunelerinin temizlenmesinde de kullanılan Loctite 7063 marka solvent tabanlı endüstriyel temizleyici kullanılmıştır. Numunelerin yapıştırılmasında Loctite 638 anaerobik bazlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcı erkek numune üzerinde tüm çevreye uygulanarak, dişi numunenin içine döndürülerek geçirilmiş ve V yatağı üzerine bırakılmıştır. Birleştirilmiş numuneler oda sıcaklığında (20–25°C) 24 saat bekletilerek yapıştırıcının kürleşmesi beklenmiştir. 24 saatin sonunda numuneler yorulma deneylerine tabi tutulmuştur.

3.3 YAPAY SİNİR AĞLARI İLE DARBE DAYANIMI TAHMİNİ

Yapay sinir ağı modeli oluşturulurken ilk aşama, girdileri ve çıktıları içeren uygun bir veritabanı hazırlanmasıdır. Yapay sinir ağında kullanılacak verilerde bir sayı sınırlaması yoktur. Tam aksine veri sayısının çokluğu, modelin doğruluğu açısından faydalıdır. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken nokta, veri olarak sadece çıktıları etkileyen verilerin girilmesidir. Bu kural karmaşık problemler için de geçerlidir. Bu prosedür literatürde pek çok kez tanımlanmıştır.

Bu çalışmada, Mackay (MACKAY, 1992) tarafından geliştirilen algoritmayı kullanan ticari bir paket program olan MODEL MANAGER® (NEUROMAT, 2003) kullanılmıştır. Oluşturulan YSA modelinin veri tabanında bulunan girdi değerlerinin en küçük ve en büyük değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir.

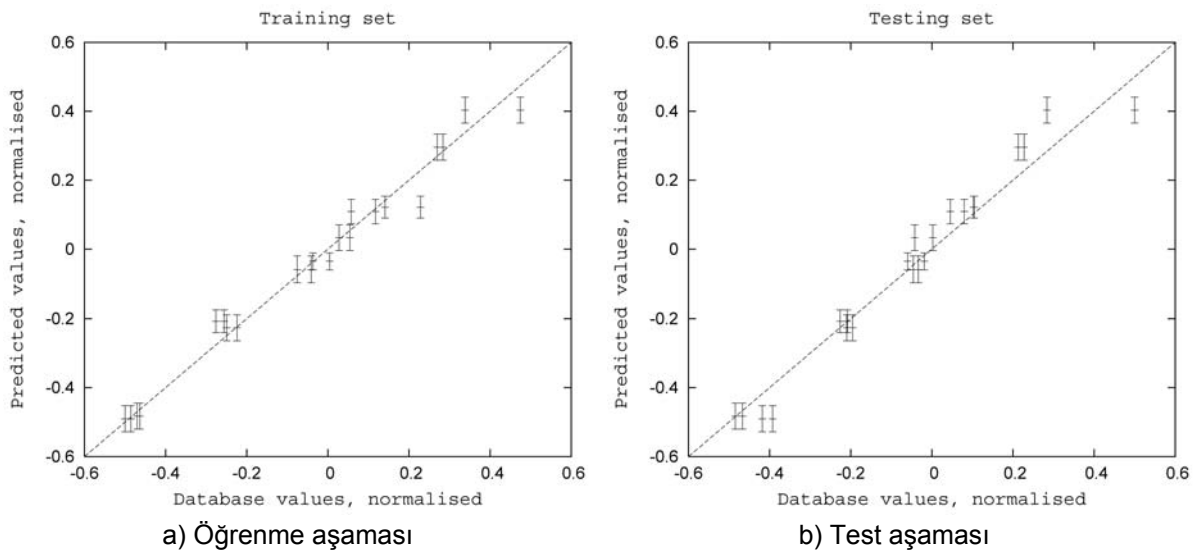
Tablo 3.3 Yapay sinir ağı modelinde kullanılan veriler

Veri	Minimum	Maksimum
Yapıştırma boşluğu, s (mm)	0	0,5
Yüzey pürüzlülüğü, R _a (µm)	0,5	2,5
Malzeme	1 (Çelik)	4 (Paslanmaz çelik)

Yapay sinir ağlarında elemanların bağlantılarının ağırlık değerlerinin belirlenmesi işlemine “ağın eğitilmesi” denir. Başlangıçta bu ağırlık değerleri rastgele olarak atanır. Yapay sinir ağları kendilerine örnekler gösterildikçe bu ağırlık değerlerini değiştirirler. Amaç ağa gösterilen örnekler için doğru çıktıları üretecek ağırlık değerlerini bulmaktır. Örnekler ağa defalarca gösterilerek en doğru ağırlık değerleri bulunmaya çalışılır. Ağın doğru ağırlık değerlerine ulaşması örneklerin temsil ettiği olay hakkında genellemeler yapabilme yeteneğine kavuşması demektir. Bu

genelleştirme özelliğine kavuşması işlemine ağın öğrenmesi denir. Ağırlıkların değerlerinin değişmesi belirli kurallara göre yürütülmektedir. Bu kurallara öğrenme kuralları denir.

Yapay sinir ağlarında öğrenme olayının iki aşaması vardır. Birinci aşamada ağa gösterilen örnek için ağın üreteceği çıktı belirlenir. Bu çıktı değerinin doğruluk derecesine göre ikinci aşamada ağın bağlantılarının sahip olduğu ağırlıklar değiştirilir. Ağın çıktısının belirlenmesi ve ağırlıkların değiştirilmesi öğrenme kuralına bağlı olarak farklı şekillerde olmaktadır. Şekil 3.9. a'da darbe dayanımı tahminleri için geliştirilen YSA modelinin öğrenme aşaması sonrasındaki performansı görülmektedir.



Şekil 3.9 Geliştirilen YSA modelinin öğrenme ve test aşamalarındaki performansı

Ağın eğitimi tamamlandıktan sonra performansını ölçmek için yapılan denemelere ise ağın test edilmesi denmektedir. Test etmek için ağın öğrenme sırasında görmediği örnekler kullanılır. Test etme sırasında ağın ağırlık değerleri değiştirilmez. Test örnekleri ağa gösterilir. Ağ eğitim sırasında belirlenen bağlantı ağırlıklarını kullanarak görmediği bu örnekleri için çıktılar üretir. Elde edilen çıktıların doğruluk değerleri ağın öğrenmesi hakkında bilgiler verir. Şekil 3.9. b'de darbe dayanımı tahminleri için geliştirilen YSA modelinin test sonuçları görülmektedir. Öğrenme ve test sonuçları 45°'lik çizgiye ne kadar yakınsa, elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel veriler o kadar uyumludur.

4. BULGULAR

4.1 GİRİŞ

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetini belirleyebilmek için günümüzde kullanılan çeşitli test metotları vardır. Ancak bu testlerden elde edilen değerler, yapıştırma bağlantısının mukavemeti hakkında gerçek değerleri vermemektedir. Yapıştırma bağlantısının konstrüksiyonu ve işletme şartları, yapıştırma bağlantısının mukavemeti üzerinde son derece etkili olmaktadır. Bundan dolayı, dizayn aşamasında belirtilen bu faktörler göz önünde bulundurulmalı, çalışma şartlarına uygun deneyler yapılmalı ve elde edilen mukavemet değerleri kullanılmalıdır. Literatürde (LOCTİTE, 1998) mukavemet hesapları yapılırken farklı düzeltme faktörlerinin kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu faktörlerin başlıcaları; malzeme, geçme, yapıştırma boşluğu, yüzey pürüzlülüğü, geometri, çalışma sıcaklığı, ısı yalıtım ve çalışma ortamı faktörleri olarak verilmektedir.

Bu proje kapsamında darbe ve yorulma testleri yapılmıştır. Darbe testlerinde yüzey pürüzlülüğü, yapıştırılan malzeme ve yapıştırma kalınlığının etkisi incelenmiştir. Yorulma testlerinde ise test frekansının bağlantının yorulma mukavemeti üzerine etkisi araştırılmıştır.

Yapay Sinir Ağları yöntemi yardımıyla, darbe testlerinden elde edilen veriler kullanılarak, test yapılmayan noktalardaki diğer veriler de tahmin edilmeye çalışılmıştır.

4.2 DARBE DENEYLERİ

4.2.1 Yüzey Pürüzlülüğünün Darbe Dayanımına Etkisi

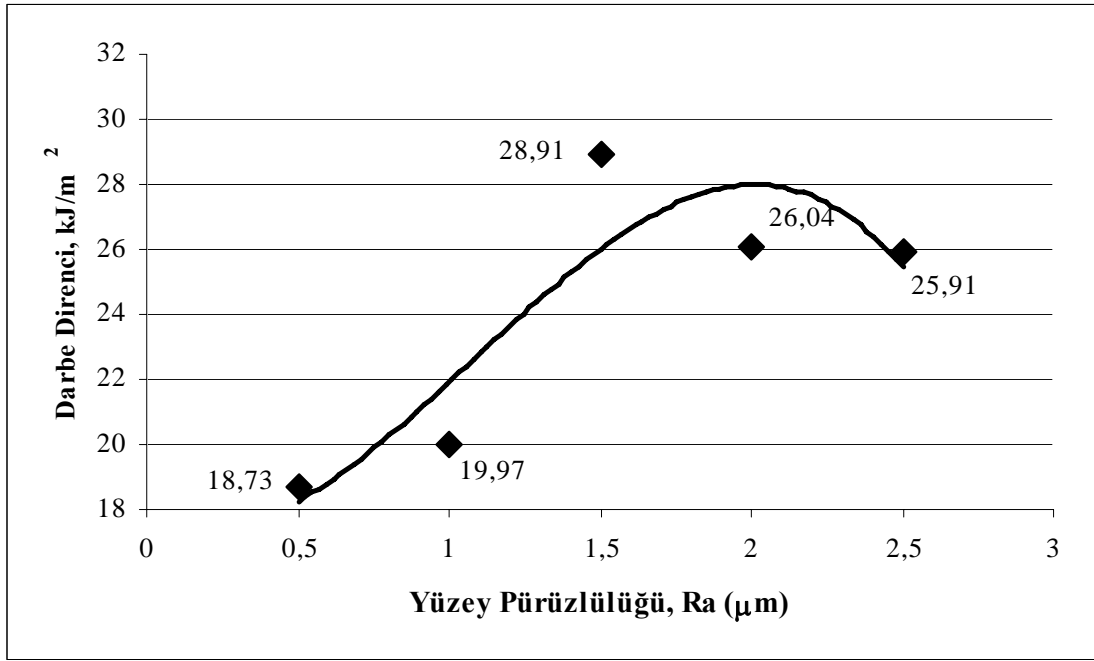
Yüzey pürüzlülüğünün yapıştırma bağlantısının darbe mukavemetine etkisi araştırılırken, yapıştırma kalınlığı sabit tutularak, çelik malzemeler için beş farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip numuneler hazırlanmıştır. Her bir yüzey pürüzlülük değeri için 5 adet numune kullanılarak toplam 25 adet test yapılmıştır. Bakır ve alüminyum numunelerde ise üç yüzey pürüzlülüğü için 15'er adet test yapılmıştır. Yüzey pürüzlülükleri bakır ve alüminyum numunelerde farklı numaralarda zımpara kâğıdı ile mekanik olarak, çelik numuneler ise hidroklorik asit içerisinde bekletilerek kimyasal olarak elde edilmiştir. Uygulanan deney şartları ve her bir yüzey pürüzlülük değeri için elde edilen ortalama darbe dirençleri ve standart sapma değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Yüzey pürüzlülüğü etkisinin tespitinde uygulanan deney şartları

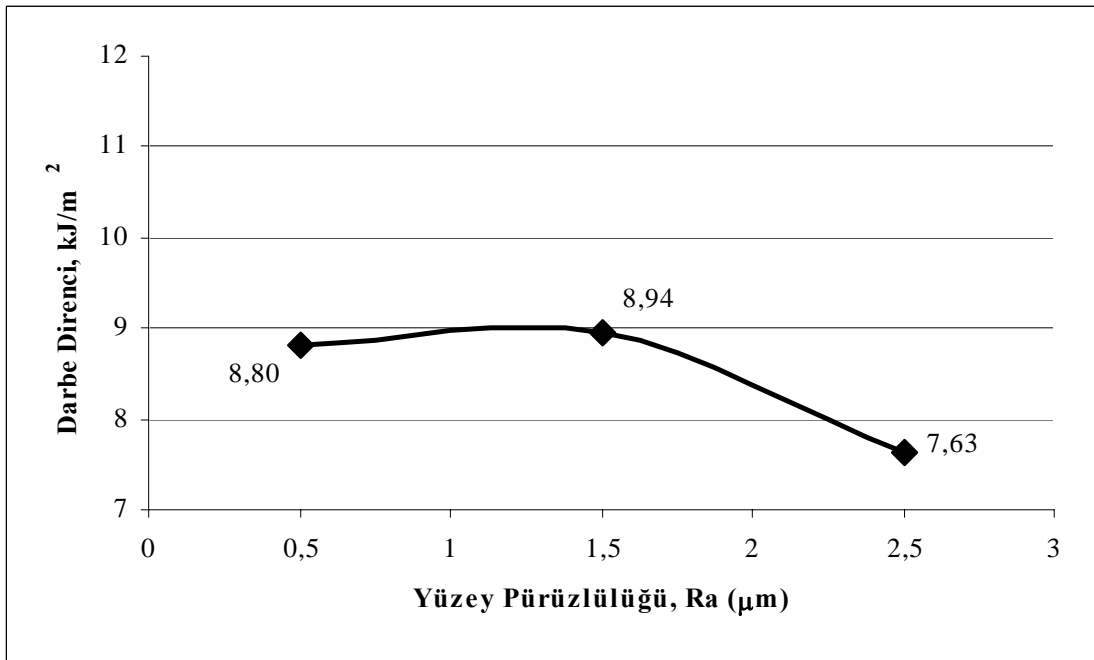
Yapıştırılan Malzeme	Çelik-Çelik					Alüminyum-Alüminyum			Bakır-Bakır		
En / Boy Oranı	25,4 / 25,4=1					25,4 / 25,4=1			25,4 / 25,4=1		
Yapıştırma Boşluğu (mm)	0,1					0,1			0,1		
Numune Sayısı	25					15			15		
Uygulanan Darbe Enerjisi (J)	25					25			25		
Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	0,5	1,5	2,5	0,5	1,5	2,5
Ort. Absorbe Edilen Enerji (J)	12,08	13,01	18,67	16,84	16,70	5,67	5,77	4,92	6,97	6,88	8,17
Ortalama Darbe Direnci, kJ/m^2	18,72	19,97	28,91	26,04	25,91	8,80	8,94	7,63	10,80	11,90	11,01
Beş Testin Standart Sapması	1,22	1,19	0,90	2,78	0,99	0,31	0,56	0,39	0,77	1,61	1,31

İncelenmek istenen yüzey pürüzlülük değerleri elde edildikten sonra uygun prosedürde yapıştırılan deney numuneleri, yapıştırma işleminden 24 saat sonra deneye tabi tutulmuştur. Tablo 4.1’de beş deney için elde edilen standart sapma değerlerindeki dalgalanma ve ani değişimler yapıştırma işlemini etkileyen faktörlerden (ortam, numune, yapıştırıcı kalınlığı vs.) kaynaklanmaktadır. Daha fazla deney yapılarak bu standart sapma değerleri azaltılabilir.

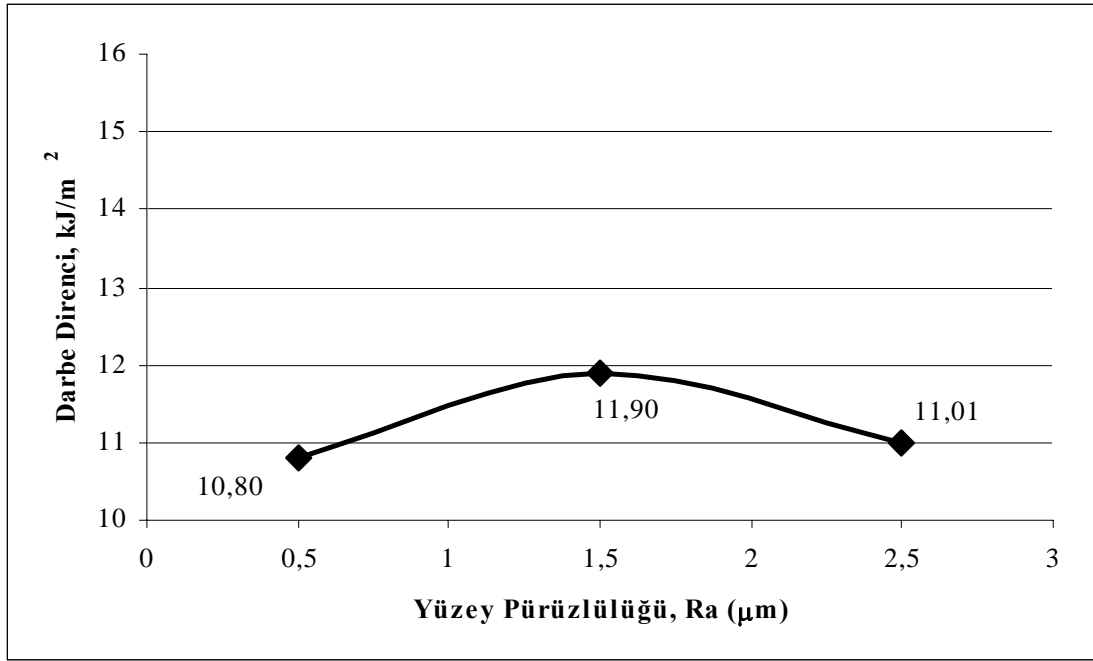
Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’de üç farklı malzemenin farklı yüzey pürüzlülük değerlerindeki darbe mukavemeti değerleri verilmiştir. En düşük mukavemet değerleri, en az yüzey pürüzlülüğünde ($R_a=0,5\mu\text{m}$) bulunmuştur. Darbe mukavemeti açısından optimum pürüzlülük aralığı $R_a=1,5 - 2\mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. $R_a=0,5\mu\text{m}$ için minimum değerler bulunmasının nedeni yüzeyin pürüzsüz düz olmasından dolayı kama etkisinin kaybolarak yapıştırıcının tutunacağı yerlerin azalmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü gereğinden fazla arttığı zamanda mukavemet değerleri tekrar düşmektedir. Bunun nedeni olarak, aradaki yapıştırıcı kalınlığının kısmen artmış olması ve fazla pürüzlülükten dolayı yapıştırıcının, malzeme yüzeyine tam olarak yayınamadığı (düşük ıslanabilirlik) söylenebilir.



Şekil 4.1 Çelik numunelerde yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci değerlerine etkisi



Şekil 4.2 Alüminyum numunelerde yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci değerlerine etkisi



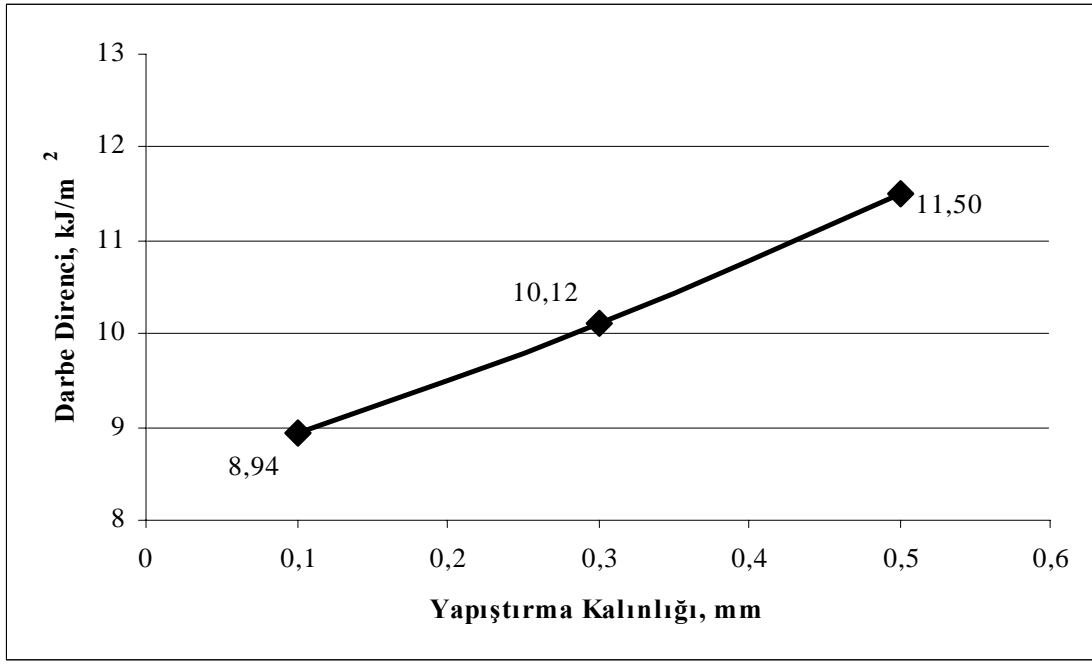
Şekil 4.3 Bakır numunelerde yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci değerlerine etkisi

4.2.2 Yapıştırma Kalınlığının Darbe Dayanımına Etkisi

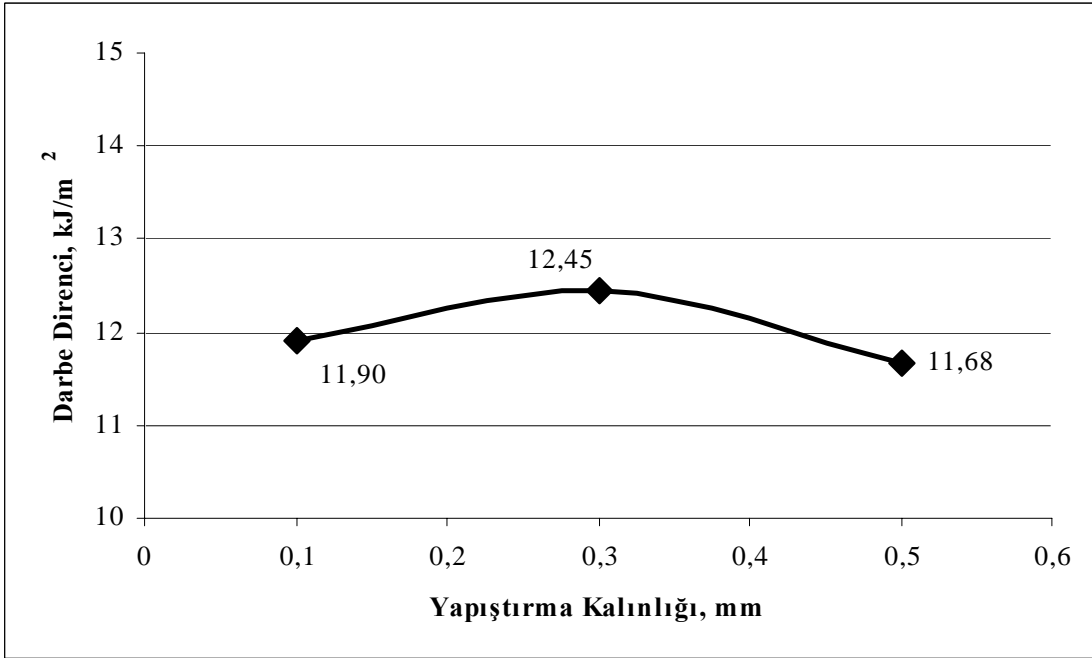
Yapıştırma kalınlığının, yapıştırma bağlantısının mukavemetine etkisi incelenirken, yapıştırılacak numuneler arasında 3 farklı yapıştırma kalınlığı (0,1; 0,3; 0,5mm) seçilerek deneyler yapılmıştır. Her bir kalınlık değeri için beş numune test edilmiştir. Yapıştırma kalınlığının etkisi, tüm numunelerde $R_a=1,5\mu\text{m}$ pürüzlülük değeri için incelenmiştir. Uygulanan deney şartları Tablo 4.2’de verilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.4 ve 4.5’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Yapıştırma kalınlığı etkisinin tespitinde uygulanan deney şartları

Yapıştırılan Malzeme	Alüminyum-Alüminyum			Bakır-Bakır		
En / Boy Oranı	25,4 / 25,4 = 1			25,4 / 25,4=1		
Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)	1,5			1,5		
Numune Sayısı	15			15		
Uygulanan Darbe Enerjisi (J)	25			25		
Yapıştırma Kalınlığı, s (mm)	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
Ort. Absorbe Edilen Enerji (J)	5,77	6,53	7,41	6,88	8,04	7,54
Ortalama Darbe Direnci, kJ/m ²	8,94	10,12	11,50	11,90	12,45	11,68
Beş Testin Standart Sapması	0,56	0,52	1,76	1,61	0,55	1,83



Şekil 4.4 Alüminyum malzeme için yapıştırma kalınlığının darbe direncine etkisi



Şekil 4.5 Bakır malzeme için yapıştırma kalınlığının darbe direncine etkisi

Şekil 4.4 ve 4.5'dende görüleceği gibi yapıştırıcı film tabakası kalınlığı arttıkça bağlantıların, uygulanan darbeye karşı göstermiş olduğu direnç, kullanılan malzemeye göre farklılık göstermektedir. Bakır numunelerde yapıştırma kalınlığı 0,3mm iken darbeye karşı göstermiş olduğu direnç, 0,1 ve 0,5mm yapıştırma kalınlıklarına göre daha yüksek değerler çıkmıştır. Alüminyum numunelerde ise yapıştırma kalınlığı arttıkça darbeye karşı gösterilen direnç azda olsa artmıştır. Deneysel şartlara bağlı olarak 1-2kJ/m² civarında olan bu artış önemsenmeyebilir. Genel olarak, 0,3mm yapıştırıcı kalınlıklarında optimum darbe direnci elde edildiği söylenebilir.

4.2.3 Yapıştırılan Malzemenin Darbe Dayanımına Etkisi

Yapıştırılacak malzeme seçimi yapılırken, özellikle genel makine sanayisinde en çok kullanılan çelik, bakır ve alüminyum gibi malzemelerin kullanılmasına dikkat edilmiştir. Uygulanan deney şartları Tablo 4.1'de verilmişti. Belirtilen üç malzemeye ilave olarak aynı deney şartları paslanmaz çelik ve plastik (delrin) numunelere de uygulanmıştır. Uygulanan deney şartları Tablo 4.3'de verilmiştir.

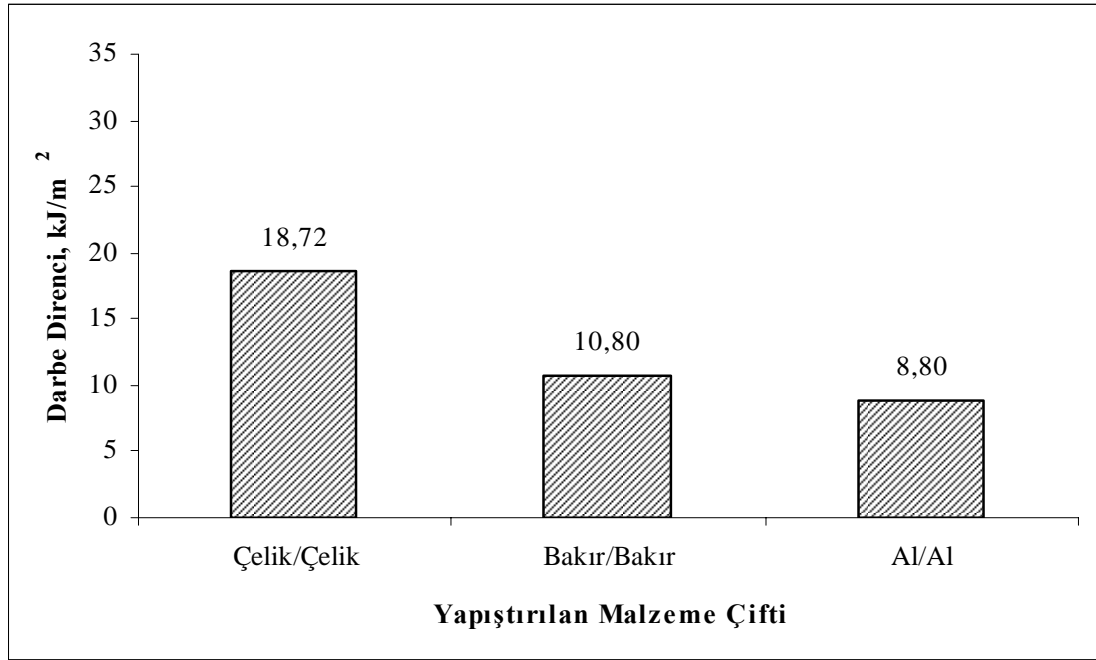
Tablo 4.3 Paslanmaz çelik ve delrin malzeme için uygulanan deney şartları

Yapıştırılan Malzeme	Paslanmaz Çelik – Paslanmaz Çelik	Delrin - Delrin
En / Boy Oranı	25,4 / 25,4 = 1	25,4 / 25,4=1
Yüzey Pürüzlülüğü, R _a (µm)	1,5	1,5
Numune Sayısı	5	5
Uygulanan Darbe Enerjisi (J)	25	25
Yapıştırma Kalınlığı, s (mm)	0,1	0,1
Ortalama Darbe Direnci, kJ/m ²	30,20	2,14
Beş Testin Standart Sapması	1,73	0,88

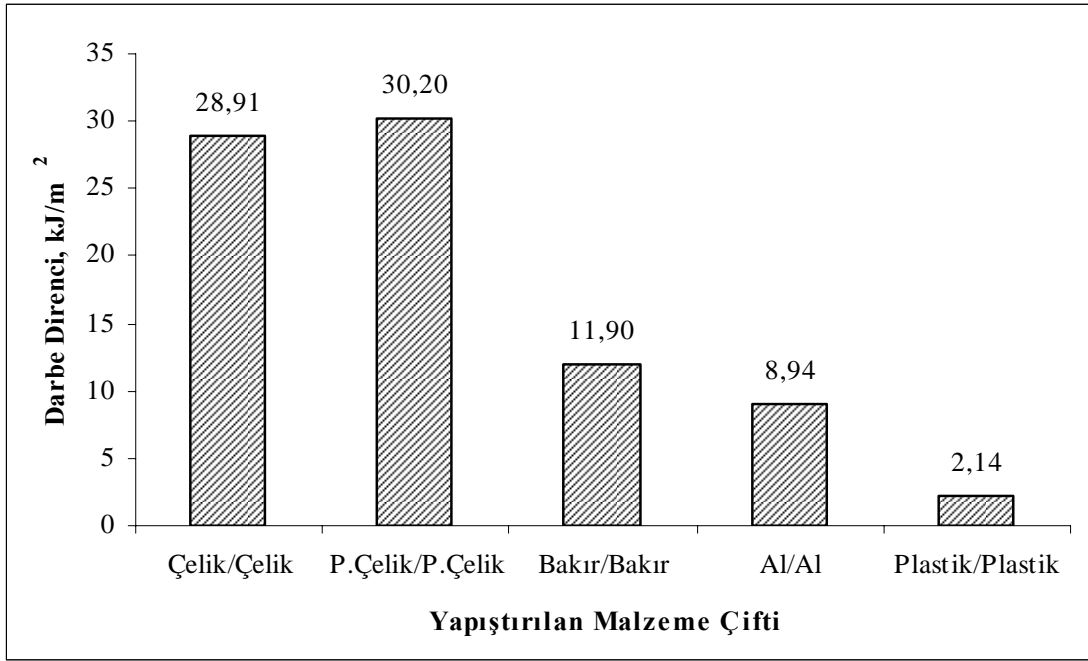
Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'den görüleceği üzere, aynı şartlar altında sadece malzeme değiştirildiğinde darbe direnci değerlerinde önemli azalmalar görülmektedir. Çelik ile alüminyum malzemelerin darbe direnci değerleri arasında yaklaşık üç kat fark vardır. Bu farklılıkların, malzemelerin yapıştırıcı ile kimyasal reaksiyona girme seviyeleri, serbest yüzey enerjileri ve aktiflik - pasiflik durumlarından kaynaklandığı söylenebilir. Çelik/çelik ve paslanmaz çelik/paslanmaz çelik bağlantılarında genellikle kohezyon kopması gözlemlenmiştir. Alüminyum, pasif bir metal olduğu için yapıştırıcı ile kimyasal olarak daha zayıf bağlar oluşturmaktadır. Bu nedenle alüminyum/alüminyum bağlantısında adhezyon hasarı gözlemlenmiştir. Bakır

alüminyuma göre daha aktif metal olduğu için bakır/bakır bağlantılarında çoğunlukla kohezyon kopması tesbit edilmiştir.

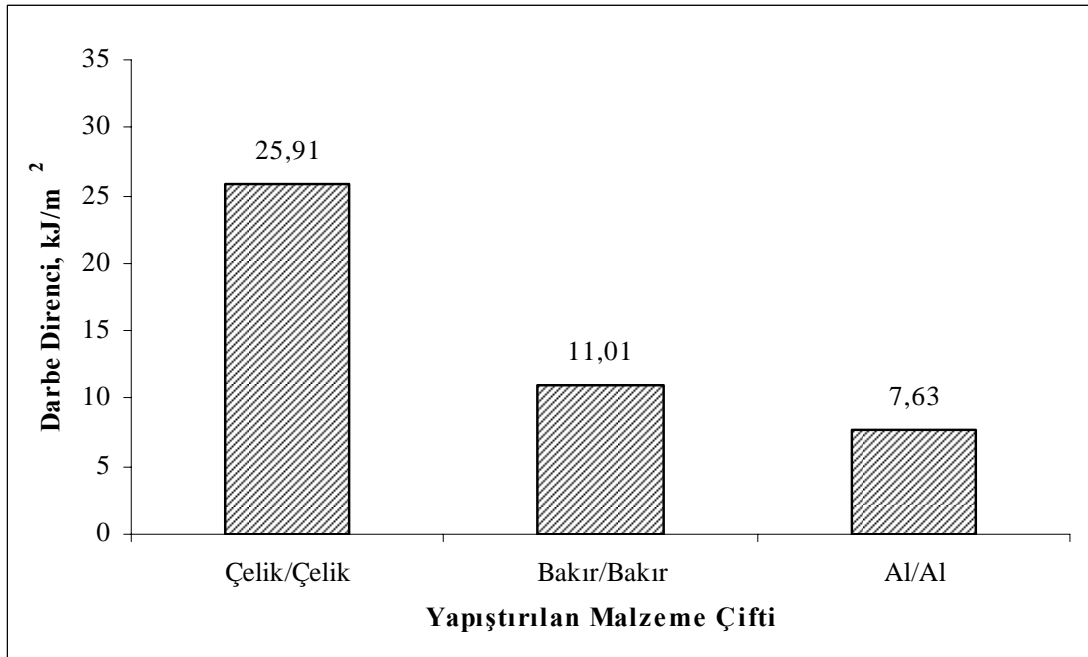
Plastik numunelerin test sonuçlarından elde edilen değerler incelendiğinde, yapıştırıcının plastik malzeme ile yeterli adhezyon bağı oluşturamadığı görülmektedir. Deneylerde kullanılan yapıştırıcının plastik malzemeler için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Yapıştırıcının değiştirilmesi ya da plastik yüzey üzerine ilave işlemler yapılması gerekmektedir. Birkaç numune farklı yapıştırıcı ile yapıştırılıp test edildiğinde biraz daha yüksek değerler elde edilmiştir. Plastik numunelerin yüzeyi daha fazla pürüzlendirilmeye çalışılmış ancak başarılı olunamamıştır. Metallerin test şartlarından farklı olarak ve uygun yapıştırıcı seçilmesi kaydıyla, yapıştırılmış plastiklerin darbe davranışları ile ilgili olarak daha geniş bir çalışma ileride yapılabilir.



Şekil 4.6 $R_a=0,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve darbe dirençleri arasındaki ilişki



Şekil 4.7 $R_a=1,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve darbe dirençleri arasındaki ilişki



Şekil 4.8 $R_a=2,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve darbe dirençleri arasındaki ilişki

4.3 EKSENEL YORULMA TESTLERİ

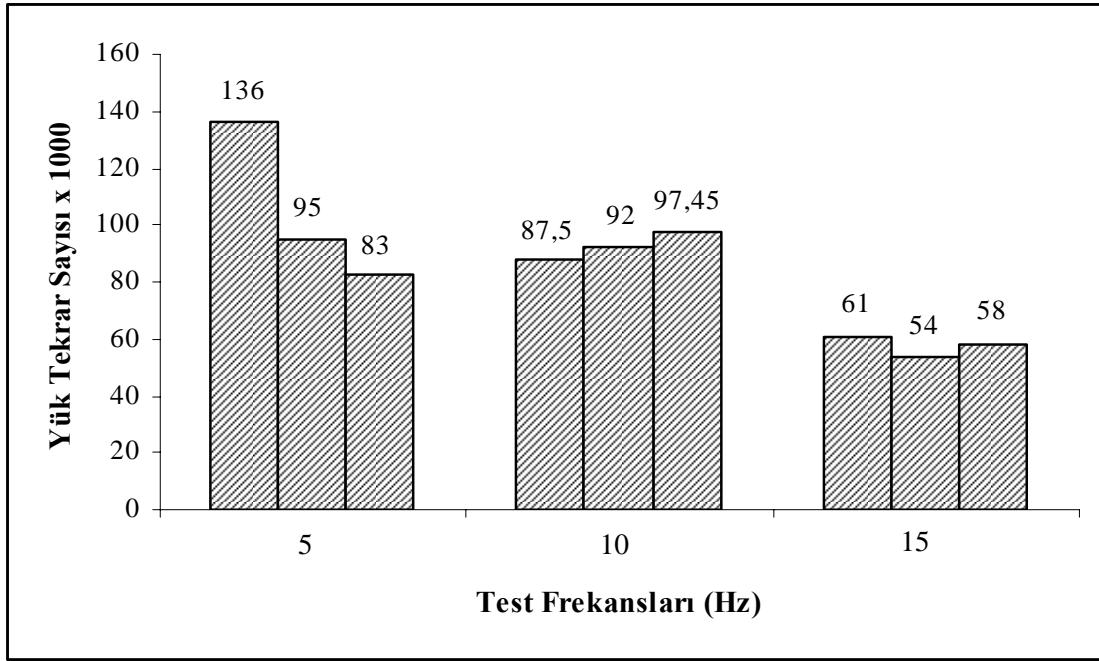
Eksenel yorulma deneylerinde çelik numuneler kullanılmıştır. Literatürde eksikliği hissedilen frekansın etkisini belirleyebilmek için üç farklı frekans belirlenerek testler gerçekleştirilmiştir. 5Hz, 10Hz ve 15Hz’de üçer numune olmak üzere toplam 9 adet deney numunesi kullanılmıştır. Numunelerin kopma anındaki yük tekrar sayıları (N) tesbit edilmiştir. Uygulanan deney şartları Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4 Eksenel yorulma testi deney şartları

Yapıştırılan Malzeme	Çelik-Çelik								
Çap / Uzunluk Oranı	20 / 20 = 1								
Yapıştırma Boşluğu (mm)	0,1								
Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)	3,0								
Numune Sayısı	9								
Statik Kesme Kuvveti (N)	42000								
Ortalama Kuvvet, F_{ort} (N)	10000								
Kuvvet Genliği, F_g (N)	± 5000								
Test Frekansı (Hz)	5			10			15		
Yük Tekrar Sayısı, N	136000	95000	83000	87500	92000	97450	61000	54000	58000

Yapılan deneylerde veriler büyük dağılım göstermiştir. Çok farklı çıkan sonuçlar değerlendirmeye alınmamıştır. Dağılımın büyük olması, yapıştırma alanının küçüklüğüne ve test cihazının ısınma problemlerine bağlanmıştır. Deney sonuçları 4.9’da verilmiştir.

Şekil 4.9’unda görüleceği üzere frekansın artmasıyla yük tekrar sayısında önemli azalmalar meydana gelmektedir. Yapıştırıcıların en önemli dezavantajlarından birisi sıcaklıktır. Frekansın artması ile birim zamandaki yük tekrar sayısı arttığı için yapıştırılan bölge daha çok ısınmaktadır. Bundan dolayı frekansın arttırılması ile birlikte yük tekrar sayılarında azalmalar meydana geldiği söylenebilir.

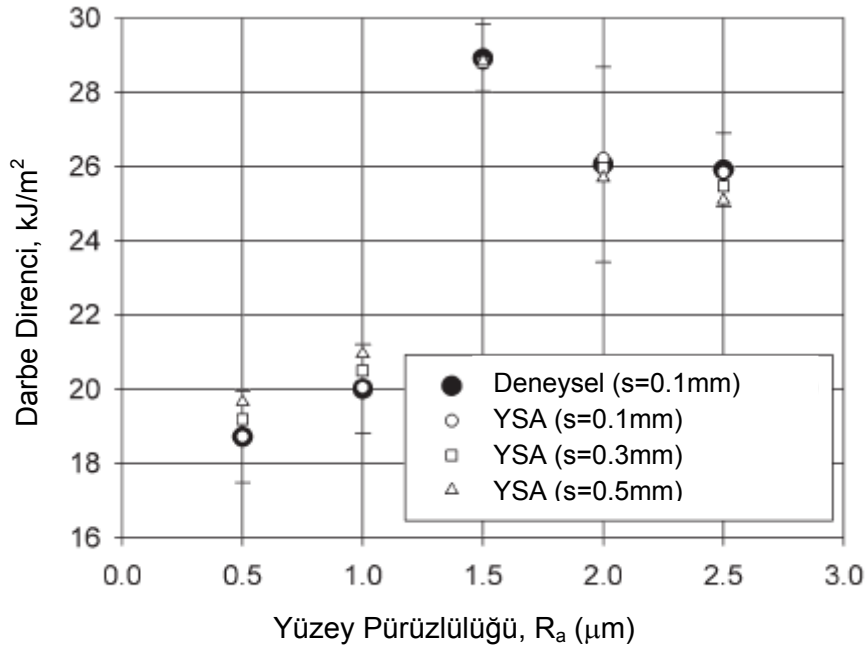


Şekil 4.9 Frekans değişimi ile yük tekrar sayısı arasındaki ilişki

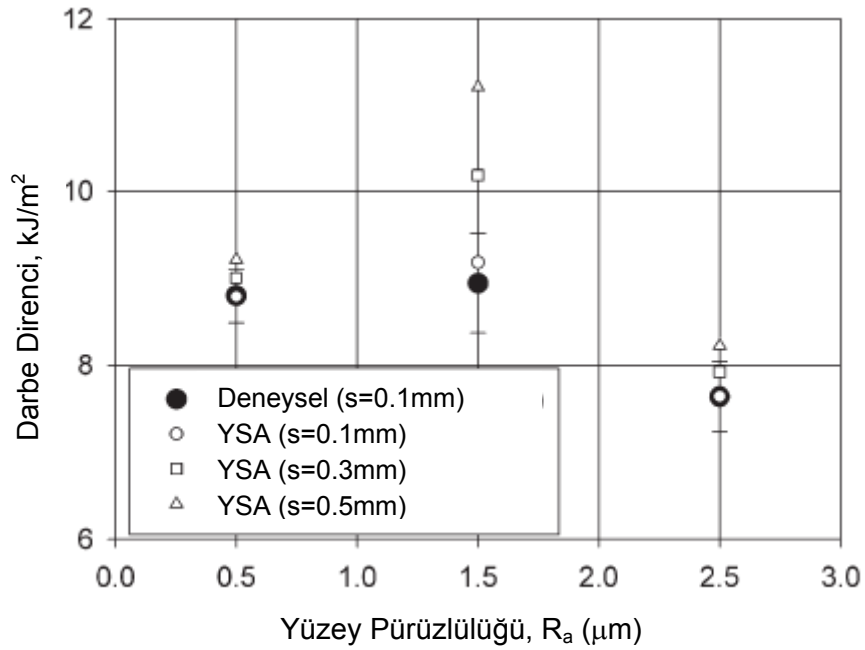
4.4 YAPAY SİNİR AĞLARI YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN VERİLER

Modelin eğitilmesi ve test edilmesi gerçekleştirildikten sonra, oluşturulan model ile yapıştırma bağlantılarının darbe koşulları altında dayanımı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.10 - 4.17'den de görüldüğü gibi, YSA ile elde edilen modelin tahmin ettiği darbe dayanımı değerleri ile deneysel olarak elde edilen darbe dayanımları birbirlerine çok yakın çıkmıştır.

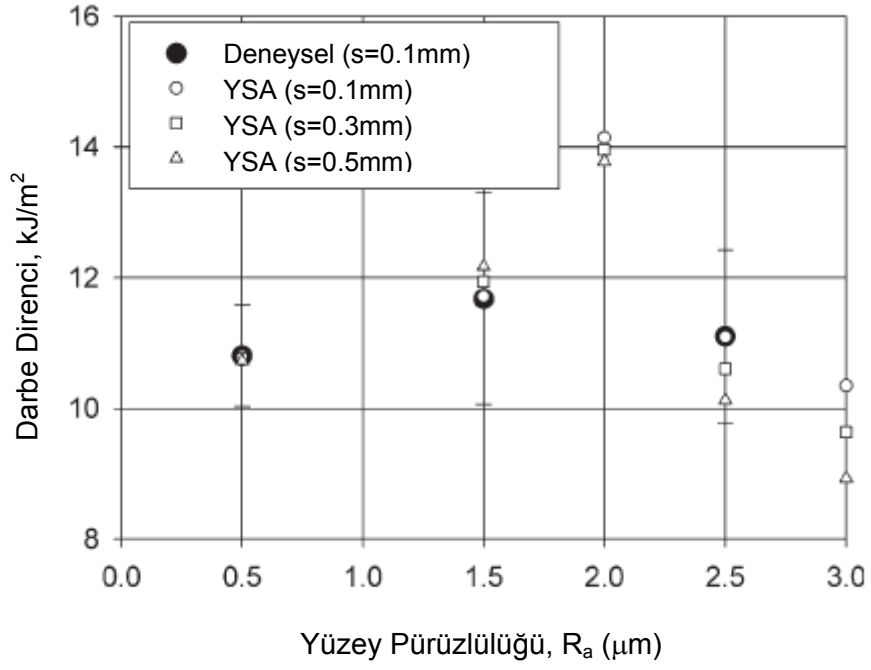
Şekillerde verilen sonuçlardan yola çıkarak, oluşturulan modelin darbe dayanım değerlerini tahmin için uygun bir model olduğu söylenebilir. Çok sayıda deney yapmanın zorlukları ve belirli bir maliyeti vardır. Tasarım maliyetini ve zaman kaybını azaltmak için, deney yapılmayan test şartlarında, YSA'dan elde edilen veriler kullanılarak, bağlantının darbe dirençleri hakkında bilgi sahibi olunabilir. YSA'dan elde edilen değerler tahmini değerler olduğu için, yapıştırma bağlantısının kullanılacağı yerin önemine göre gerçek işletme şartlarında deneylerin yapılması gerekebilir.



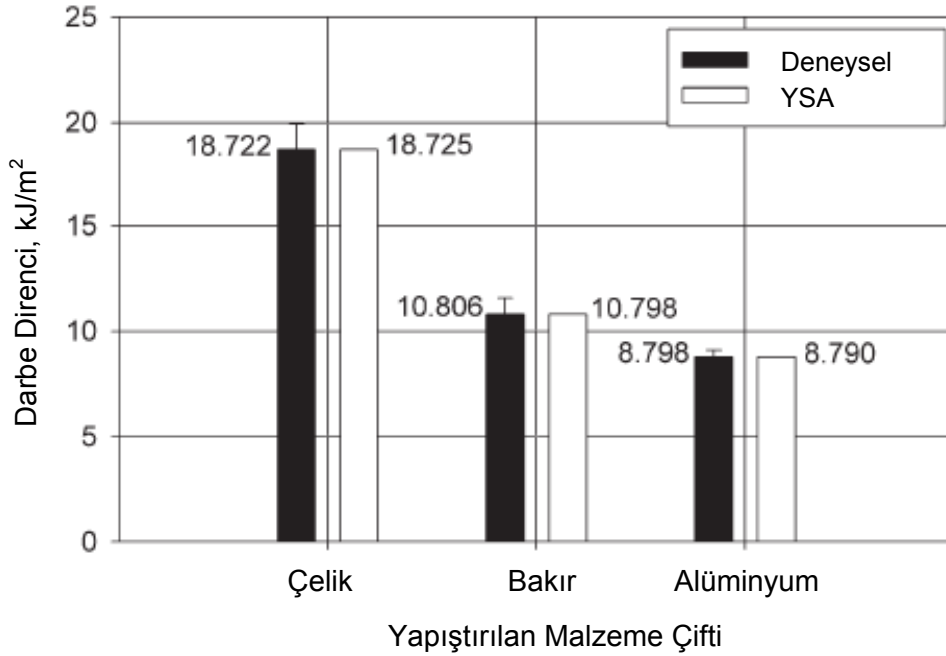
Şekil 4.10 Çelik numuneler için yüzey pürüzlülüğü - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



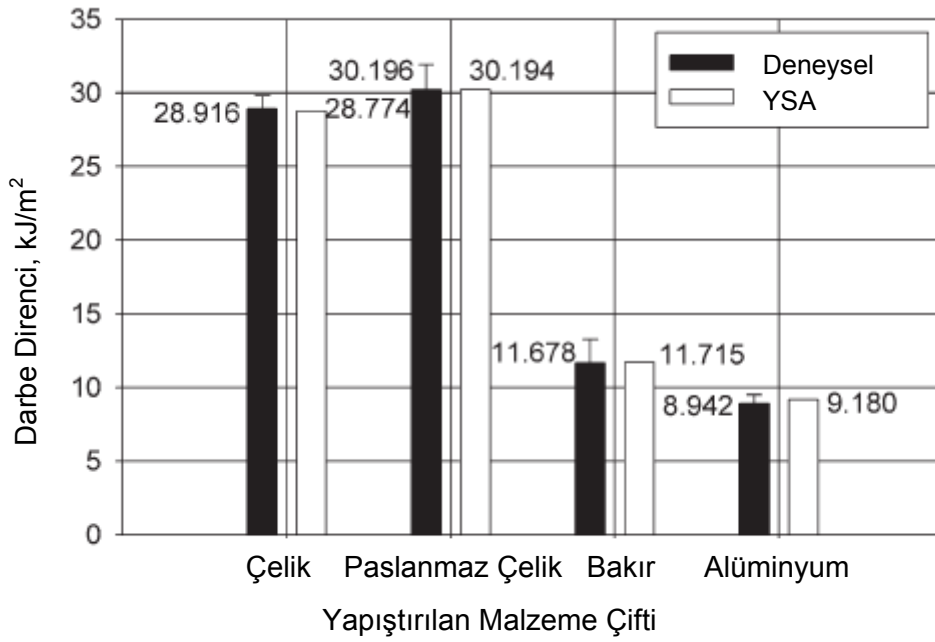
Şekil 4.11 Alüminyum numuneler için yüzey pürüzlülüğü - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



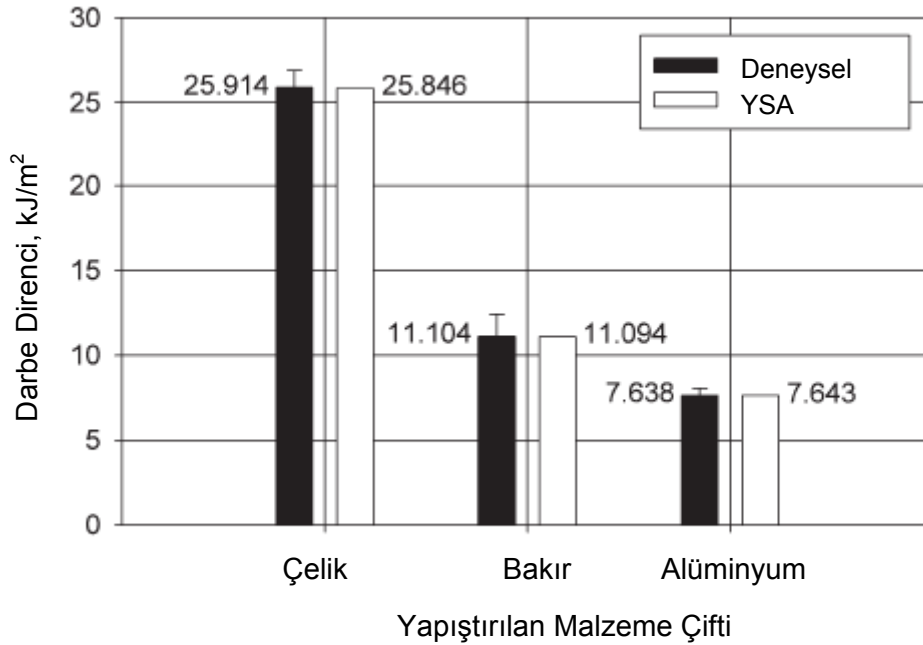
Şekil 4.12 Bakır numuneler için yüzey pürüzlülüğü - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



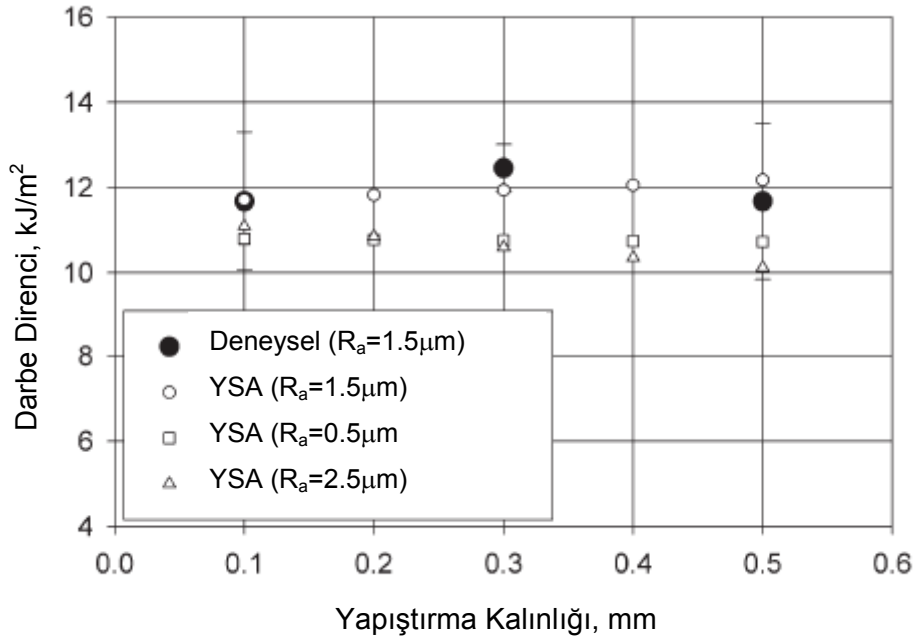
Şekil 4.13 Yüzey pürüzlülüğü $R_a=0,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



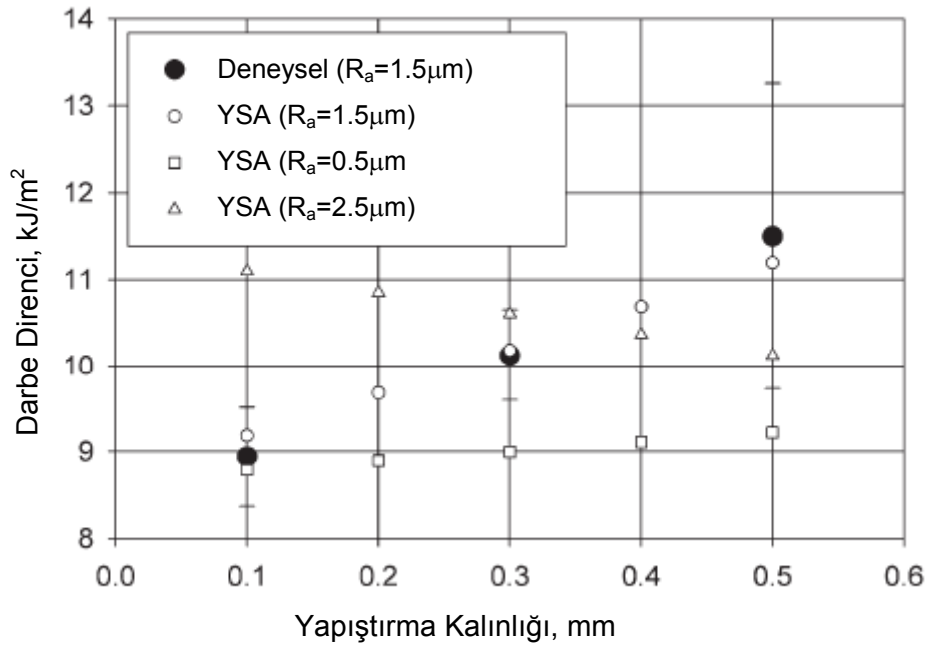
Şekil 4.14 Yüzey pürüzlülüğü $R_a=1,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



Şekil 4.15 Yüzey pürüzlülüğü $R_a=2,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



Şekil 4.16 Bakır malzeme için yapıştırıcı kalınlığı - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler



Şekil 4.17 Alüminyum malzeme için yapıştırıcı kalınlığı - darbe dayanımı arasında deneysel ve YSA ile tahmin edilen değerler

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu proje çalışmasında, yapıştırma bağlantılarının darbe ve yorulma mukavemetini etkileyen faktörlerden bazıları incelenmeye çalışılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının mukavemetlerini etkileyen faktörlerin önemli olanları aşağıda verilmiştir.

- Yüzey pürüzlülüğünün etkisi,
- Yapıştırma kalınlığının (boşluğunun) etkisi,
- Yapıştırılan malzemenin etkisi,
- Yükleme şeklinin etkisi,
- Sıkı geçme + yapıştırmanın etkisi
- Kullanılan yapıştırıcının etkisi,
- Bağlantı geometrisinin etkisi,
- Çalışma sıcaklığının etkisi,
- Isıl yaşlanmanın etkisi,
- Çalışma ortamının (yağlı, asidik gibi) etkisi vs.

Yapılan darbe deneylerinde yukarıda belirtilen faktörlerden, yüzey pürüzlülüğü, yapıştırma kalınlığı ve yapıştırılan malzemenin etkisi incelenmiştir. Deneyler sonucunda hazırlanan tüm numuneler için yapıştırmanın gerçekleştiği bölgede, darbe sonucu oluşan kopma yüzeyleri incelendiğinde, genel olarak kohezyon hasar tipinin meydana geldiği görülmüştür.

İlgili standartta verilen geometriye sahip numuneler test edilerek, deneylerden elde edilen sonuçlar ana hatları ile aşağıda verilmiştir;

Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi: Yapılan deneysel çalışmalarda üç farklı yüzey pürüzlülük değerine sahip çelik, alüminyum ve bakır malzemeler kullanılmıştır. En düşük mukavemet değerleri, en az yüzey pürüzlülüğünde ($R_a=0,5\mu\text{m}$) bulunmuştur. Darbe mukavemeti açısından optimum yüzey pürüzlülük aralığı $R_a=1,5-2\mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir.

Küçük pürüzlülük değerlerinde, darbe direnci değerinin düşük değerler bulunmasının nedeni yüzeyin pürüzsüz düz olmasından dolayı kama etkisinin kaybolarak yapıştırıcının tutunacağı yerlerin azalmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü gereğinden fazla arttığı zamanda mukavemet değerleri tekrar düşmektedir. Bunun nedeni olarak, aradaki yapıştırıcı kalınlığının kısmen artmış olması ve fazla pürüzlülükten dolayı yapıştırıcının, malzeme yüzeyine tam olarak yayınamadığı (düşük ıslanabilirlik) söylenebilir.

Yapıştırma Kalınlığının Etkisi: Yapıştırma kalınlığının, yapıştırma bağlantısının mukavemetine etkisi incelenirken, tüm numunelerde $R_a=1,5\mu\text{m}$ yüzey pürüzlülük değeri için 3 farklı kalınlık değeri (0,1; 0,3; 0,5mm) seçilerek deneyler yapılmıştır.

Deney sonuçlarında yapıştırıcı film tabakası kalınlığı arttıkça bağlantıların, uygulanan darbeye karşı göstermiş olduğu direnç kullanılan malzemeye göre farklılık göstermektedir. Bakır numunelerde yapıştırma kalınlığı 0,3mm iken darbeye karşı göstermiş olduğu direnç, 0,1 ve 0,5mm yapıştırma kalınlıklarına göre daha yüksek değerler çıkmıştır. Alüminyum numunelerde ise yapıştırma kalınlığı arttıkça darbeye karşı gösterilen direnç artmıştır. Genel olarak, 0,3mm yapıştırıcı kalınlığında maksimum darbe direnci elde edildiği söylenebilir.

Yapıştırılan Malzemenin Etkisi: Yapılan deneysel çalışmalarda malzemenin etkisini tespit edebilmek için çelik, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır ve plastik (Delrin) malzemeler kullanılmıştır. Aynı şartlar altında sadece malzeme değiştirildiğinde darbe direnci değerlerinde önemli değişimler görülmektedir. Bakır numuneler, alüminyum numunelere göre daha yüksek darbe direnci göstermiştir. Bunun nedeni olarak bakırın daha aktif metal olmasından dolayı yapıştırıcı ile daha kuvvetli kimyasal bağlar oluşturduğu söylenebilir.

Yapıştırılan çelik ve paslanmaz çelik malzemelerin darbe direnci, alüminyum malzemelerin darbe direnci değerinden yaklaşık üç kat fazla çıkmıştır. Bu farklılıkların, malzemelerin yapıştırıcı ile kimyasal reaksiyona girme seviyeleri, serbest yüzey enerjileri ve aktiflik - pasiflik durumlarından kaynaklandığı söylenebilir. Alüminyum, pasif bir metal olduğu için yapıştırıcı ile kimyasal olarak daha zayıf bağlar oluşturmaktadır. Bakır alüminyuma nazaran daha aktif bir metal olduğundan, yapıştırıcı ile kimyasal reaksiyona girerek daha kuvvetli bağlar oluşturmaktadır. Dolayısıyla bakır/bakır bağlantısının kopmasında daha çok kohezyon kopması, alüminyum/alüminyum bağlantısında ise adhezyon kopmasının meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Çelik ve bakır esaslı malzemeler, alüminyum malzemelere göre daha yüksek darbe mukavemeti göstermişlerdir. Çelik ve bakır epoksi ile yapıştırmak için uygun olmakta ancak alüminyum için daha geniş yapıştırma yüzey alanına ihtiyaç duyulmaktadır.

Plastik esaslı Delrin malzemesinin darbe deneylerinde ise çok küçük darbe dirençleri elde edilmiştir. Plastik yüzeyine istenilen pürüzlülük değeri verilemediği ve yüzey enerjisi düşük olduğu için seçilen yapıştırıcı ile adhezyon bağı oluşmamıştır. Birleştirmelerde darbe sonucu hep adhezyon kopması gözlemlenmiştir. Bu kopma çeşidi de istenilmeyen bir hasar şeklidir.

Özet olarak, yapıştırma bağlantılarında yüksek darbe mukavemeti elde edebilmek için, yüzey pürüzlülük değerlerinin $R_a=1,5-2\mu\text{m}$ aralığında olması gerektiği,

yapıştırılan malzemenin, darbe dayanımını önemli oranlarda etkilediği, alüminyum malzemelerde yapıştırılan alanın arttırılması gerektiği, yapıştırma kalınlığının yaklaşık 0,3mm civarında olması gerektiği sonuçlarına varılmıştır.

Eksenel Yorulma Testleri: Eksenel yorulma testlerinde, test frekansındaki artış ile yük tekrar sayılarında önemli oranlarda azalmalar görülmüştür. Frekansın artması ile birim zamandaki yük tekrar sayısı arttığı için yapıştırılan bölgenin daha çok ısındığı ve yorulma dayanım değerlerini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının yorulma testlerinde frekansın etkisi üzerine yapılmış birkaç çalışmada çelişkiler bulunmaktadır. Düşük frekanslarda (5Hz'e kadar) yorulma dayanımının pek fazla değişmediği belirtilirken, bir diğerinde yorulma çatlağının daha fazla ilerlediği vurgulanmıştır. Bu gibi çelişkileri giderebilmek için, proje dahilinde bir test cihazı ile farklı frekanslarda çok sayıda deney gerçekleştirilebilirdi.

Yorulma deneyleri çok uzun süreler almaktadır. Bu durum bilindiği için proje önerisi yazılırken tension+torsion (çekme+burulma) yapabilen bir test makinası talep edilmişti. Bu cihaz temin edilebilseydi, frekans başta olmak üzere farklı oranlarda çeki ve burulma yüklemesi yapılarak tatmin edici verilere ulaşılabilirdi. Çeki+burulma makinesi temin edilemediği ve hizmet alımı gerçekleştirilemediği için projenin bu bölümü eksik kalmıştır. Başka bir kurumdan yorulma deneyleri için hizmet alımı yaparken büyük zorluklarla karşılaşmıştır. Yorulma deneylerinin, yürütücü ve yardımcı araştırmacıların kontrolünde ve buldukları kurumda yapılması gerekmektedir. Adı geçen cihaz temin edilebildiği zaman, ilerideki çalışmalarda bu eksikliklerin tamamlanması düşünülmektedir.

Yapay Sinir Ağları (YSA): Bu yöntem ile gerçekleştirilen darbe dayanımı tahminleri, deneylerden elde edilen değerler ile büyük bir uyum göstermiştir. Yapay sinir ağları ile geliştirilen model kullanılarak deney yapılmayan parametreler içinde darbe dayanımı değerlerinin tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Proje danışmanı tarafından önerilen yaşlandırma ile ilgili olarak ön literatür taraması yapılmıştır. Literatürde, bindirme bağlantılarının belli çevre şartlarında test edilmesi üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Darbe yüklemelerinde yaşlandırmanın etkisi üzerine yeterli çalışmaya rastlanılmamıştır. İleride yapılması düşünülen çalışmalarda bu durum dikkate alınarak eksiklik giderilmeye çalışılacaktır.

6. REFERANSLAR

- ADAMS, R.D., Comyn, J., Wake, W.C., Structural Adhesive Joints in Engineering, Chapman and Hall, London, (1997). Pp:167
- ANDURET, R.H., Special 2-D and 3-D Geometrically Non-Linear Finite Elements for Analysis of Adhesively Bonded Joints, (Ph.D.), The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, (1998).
- APALAK, M.K., Güneş, R., Fidancı, L., Geometrically Non-Linear Thermal Stress Analysis of an Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint, Finite Elements in Analysis and Design, 39, 155-174, (2003).
- ASM, Engineered Materials Handbook, Adhesives and Sealants, Vol: 3, (1990). Pp: 560.
- ASTM D950-3, Standard Test Method for Impact Strength of Adhesive Bonds, (2003).
- AYDIN, M.D. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi, (Doktora Tezi), Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2003).
- BAGHARI, R., Marouf, B.T., Fracture Behavior of Multi-Layered Composites Under Impact Loading, Materials Science and Engineering, 448, 20-24, (2007).
- BEZEMER, A.A., Guyt, C.B., Vlot, A., New Impact Specimen for Adhesives Optimization of High-Speed-Loaded Adhesive Joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 18, 255–260, (1998).
- BHADESHIA, H.K.D.H., Neural Networks In Materials Science, ISIJ International, 39, 966-979, (1999)
- CIBA, Ciba User's Guide to Adhesive, Surface Preparation and Pretreatment, Ciba Specialty Chemicals, Switzerland, (1999). Pp: 40.
- GEORGE, B., Touyeras, F., Grohens, Y., Vebrel, J., Analysis of Curing Mode and Mechanical Properties of an Anaerobic Adhesive. European Polymer Journal, 34, 399-404, (1998).
- GOGLIO, L., Rossetto M., Impact Rupture of Structural Adhesive Joints Under Different Stress Combinations, International Journal of Impact Engineering, 35, 635-643, (2008).

- HIGUCHI, I., Sawa, T., Okuno, H., Kato, S., Three-Dimensional Finite Element Analysis of Stress Response in Adhesive Butt Joints Subjected to Impact Bending Moments, *Journal of Adhesion*, 79, 1017-1039, (2003).
- HIGUCHI, I., Sawa, T., Suga, H., Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Lap Adhesive Joints Subjected to Impact Bending Moments, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 16, 1327-1342, (2002).
- KIHARA, K., Isono, H., Yamabe, H., Sugibayashi, T., A Study and Evaluation of The Shear Strength of Adhesive Layers Subjected to Impact Loads, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23, 253-259, (2003).
- KINLOCH, A.J., *Adhesion and Adhesives Science and Technology*, Chapman and Hall, London, (1987). Pp: 441.
- KINLOCH, A.J., Adhesives in Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, 307-335, (1997).
- KONG, L.X., Hodgso, P.D., Applicaton of Costitutive and Artificial Neural Network Models to Predict The Hot Strength of Steels, *ISIJ International*, 39, 991-998, (1999).
- KRENK, S., Jönsson, J., Hansen, L.P., Fatigue Analysis and Testing of Adhesive Joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 53, 859-872, (1996).
- KUMAR, P., Tiwari, S., Singh, R.K., Characterization of Toughened Bonded Interface Against Fracture and Impact Loads, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25, 527-533, (2005).
- KWON, J.W., Lee, D.G., The Effects of Surface Roughness and Bond Thickness on The Fatigue Life of Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14, 1085–1102, (2000).
- LEE, S.J., Lee, D.G., Development of Fatigue Failure Modal Fort He Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint Under Dynamic Torsional Loading, *Journal of Adhesion*, 56, 157-169, (1996).
- LEE, W.S., Lee, D.G., Static and Dynamic Torque Characteristics of Composite Cocured Single Lap Joints, *Journal of Composite Materials*, 31, 2188-2201, (1997).
- LIU, J., Sawa, T., Stress Analysis and Strength Evaluation of Single Lap Band Adhesive of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moment, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14, 67-92, (2000).

- LOCTITE CORPORATION, Loctite Worldwide Design Handbook, Second Edition, on CD, (1998).
- LUCKYRAM, J., Vardy, A.E., Fatigue Performance of Two Structural Adhesives, *Journal of Adhesion*, 26, 273-29, (1988).
- MACKAY, D.J.C., A Practical Bayesian Framework for Backpropagation Networks, *Neural Computation*, 4, 448-456, (1992).
- MALINOV, S., Sha, W., Application of Artificial Neural Networks For Modelling Correlations in Titanium Alloys, International Conference On Multiscale Materials Modelling, UK. (2002)
- MALINOVA, T., Malinov, S., Pantev U.N., *Surface and Coatings Technology*, 135, 258-267, (2001).
- MAZUMDAR, S.K., Mallick, P.K., Static and Fatigue Behaviour of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites, *Polymer Composites*, 19, 139-146, (1998).
- MODEL MANAGER[®], Neuromat Ltd., www.neuromat.com, (2003).
- OHDAR, R.K., Pahsa, S., Prediction of The Process Parametres of Metal Powder Preform Forging Using Artificial Neural Network (ANN), *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 227-334, (2003).
- OZEL, A., Kadioğlu, F., Sen, S., Sadeler, R., Finite Element Analysis of Adhesive Joints in Four Point Bending Load, *Journal of Adhesion*, 79, 683-697, (2003).
- OZTEMEL, E., *Artificial Neural Networks*, Istanbul, Papatya, (2003).
- PANDEY, P.C., Shankaragouda, H., Singh, A.K., Non-Linear Analysis of Adhesively Bonded Lap Joints Considering Visco-Plasticity in Adhesives, *Computers and Structures*, 70, 387-413, (1999).
- PERZYK M., Kochanski, A.W., Prediction of Ductile Cast Iron Quality by Artificial Neural Networks, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 305-307, (2001).
- PFEIFFER, P., Shakal, M., Effect of Bonded Metal Substrate Area and its Thickness on the Strength and Durability of Adhesively Bonded Joints, *J. of Adhesion Sci. Technology*, 12, 339-348, (1998).
- RAMANI, K., Zhao, W., The Evaluation of Residual Stresses in Thermoplastic Bonding to Metal, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 17, 353-357, (1997).

- ROMANOS, G., Strength Evaluation of Axisymmetric Bonded Joints Using Anaerobic Adhesives, *International Journal of Materials and Product Technology*, 14, 430-443, (1999).
- SANCAKTAR, E., Simmons, S.R., Optimization of Adhesively Bonded Single Lap Joints by Adherent Notching, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14, 1363-1404, (2000).
- SATO, C., Ikegami, K., Dynamic Deformation of Lap Joints and Scarf Joints under Impact Loads, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20, 17-25, (2000).
- SATO, C., Iwata, H., Ikegami, K., Dynamic Deformation of Tapered Lap Adhesive Joint under Impact Loading, *JSME International Journal, Series A*, 40, 31-36, (1997).
- SAWA, T., Higuchi, I., Suga, H., Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Lap Adhesive Joints Under Impact Loads, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 16, 1585-1601, (2002b).
- SAWA, T., Liu, J., Nakano, K., Tanaka, J., A Two Dimensional Stress Analysis of Single Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherents Subjected to Tensile Loads, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14, 43-66, (2000).
- SAWA, T., Suzuki, Y., Kido, S., FEM Stress Analysis and Strength of Adhesive Butt Joints of Similar Hollow Cylinder Under Static and Impact Tensile Loadings, *Journal of Adhesion Science Technology*, 16, 1449-1468, (2002a).
- SAWA, T., Uchida, H., A Two Dimensional Stress Analysis and Strength Evaluation of Hand Adhesive Butt Joints Subjected to Tensile Loads, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11, 811-833, (1997).
- SONG, R., Zhang, Q., Tseng, M., Zhang, B., The Application of Artificial Neural Networks to The Investigation of Aging Dynamics In 7175 Aluminium Alloys, *Materials Science and Engineering, C3*, 39-41, (1995).
- TS EN ISO 10365, Yapıştırıcılar- Başlıca Kusurların Gösterilmesi, (2001).
- TS EN ISO 11343, Yapıştırıcılar - Yüksek Mukavemetli Yapıştırıcıların Darbeli Uygulamalarda Ayrılmaya Karşı Dinamik Dayanımının Tayini - Kamalı Darbe Metodu, (2006).
- VITEK, J.M., Neural Network Applied to Welding: Two Examples, *ISIJ International*, 39, 1088-1095, (1999).

- WANG, Y., Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J., Taylor, A.C., The Impact Wedge-Peel Performance of Structural Adhesives, *Journal of Materials Science*, 35, 1867-1884, (2000).
- WOLDESENBET, E., Aga, Z.A., Bond Thickness Effect on Impact Response and Damage of Adhesively-Bonded Graphite/Epoxy Composites, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21, 21-34, (2007).
- WONG, C.P., Rao Y., Lu, D., A Study of Impact Performance of Conductive Adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24, 449–453, (2004).
- XU, X.X., Crocombe, A.D., Smith, P.A., Fatigue Crack Growth Rates in Adhesive Joints Tested at Different Frequencies, *Journal of Adhesion*, 58, 191-204, (1996).

7. EKLER

Yapılan deneysel çalışmalarla ilgili olarak TMMOB Makine Mühendisleri Odası Konya Şubesi tarafından 24–25 Kasım 2007 tarihleri arasında düzenlenen IV. Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi'nde “Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışları” adlı bildiri yardımcı araştırmacı Araş. Gör. Murat ÖZENÇ tarafından sunulmuştur. Bildiri tam metni EK - 1 olarak verilmiştir.

Ayrıca sunulan bildiri paralelinde, yapay sinir ağları yöntemiyle elde edilen tahminlerin de ilave edildiği bir yurt dışı yayın, SCI-Expanded kapsamında ve Tübitak sınıflandırmasında A-Grubu bir dergi olan “Kovove Materialy – Metallic Materials” de yayınlanmıştır. Makalenin tam metni EK- 2 olarak verilmiştir.

EK – 1

Şekercioğlu, T., Özenç, M., “Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışları”, IV. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı, 103-111, Konya, 2007.

EK – 2

Özenç, M., Şekercioğlu, T., “Experimental and Computational Investigation of Adhesive Joints Subjected to Impact Loads”, Kovove Materialy – Metallic Materials, 46/3, 133-138 (2008).



TMMOB Makina Mühendisleri Odası Konya Şubesi
IV. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi
24-25 Kasım 2007

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Tezcan ŞEKERCİOĞLU¹, Murat ÖZENÇ²

¹Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl. Denizli / TÜRKİYE
Tel: 258. 295 31 49 e-posta: tsekerci@pau.edu.tr

²Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl. Denizli / TÜRKİYE
Tel: 258. 295 31 67 e-posta: muratozenc@pau.edu.tr

Özet: Teknolojideki gelişmelere bağlı olarak, yapıştırma bağlantılarının kullanımı giderek artmaktadır. Darbe mukavemeti, uzay ve otomotiv sanayisinde büyük önem taşımaktadır. Bu deneysel çalışmada, ASTM 950-03 standardına göre imal edilmiş deney numuneleri, epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılarak test edilmiştir. Izod darbe test cihazında kopma anındaki darbe mukavemetleri kJ/m^2 cinsinden ölçülmüştür. Deneylerde, yüzey pürüzlülüğü, yapıştırılan malzeme ve yapıştırma kalınlığı gibi parametreler değiştirilerek, darbe dayanımına olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. En yüksek darbe dayanımları $R_a=1,5\mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğüne sahip çelik numunelerde elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Darbe dayanımı, yapıştırma bağlantıları

1. GİRİŞ

Endüstriyel yapıştırıcıların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki gelişmelerden dolayı yapıştırıcı ile bağlama tekniği birçok mühendislik alanında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer geleneksel metotlara (kaynak, perçin bağlantıları vs.) göre sahip olduğu avantajlardan dolayı, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar birçok araştırmacı tarafından analitik, sonlu elemanlar metodu ve deneysel olarak statik durumlar için incelenmiş olup araştırmalar devam etmektedir. Dinamik durumlardaki davranışları üzerine yapılan çalışmalarda gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle uzay, uçak ve makine konstrüksiyonlarında dinamik yükler altında kullanılmaları, bu çalışmalar açısından önem kazanmaktadır [1].

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetini belirleyebilmek için günümüzde kullanılan çeşitli test metotları vardır. Ancak bu testlerden elde edilen değerler, yapıştırma bağlantısının mukavemeti hakkında gerçek değerleri vermemektedir. Yapıştırma bağlantısının konstrüksiyonu ve işletme şartları, yapıştırma bağlantısının mukavemeti üzerinde son derece etkili olmaktadır. Bundan dolayı, dizayn aşamasında belirtilen bu faktörler göz önünde bulundurulmalı, çalışma şartlarına uygun deneyler yapılmalı ve elde edilen mukavemet değerleri kullanılmalıdır. Literatürde [2-3], mukavemet hesapları yapılırken farklı düzeltme faktörlerinin kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu faktörlerin başlıcaları; malzeme, geçme, yapıştırma boşluğu, yüzey pürüzlülüğü, geometri, çalışma sıcaklığı, ısı yaşlanma ve çalışma ortamı faktörleri olarak verilmektedir.

2. YAPIŞTIRMA VE DARBE YÜKLERİ

Malzemenin yüksek oranda ani yüklemelere karşı göstermiş olduğu dirence darbe direnci denir. Malzemelerin darbe yüklerine karşı davranışları oldukça karmaşıktır. Yüksek hızlardaki darbe malzeme üzerinde gözle görülür hasarlar meydana getirir. Fakat düşük ve orta hızlardaki darbe daha az önemli gibi görünse de malzemenin içerisinde mikro çatlaklara neden olabilir. Önceden görülemeyen ve potansiyel tehlike arz eden bu hasarlar çalışma esnasında büyüyerek büyük felaketlere sebebiyet verebilir. Malzemelerin darbe direncinin tespit edilmesi birçok mühendislik uygulamalarında parçaların çalışma ömrünün ölçülmesi bakımından oldukça önem

arz etmektedir. Darbe süresince malzeme tarafından soğurulan enerji, bu malzemenin mukavemetinin ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle düşük ve yüksek hızlarda deney parçasının kırılmasında soğurulan enerji miktarını ölçmek darbe deneyinin en önemli amacı olmaktadır [4].

Hayatımızı kolaylaştıran ürünlerin birçoğunda yapıştırma bağlantılı birleştirmeler mevcuttur ve bunlar zaman zaman darbe yüküne maruz kalmaktadır. Örneğin mobil telefonlarda bir takım bağlantılar yapıştırıcılar ile sağlanmaktadır. Telefon yere düşürüldüğünde veya başka nedenlerle darbelere maruz kalacağından bu tarz etkenler karşısında ürün garanti edilmelidir. Bir başka örnek olarak, yolcu araçlarında kaynaklı bağlantı kadar yapıştırma bağlantıları da mevcuttur. Kapı panelleri, motor kaportası ve birçok plastik aksam uygun geometrilere yapıştırma ile birleştirilmektedir. Bu yüzden kaza durumunda ani çarpmalara karşı bu bağlantıların davranışları önem arz etmektedir.

Bu açıdan özellikle insan can güvenliğinin söz konusu olduğu durumlarda darbe yüküne maruz kalmış yapılarda oluşacak hasarların ve gerilmelerin tahmin edilip sonuçların değerlendirilebilmesi gerekmektedir. Malzemelerin darbe performanslarını belirleyebilmek için birçok metot geliştirilmiştir ve bunların bir kısmı standardize edilmiştir. Sık kullanılan test yöntemleri aşağıda verilmiştir [5].

- Sarkaç Testi (Pendulum test),
ASTM Block Impact Test (ASTM D950-3)
Wedge Impact Method (TS EN ISO 11343)
- Ağırlık Düşürme Testi,
- Split Hopkinson Bar,

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Deney Düzenegi

Deneylerde Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan CEAST P/N 6958.000 marka Izod darbe cihazı kullanılmıştır. Test cihazı maksimum 25J'lük potansiyel enerjiye sahip olup farklı enerji kapasitelerinde çekiçler kullanılabilir. Cihaz termoplastik malzemelerin, esneklik davranışlarını standart gerilme durumlarında, darbe kırılma hızlarına bakarak değerlendirmektedir.



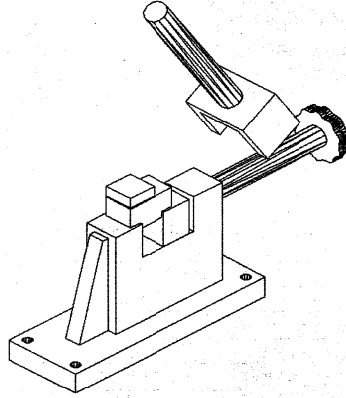
Şekil 1. Izod darbe cihazı

3.2. Yükleme Durumu

Deneylerde ASTM D 950-3 standardına göre yapıştırılmış deney numunelerinin darbe dayanımlarının tespit edilmesine çalışılmıştır. Sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için deney sonuçlarında absorbe edilen enerji, kullanılan çekiçin sahip olduğu potansiyel enerjinin %20'si ile % 80'i arasında olmalıdır. Bu nedenle yapılan birkaç ön denemeden sonra deneylerde 25 J' lük çekiçler kullanılmasına karar verilmiştir.

Deney öncesinde, ortam sıcaklığı, kullanılan çekiçin potansiyel enerjisi, kullanılmak istenen standart, deney numunesinin eni, boyu, test hızı vb. değerler cihaz üzerindeki kontrol panelinden girilmektedir. Deney sonunda absorbe edilen enerji (J), darbe direnci (kJ/m^2), darbe test hızı (m/s) ve darbe sonrası yükselme açısı cihazın ekranından okunmaktadır. Elde edilen verileri bilgisayara aktarmakta mümkündür.

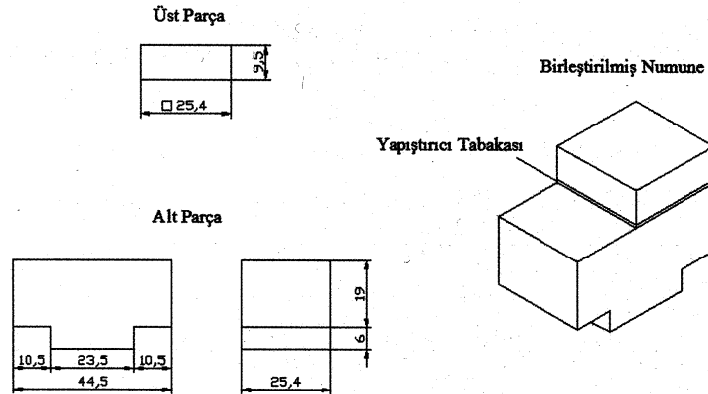
Şekil 2'de yapıştırılan numune üzerine darbe yükünün nasıl uygulandığı gösterilmiştir.



Şekil 2. Deney numunesinin çentik (Izod) darbe test cihazına bağlanması

3.3. Deney Numuneleri

Deneylerde çelik, bakır ve alüminyum olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler, ASTM D 950-3 standardında verilen boyutlara göre imal edilmiştir. Numunelerin resimleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Deney numunelerinin boyutları

İmalatı yapılan deney numuneleri, Loctite 7063 temizleyici ile temizlendikten sonra alt parça üzerine Loctite Hysol 3421 yapıştırıcı uygulanarak diğer üst numuneyle birleştirilip yapıştırma sağlandıktan sonra oda sıcaklığında 24 saat kürleşme (sertleşme) işlemine bırakılmıştır.

İmalatı gerçekleştirilen deney numunelerinin yüzey pürüzlülükleri Mahr, Perthometer M2 marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip yüzeyler elde edebilmek için malzeme cinsine göre kimyasal ve mekanik yöntemlerle yüzey aşındırma işlemleri yapılmıştır. Mekanik yöntem olarak bakır ve alüminyum numuneler için farklı numaralarda zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Kimyasal yöntem olarak ta çelik numuneler için hidroklorik asit kullanılarak, numunelerin asit içinde bekleme sürelerine göre istenilen yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir.

3.4. Deneylerde Kullanılan Yapıştırıcının Teknik Özellikleri

Deneylerde Loctite Hysol 3421 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında yavaşça kürleşebilen iki bileşenli (epoksi + hızlandırıcı) bir yapıştırıcıdır. Viskozitesinin düşüklüğü, 180 dakikalık uygulama öncesi yapıştırma süresi ve 1mm'lik yapıştırma kalınlığına kadar, geniş yüzeylerin birleştirilmesi için uygundur. Neme karşı gösterdiği yüksek direnç sayesinde su borularının, deniz botlarının, metal, ağaç, seramik, plastik vb. malzemelerin birleştirilmesinde iyi sonuçlar vermektedir. Uygulanma sonrasında 240 dakikalık sabitleme süresine sahip yapıştırıcı için üretici firma tarafından belirtilen başlıca fiziksel ve kürleşme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Loctite 3421'in fiziksel özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Kimyasal Bileşim	Epoksi - Hızlandırıcı
Viskozite (25°C'de, mPa.s)	40.000
Maksimum Yapıştırma Kalınlığı	1,0mm
Çalışma Sıcaklığı	+125 °C'ye kadar
Kayma Gerilmesi (ISO 4587)	20-25 N/mm ²
Soyulma Direnci (ISO 8510-2)	2,5 N/mm
Çekme Gerilmesi (ISO 6922)	13-19 N/mm ²
Kürleşme Süresi (22°C'de)	240 Dakika

4. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

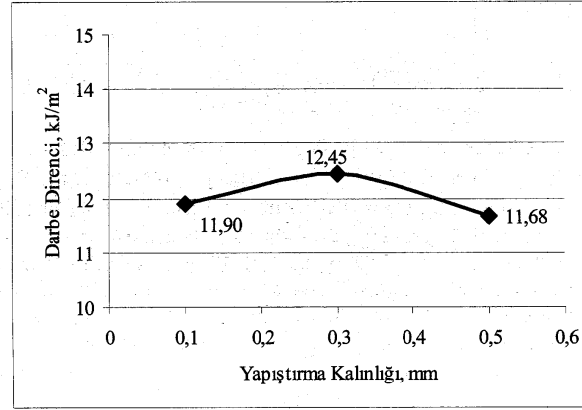
4.1. Yapıştırma Kalınlığının Etkisi

Yapıştırma kalınlığının, yapıştırma bağlantısının mukavemetine etkisi incelenirken, yapıştırılacak numuneler arasında 3 farklı kalınlık değeri (0,1; 0,3; 0,5mm) seçilerek deneyler yapılmıştır. Uygulanan deney şartları Tablo 2'de verilmiştir.

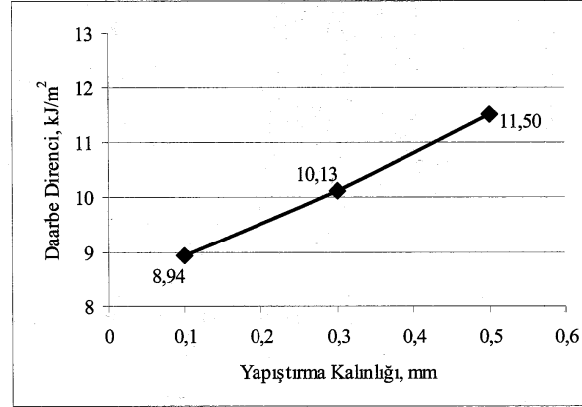
Tablo 2. Yapıştırma kalınlığı etkisinin tespitinde uygulanan deney şartları

Yapıştırılan Malzeme	Alüminyum-Alüminyum			Bakır-Bakır		
Yüzey Pürüzlülüğü, R _a (µm)	1,5			1,5		
En / Boy Oranı	25,4/25,4 = 1			25,4/25,4=1		
Numune Sayısı	5			5		
Uygulanan Darbe Enerjisi (J)	25			25		
Yapıştırma Kalınlığı, s (mm)	0,1	0,3	0,5	0,1	0,3	0,5
Ort. Absorbe Edilen Enerji (J)	5,77	6,53	7,41	7,65	8,04	7,54
Ortalama Darbe Direnci, kJ/m ²	8,94	10,13	11,50	11,90	12,45	11,68

Şekil 4 ve Şekil 5' den de görüleceği gibi yapıştırıcı film tabakası kalınlığı arttıkça bağlantıların, uygulanan darbeye karşı göstermiş olduğu direnç kullanılan malzemeye göre farklılık göstermektedir. Bakır numunelerde yapıştırma kalınlığı 0,3 mm iken darbeye karşı göstermiş olduğu direnç, 0,1 ve 0,5 mm yapıştırma kalınlıklarına göre daha yüksek değerler çıkmıştır. Alüminyum numunelerde ise yapıştırma kalınlığı arttıkça darbeye karşı gösterilen direnç artmıştır. 0,3mm yapıştırıcı kalınlığında optimum darbe direnci elde edildiği söylenebilir.



Şekil 4. Bakır malzeme için yapıştırma kalınlığının darbe direnci ile ilişkisi



Şekil 5. Alüminyum malzeme için yapıştırma kalınlığının darbe direnci ile ilişkisi

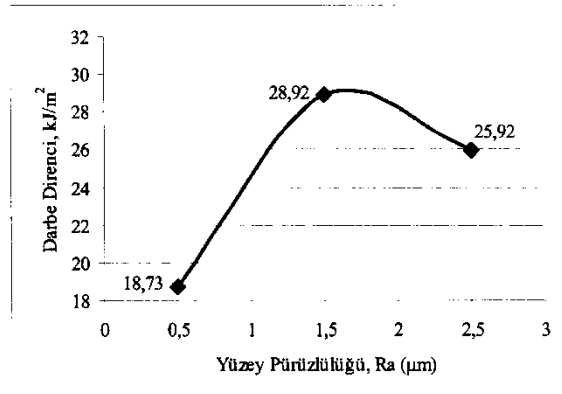
4.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi

Yüzey pürüzlülüğünün, yapıştırma bağlantısının darbe mukavemetine etkisi araştırılırken, yapıştırma kalınlığı sabit tutularak, üç farklı yüzey pürüzlülüğü kullanılmıştır. Bakır ve alüminyum numuneler farklı numaralarda zımpara kağıdı ile mekanik olarak, çelik numuneler ise hidroklorik asit içerisinde bekletilerek kimyasal olarak farklı yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Uygulanan deney şartları Tablo 3'de verilmiştir.

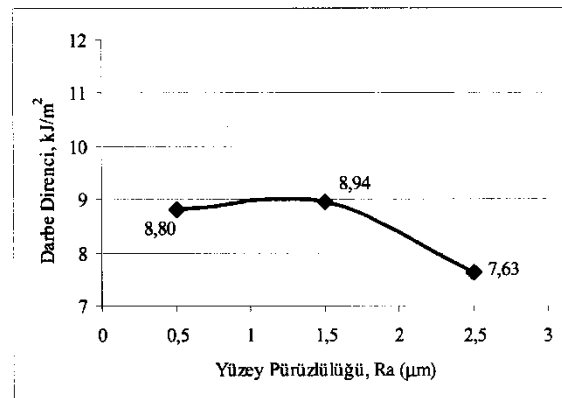
Tablo 3. Yüzey pürüzlülüğü etkisinin tespitinde uygulanan deney şartları

Yapıştırılan Malzeme	Çelik-Çelik			Alüminyum-Alüminyum			Bakır-Bakır		
En / Boy Oranı	25,4/25,4=1			25,4/25,4=1			25,4/25,4=1		
Yapıştırma Boşluğu (mm)	0,1			0,1			0,1		
Numune Sayısı	5			5			5		
Uygulanan Darbe Enerjisi (J)	25			25			25		
Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)	0,5	1,5	2,5	0,5	1,5	2,5	0,5	1,5	2,5
Ort. Absorbe Edilen Enerji (J)	12,08	18,67	16,70	5,67	5,77	4,92	6,97	7,65	7,17
Ortalama Darbe Direnci, kJ/m^2	18,73	28,92	25,92	8,8	8,94	7,63	10,80	11,90	11,01

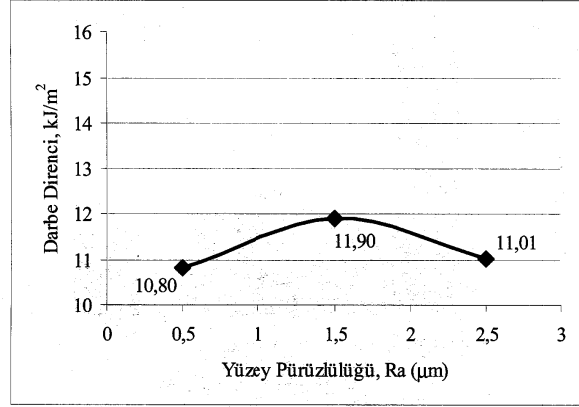
Aşağıda Şekil 6, 7 ve 8' de üç farklı malzemenin farklı yüzey pürüzlülük değerlerindeki darbe mukavemeti değerleri verilmiştir. En düşük mukavemet değerleri, en az yüzey pürüzlülüğünde ($R_a = 0,5 \mu\text{m}$) bulunmuştur. Darbe mukavemeti açısından optimum pürüzlülük değeri $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ için minimum değerler bulunmasının nedeni yüzeyin pürüzsüz düz olmasından dolayı kama etkisinin kaybolarak yapıştırıcının tutunacağı yerlerin azalmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü gereğinden fazla arttığı zamanda mukavemet değerleri tekrar düşmektedir. Bunun nedeni olarak, aradaki yapıştırıcı kalınlığının kısmen artmış olması ve fazla pürüzlülüğün dolayı yapıştırıcının, malzeme yüzeyine tam olarak yayınamadığı (düşük ıslanabilirlik) söylenebilir. Bakır numuneler, çelik ve alüminyum numunelere göre biraz farklılık göstermiştir. Bunun nedeni olarak bakırın aktiflik sırası dolayısıyla yapıştırıcı ile daha kuvvetli kimyasal bağlar oluşturması söylenebilir.



Şekil 6. Çelik malzeme için yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci ile ilişkisi



Şekil 7. Alüminyum malzeme için yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci ile ilişkisi



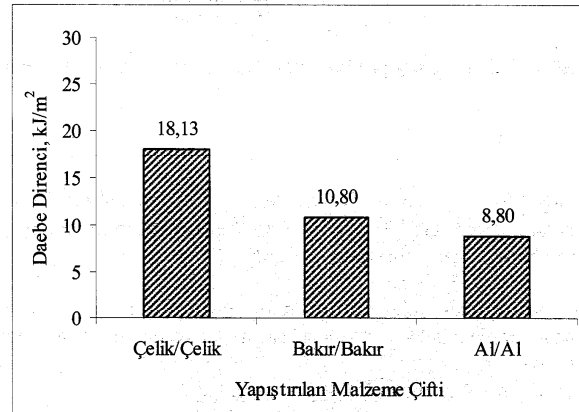
Şekil 8. Bakır malzeme için yüzey pürüzlülüğünün darbe direnci ile ilişkisi

4.3. Yapıştırılan Malzemenin Etkisi

Yapıştırılacak malzeme seçimi yapılırken, özellikle genel makine sanayisinde kullanılan çelik, bakır ve alüminyum gibi malzemelerin kullanılmasına dikkat edilmiştir. Uygulanan deney şartları Tablo 3’de verilmiştir.

Şekil 9, 10 ve 11’den görüleceği üzere, aynı şartlar altında sadece malzeme değiştirildiğinde darbe direnci değerlerinde önemli azalmalar görülmektedir. Çelik ile alüminyum malzemelerin darbe direnci değerleri arasında yaklaşık üç kat fark vardır. Bu farklılıkların, malzemelerin yapıştırıcı ile kimyasal reaksiyona girme seviyeleri, serbest yüzey enerjileri ve aktiflik - pasiflik durumlarından kaynaklandığı söylenebilir.

Alüminyum, pasif bir metal olduğu için yapıştırıcı ile kimyasal olarak daha zayıf bağlar oluşturmaktadır. Bakır alüminyuma nazaran daha aktif bir metal olduğundan, yapıştırıcı ile kimyasal reaksiyona girerek daha kuvvetli bağlar oluşturmaktadır. Dolayısıyla bakır/bakır bağlantısının kopmasında daha çok kohezyon kopması, alüminyum/alüminyum bağlantısında ise adhezyon kopmasının meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 9. Yüzey pürüzlülüğü $R_a=0,5\mu\text{m}$ için yapıştırılan malzeme çifti ve ortalama darbe dirençleri arasındaki ilişki

- [2] Loctite Corporation, Loctite Worldwide Design Handbook, 2nd ed., 1998 (CD).
 [3] V.V. Gantenhammer, Berechnung von geklebten Welle-Nabe-Verbindungen, VDI-Z 132, Nr.7, pp. 81-86, 1990.
 [4] www.instron.com.tr
 [5] R. A. Adams, "Adhesive Bonding" Woodhead Publishing Limited, 2005, pp 164-165.

ÖZGEÇMİŞLER

Yrd.Doç.Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU 1968'de Eskişehir'de doğmuştur. 1986 yılında Eskişehir Atatürk Teknik Lisesi'ni, 1990 yılında Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği'ni, 1996 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansını, 2001 yılında aynı enstitüde doktorasını tamamlamıştır. 1992-1995 yılları arasında Denizli Emsan A.Ş. kalıp atölyesinde çalışmıştır. 1995-2002 yılları arasında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmış ve 2002 yılında, halen görevde bulunduğu Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne Yardımcı Doçent olarak atanmıştır. İlgili alanları, Makine Tasarımı, Makine Elemanları ve Yapıştırma Tekniği'dir. Makine Mühendisleri Odası'nın 36673 sicil nolu üyesidir. Evli ve bir kız çocuk babasıdır.

Araş. Gör. Murat ÖZENÇ 1982 de İzmit'te doğmuştur. 1999 yılında Pendik Anadolu Denizcilik Meslek Lisesi'nden, 2005 yılında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur. 2007 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansını tamamlamıştır. Şu anda aynı enstitünün Doktora Programı Hazırlık Sınıfı öğrencisidir. 2005 yılı aralık ayından itibaren Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Experimental and computational investigation of adhesive joints subjected to impact loads

M. Ozenc, T. Sekercioglu*

Department of Mechanical Engineering, Pamukkale University, 200 20 Denizli, Turkey

Received 31 December 2007, received in revised form 25 February 2008, accepted 25 February 2008

Abstract

In recent years, the strength of the adhesive joints under impact loading has become important because their use expands to the aircraft and automobile industries. The impact strength of adhesively bonded cylindrical components is affected by the various factors such as the type of adherent, surface roughness, adhesive thickness, and operating temperature. In this study, the effect of three surface roughness values on impact strength is experimentally investigated and the results are discussed. Results showed that optimum surface roughness values were found in the range $R_a = 1.5$ to $2.5 \mu\text{m}$. The highest impact strength was obtained in stainless steel adherent while the lowest one was obtained in aluminium specimens. Materials with higher free surface energy had higher impact strength values. The effect of adhesive thickness on impact strength was dependent on the type of adherent. Additionally, an impact strength prediction model was developed using Artificial Neural Network (ANN). The impact strength prediction results showed that developed artificial neural network model was convenient and powerful tool for impact strength estimation of adhesively bonded joints.

Key words: impact load, adhesive joints, adhesive thickness, surface roughness, ANN

1. Introduction

Adhesive bonding has been often used to join various kinds of structural components. The adhesive joints in actual products may sometimes be subjected to impact loading. The most typical type of adhesive joint for structural adhesion is lap joint. Shear stress is prominent in the adhesive layer of lap joints. Therefore, the adhesive strength under the impact shear stress must be measured. Impact strength is one of the most important properties for a part designer to consider, and it is the most difficult to quantify.

A lot of procedures have been developed to evaluate the impact performance of adhesively bonded joints because of intensive interest in a wide variety of applications, and some of them have been adopted as a standard. The methods using a pendulum hammer, the so-called Charpy or Izod tests, are the most usual techniques for the impact test of relatively low impact velocity. A standard, ASTM Block Impact Test (ASTM D950-3) is a variation of such pendulum hammer methods modified to be suitable for the eval-

uation of adhesive joints, and it is the most common and trendy one [1].

Adams and Harris [2] calculated the stress distribution in the specimen of the block impact test using the Finite Element Method (FEM) in some cases of changing loading points. They concluded that the main information that could be derived from this test was a quantitative comparison of the ability of various adhesives to withstand high loading rates, and the transfer of results to a practical situation was suspect. In the experiments, strength assessment of adhesives was carried out using four different types of epoxy adhesives. The results indicated the importance of ductility for adhesives in order to withstand impact loading.

Studying the effect of thickness of the adhesive on the fracture behaviour in adhesive joints under Mode I loading, Chai [3] concluded that the fracture energy became stabilized at a bond thickness less than 0.03 mm , or greater than 0.5 mm , while the maximum fracture energy was observed at 0.22 mm . In another study [4], the aluminium alloy (6061-T6) plates were joined with epoxy adhesive. The static and fatigue

*Corresponding author: tel.: +90 258 296 31 49; fax: +90 258 296 32 62; e-mail address: tsekerci@pau.edu.tr

strength of the joint was studied experimentally and with the finite elements method. In static experiments, adhesive thickness of 0.3 mm had higher failure forces than 0.1 mm thickness.

Bezemer et al. [5] tested specimens with three adhesives at five layer thicknesses and three test speeds. The results of the tests indicated that a tough adhesive had larger energy absorption at impact than a brittle adhesive. Depending on the adhesive used and the test speed, different optimum adhesive thicknesses were observed. Increasing adhesive thickness gives a better impact strength for tough adhesives only. Sawa et al. [6] investigated the stress wave propagation and stress distribution in single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads. Examining the effects of Young's modulus of the adherents, the overlap length, the adhesive thickness and the adherent thickness on the stress wave propagation and stress distribution at the interfaces, Sawa et al. found that the maximum stress occurred near the edge of the interface and that it increased with an increase of Young's modulus of the adherents.

Kihara et al. [7] designed a test to study the response of a thick adherent shear joint subjected to various impact stress waves and observed that the type of fracture was associated with the level of the incident stress. Higuchi et al. [8] conducted the dynamic analysis of butt joints of cylindrical steel rods subjected to tensile impact loads using the three-dimensional finite element method and showed stress variation in the adhesive layer with respect to time and the presence of stress singularity at the circumferential edge of the adhesive layer.

In an experimental study carried out for both static and dynamic loading conditions, Sekercioglu et al. [9] determined the effect of different surface roughness values on bonding strength. Results showed that optimum surface roughness values were found in the range from $R_a = 1.5$ to $2.0 \mu\text{m}$. In another study [10], the effect of three different adherents (steel, bronze and aluminium) on bonding strength was experimentally investigated, and the highest joint strength was obtained in bronze adherent while the lowest value was obtained in aluminium adherent.

The type of material has a significant effect on the impact strength. Higher impact strength of adhesive joints was found for chromium based hardener for some joints such as steel-steel and aluminium-aluminium joints [11]. In a study [12] about the impact strength of epoxy and polyurethane resins filled with graphite, a decrease in impact strength with an increase in filler content was observed, and the highest values of impact strength were found for polyurethane/graphite composites.

Investigating the impact strength of epoxy and polyurethane resins filled with silver-coated inorganic particles and fibres, Novak et al. [13] found the de-

crease in impact strength with an increase in filler content. The highest values of impact strength were found for epoxy/silver-coated short fibre composites. The authors reported that the decrease of strength of adhesive joint to aluminium with an increase in filler content was observed while the highest strength of adhesive joints was found for the adhesives based on epoxy/silver-coated fibre composites.

As summarized above, the previous studies showed that the relationship between roughness, adherent material, adhesive thickness and impact strength was unclear. The object of the present study is to clarify the influence of the surface roughness, adherent material and adhesive thickness on the impact strength of adhesively bonded components. The effect of these three parameters on impact strength was experimentally and computationally investigated.

2. Test materials and experimental procedure

In this study, the tests were carried out according to the ASTM D950-03 standard [14] with a pendulum-type impact machine. CEAST P/N Izod impact test machine was used in the experiments. The test machine with manual brake had an apparatus for energy from 1 to 25 J (Fig. 1). This machine has been used to conduct resilience test on thermoplastic materials, in order to determine their impact fragility characteristics under standard stress conditions.

Steel, copper and aluminium materials were used in the experiments because these are very common materials in general machinery industry. Figure 2 shows the dimensions and geometry of specimens which were carried out according to the ASTM standard. The different surface roughness values for copper and aluminium were obtained using the abrasive sandpaper

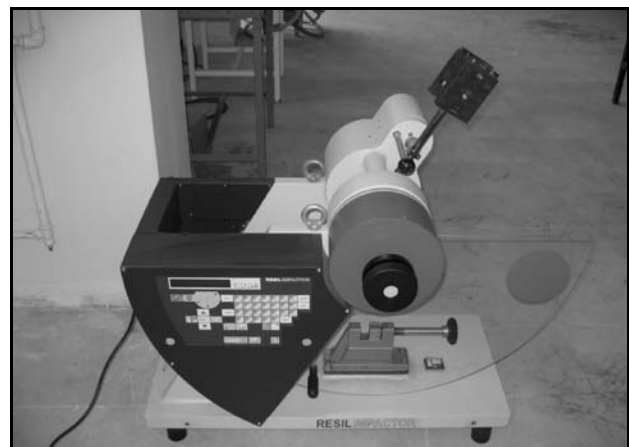


Fig. 1. Izod impact test machine.

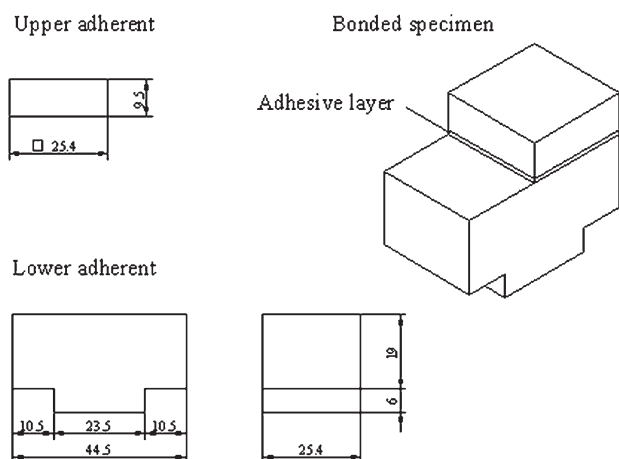


Fig. 2. Dimensions of test specimens according to ASTM 950-3 standard.

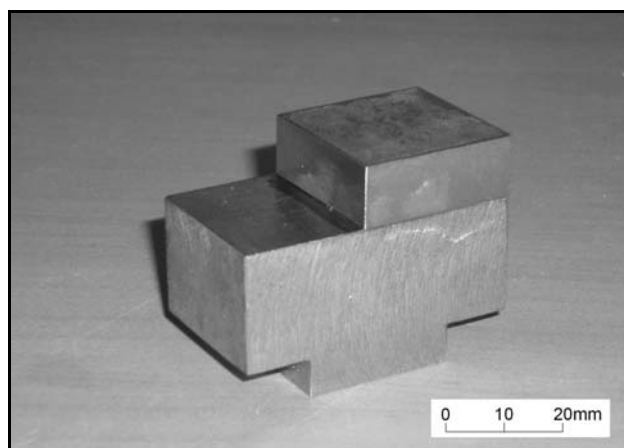


Fig. 3. Bonded test specimen.

with various mesh numbers (P220C, P600C, P800C). The steel specimens were soaked into hydrochloric acid (HCl) to prepare suitable surface roughness. The surface roughness of treated specimens was measured using a Mahr Perthometer M2 profilometer.

The specimens were cleaned with Loctite 7063, a type of general purpose cleaner for preparing surfaces to be bonded with adhesive. After the cleaning of machined specimens, Loctite Hysol 3421 adhesive was applied on the surface of each part. Loctite Hysol 3421 is a two component epoxy adhesive which cures slowly at room temperature after mixing. It is a general purpose, flowable adhesive which develops high strength and has excellent moisture resistance. The long working life and medium viscosity (40 Pa s) make this adhesive system suitable for large surfaces and where adjustment time is needed after assembly [15]. The adhesive thickness was obtained by using 0.5 mm long wires with three different outer diameters

(0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm). These wires were located at all corners of adherent surface. After that, these bonded specimens were left for curing process for 24 hours at room temperature (Fig. 3).

3. Impact strength prediction with ANN

Neural network modelling is an empirical modelling method in which a very flexible function is fitted to a set of data by adjusting the parameters of the network, also known as the weights. Basically, artificial neural networks are computer programs designed to develop and discover new information by using the learning function like a human brain. It is very hard or impossible to develop these skills with traditional programming methods. For this reason, it can be said that artificial neural network is a computer science division about adaptive information processing developed for occasions where the programming is very hard or impossible [16].

An attempt has been made to predict impact strength of adhesively bonded joints by using the data from experimental studies. In a first instance, half of the data sets were randomly selected from the database to serve as a test. None of these sets were used in training the present network. The remaining data were then divided in two sets, also randomly selected. The first one, containing 80 % of the lines, was used to train a number of models, while the second, containing the rest of the database, was used to validate the training and select an optimum committee of models. This procedure has been described numerous times in the literature. In the present study, a commercial package [17] was used which implements the algorithm written by Mackay [18].

4. Results and discussion

4.1. The effect of surface roughness

The effect of surface roughness on adhesive bonding strength was investigated for the different surface roughened specimens. Experimental conditions are given in Table 1. Experimental and predicted results are shown in Figs. 4, 5 and 6. The lowest joint strength was obtained in $R_a = 0.5 \mu\text{m}$ surface roughness and the optimum value was obtained with $R_a = 1.5 \mu\text{m}$ surface roughness. It was observed that as the roughness increased over the optimum range from $R_a = 1$ to $2 \mu\text{m}$, the strength values decreased. The reason of minimum value for $R_a = 0.5 \mu\text{m}$ might be the mechanical interlocking disappearance due to inadequate penetration of adhesive on smooth surfaces. When the surface roughness increases more than ne-

Table 1. Test conditions for determination of the effect of surface roughness

Adherent materials	Steel-Steel					Stainless Steel-Stainless Steel			Al-Al			Cu-Cu		
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.5	0.5	1.5	2.5	0.5	1.5	2.5		
Width/length (mm)	25.4/25.4 = 1					25.4/25.4 = 1			25.4/25.4 = 1			25.4/25.4 = 1		
Adhesive thickness, s (mm)	0.1					0.1			0.1			0.1		
Number of specimen	25					5			15			15		
Average absorbed energy (J)	12.1	13.0	18.6	16.8	16.7	19.5	5.6	5.7	4.9	6.9	6.8	8.1		
Average impact strength (kJ m^{-2})	18.73	19.97	28.91	26.04	25.91	30.20	8.80	8.94	7.63	10.80	11.90	11.01		

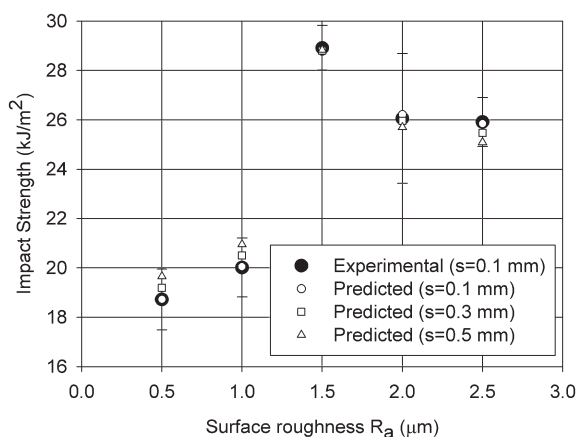


Fig. 4. Relationship between impact strength and surface roughness for steel material.

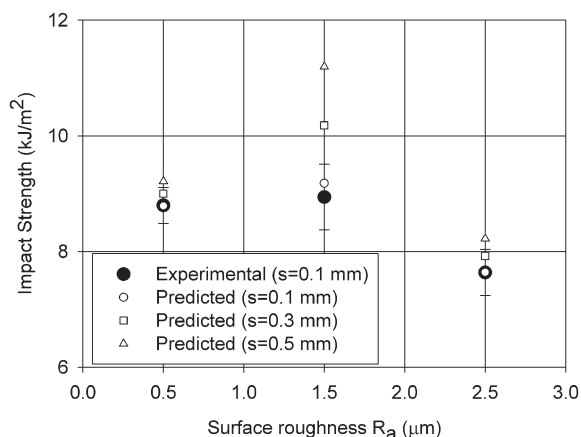


Fig. 5. Relationship between impact strength and surface roughness for aluminium material.

cessary, the strength values decrease. It can be said that the thickness of the adhesive increases partly and the adhesive cannot spread on the substrate surface because of too much roughness. Therefore, insufficient wetting occurs and then strength values decrease. In order to obtain the optimum wetting in the adhesive joints, the adherent surface roughness should be considered.

4.2. The effect of adherent type

The effect of four different adherents (steel, stainless steel, copper and aluminium) on bonding strength was investigated. The experimental conditions are given in Table 1. As it can be seen in Figs. 7, 8 and 9, when the different adherent was used, impact strength values of the joint changed considerably. The highest joint strength in stainless steel-stainless steel materials and the lowest joint strength in aluminium-aluminium materials were obtained. Normally, the failure phenomenon in adhesive joints is desired among adhesive molecules. The cohesive failure was observed on steel and stainless steel specimens while the adhesion failure was observed on aluminium specimens. Alu-

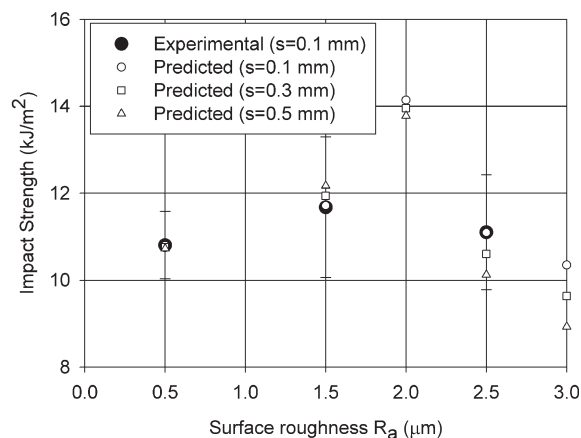


Fig. 6. Relationship between impact strength and surface roughness for copper material.

minium consists of weak bonding forces with adhesive because of passive materials. Bonding forces are affected by many chemical and physical phenomena. During the curing process, various chemical reactions occur between adherent and adhesive materials.

Table 2. Test conditions for determination of the effect of adhesive thickness

Adherent materials	Al-Al			Cu-Cu		
Surface roughness, R_a (μm)	1.5			1.5		
Width/length (mm)	25.4/25.4			25.4/25.4		
Number of specimen	15			15		
Adhesive thickness, s (mm)	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5
Average absorbed energy (J)	5.7	6.5	7.4	6.8	8.0	7.5
Average impact strength (kJ m^{-2})	8.94	10.13	11.50	11.90	12.45	11.68

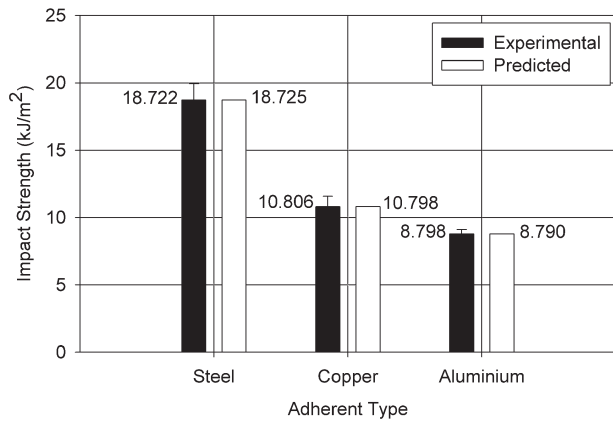


Fig. 7. Relationship between impact strength and adherent type for $R_a = 0.5 \mu\text{m}$.

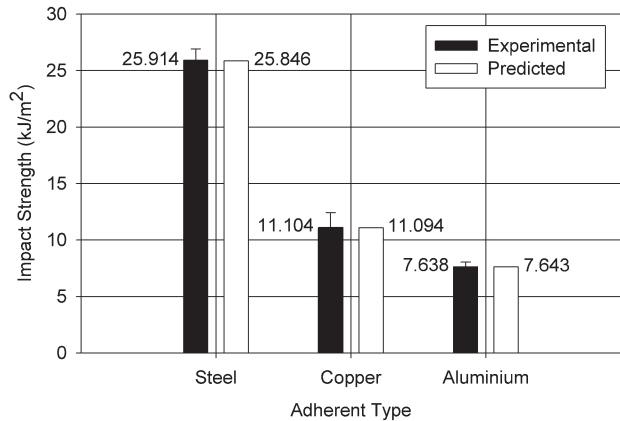


Fig. 9. Relationship between impact strength and adherent type for $R_a = 2.5 \mu\text{m}$.

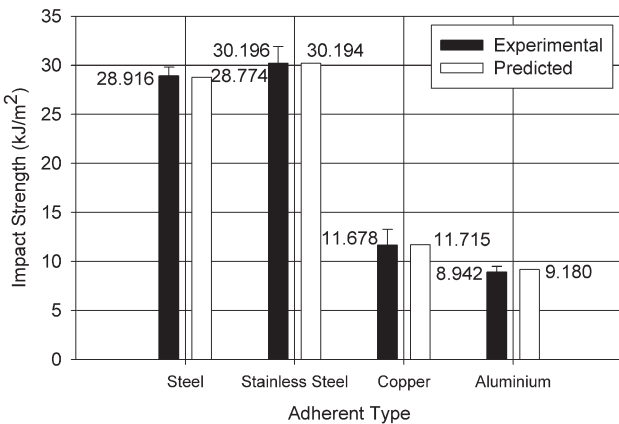


Fig. 8. Relationship between impact strength and adherent type for $R_a = 1.5 \mu\text{m}$.

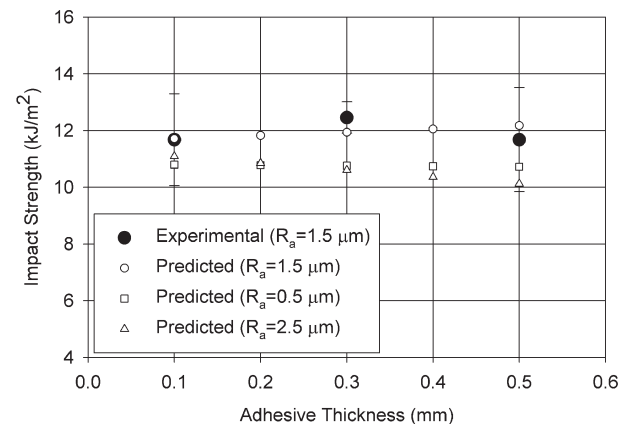


Fig. 10. Relationship between impact strength and adhesive thickness for copper material.

4.3. The effect of adhesive thickness

The effect of adhesive thickness on adhesive bonding strength was experimentally investigated. During the tests, the adhesive thickness was varied from 0.1 to 0.3 or to 0.5 mm, and the surface roughness was held constant. Experimental conditions are given in Table 2. Different results were obtained depending on

the adherent type while the thickness of adhesive increased. Experimental and predicted results are shown in Figs. 10 and 11. It was observed that for aluminium materials, as the adhesive thickness increased, the impact strength also increased. Different results were obtained for copper materials since the maximum impact strength was at 0.3 mm adhesive thickness. These differences were most likely to be arisen from the interac-

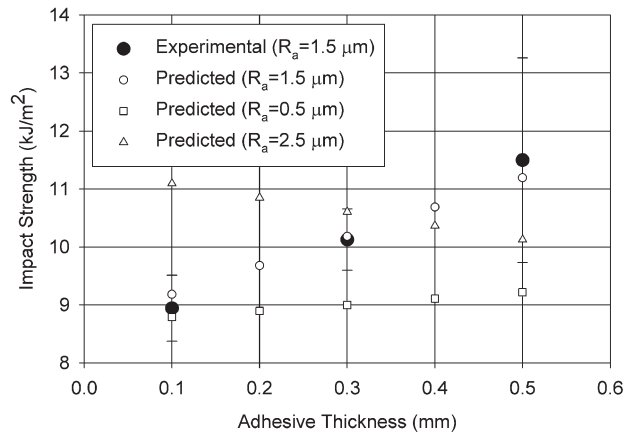


Fig. 11. Relationship between impact strength and adhesive thickness for aluminium material.

tion between adhesive and adherent during the curing process.

5. Conclusions

In this research, the tests were carried out according to the ASTM D950-03 standard with a pendulum-type impact machine. The effects of surface roughness, adherent materials and adhesive thickness on impact strength were investigated. From the experimental observations and ANN results, the following conclusions may be concluded:

1. The low impact strengths were obtained for both the very smooth surfaces ($R_a < 1.0 \mu\text{m}$) and very rough surfaces ($R_a > 2.5 \mu\text{m}$). For high impact strength, the optimum surface roughness was obtained in the range $R_a = 1$ to $2 \mu\text{m}$. The surface roughness should be considered during the design stage of adhesively bonded joints.

2. Significant variations were observed in impact strength of the joint when the different adherent was used to adhesively bonded joints. It has been seen that the free surface energy of materials affects directly their bonding strength. Furthermore, materials which have high free surface energy showed higher strength values. The highest impact strength was obtained in stainless steel adherent while the lowest value was obtained in aluminium adherent.

3. The optimum adhesive thickness was obtained at 0.3 mm in copper materials for high impact strength. Also, the higher impact strength values in aluminium adherent were measured at increased adhesive thickness.

4. The ANN model can be used as estimation techniques to predict the impact strength of the adhesively bonded joints.

Acknowledgements

This study was supported by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK), Project Number: 105M214.

References

- [1] SATO, C.: Impact behaviour of adhesively bonded joints. In: Adhesive Bonding. Ed.: Adams, R. D. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd. 2005, p. 161.
- [2] ADAMS, R. D.—HARRIS, J. A.: Int. J. Adhes. Adhes., 16, 1996, p. 61.
- [3] CHAI, H.: In: Composite Materials: Testing and Design. Philadelphia, ASTM STP 893, 1986, p. 209.
- [4] KRENK, S.—JONSSON, J.—HANSEN, L. P.: Eng. Fract. Mech., 54, 1996, p. 859.
- [5] BEZEMER, A. A.—GUYT, C. B.—VLOT, A.: Int. J. Adhes. Adhes., 18, 1998, p. 255.
- [6] SAWA, T.—HIGUCHI, I.—SUGA, H.: J. Adhes. Sci. Technol., 16, 2003, p. 1585.
- [7] KIHARA, K.—ISONO, H.—YAMABE, H.—SUGIBAYASHI, T.: Int. J. Adhes. Adhes., 23, 2003, p. 253.
- [8] HIGUCHI, I.—SAWA, T.—OKUNO, H.: J. Adhesion, 69, 1999, p. 59.
- [9] SEKERCIOGLU, T.—RENDE, H.—GULSOZ, A.—MERAN, C.: J. Mater. Process. Tech., 142, 2003, p. 82.
- [10] SEKERCIOGLU, T.—MERAN, C.: Mater. Design, 25, 2004, p. 171.
- [11] NOVAK, I.—SIMONIKOVA, J.—CHODAK, I.: Macromol. Mater. Eng., 286, 2001, p. 191.
- [12] NOVAK, I.—KRUPA, I.: Eur. Polym. J., 40, 2004, p. 1417.
- [13] NOVAK, I.—KRUPA, I.—CHODAK, I.: Synthetic Met., 144, 2004, p. 13.
- [14] ASTM D950-3: Standard test method for impact strength of adhesive bonds, 2003.
- [15] LOCTITE CORPORATION: Loctite Hysol 3421 Technical Data Sheet, 2006.
- [16] OZTEMEL, E.: Artificial Neural Networks. Istanbul, Papatya 2003.
- [17] MODEL MANAGER®: Neuromat Ltd. 2003, www.neuromat.com.
- [18] MACKAY, D. J. C.: Neural Comput., 4, 1992, p. 448.

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 105M214
Proje Başlığı: Dinamik ve Darbeli Yükler Altında Yapıştırma Bağlantılarının Mukavemetini Etkileyen faktörlerin İncelenmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yrd.Doç.Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU Prof.Dr. Alper GÜLSÖZ Yrd.Doç.Dr. Volkan KOVAN Araş.Gör. Murat ÖZENÇ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampusu, DENİZLİ
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Destekleyen kuruluş yoktur.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.05.2006 - 01.05.2008
Öz Yapılan bu çalışmada, tek taraflı bindirme bağlantılarının, değişik yüzey pürüzlülüklerinde, farklı yapıştırma kalınlıklarında ve farklı malzemeler kullanarak darbe dirençlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda; her parametre için optimum darbe dayanımını veren değerler belirlenmiştir. Silindirik yapıştırma bağlantılarının aksenal yorulma deneyleri yapılarak, frekansın etkisi incelenmiştir. Frekansın artmasıyla yük tekrar sayılarında önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak, darbe dayanımı tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu model ile tahmin edilen darbe dayanım değerleri, yöntemin uygun ve etkili bir tahmin yöntemi olduğunu göstermiştir.
Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcı, Yapıştırma Bağlantıları, Darbe Yüğü, Yorulma, Yapay Sinir Ağları (YSA)
Projeden Yapılan Yayınlar: 1. Şekercioğlu, T., Özenç, M., "Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışları", IV. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı, 103-111, Konya, 2007. 2. Özenç, M., Şekercioğlu, T., "Experimental and Computational Investigation of Adhesive Joints Subjected to Impact Loads", Kovove Materialy – Metallic Materials, 46/3, 133-138 (2008).

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje No: 105M214
Proje Başlığı: Dinamik ve Darbeli Yükler Altında Yapıştırma Bağlantılarının Mukavemetini Etkileyen faktörlerin İncelenmesi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Yrd.Doç.Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU Prof.Dr. Alper GÜLSÖZ Yrd.Doç.Dr. Volkan KOVAN Araş.Gör. Murat ÖZENÇ
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Kınıklı Kampusu, DENİZLİ
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Destekleyen kuruluş yoktur.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01.05.2006 - 01.05.2008
Öz Yapılan bu çalışmada, tek taraflı bindirme bağlantılarının, değişik yüzey pürüzlülüklerinde, farklı yapıştırma kalınlıklarında ve farklı malzemeler kullanarak darbe dirençlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda; her parametre için optimum darbe dayanımını veren değerler belirlenmiştir. Silindirik yapıştırma bağlantılarının aksenal yorulma deneyleri yapılarak, frekansın etkisi incelenmiştir. Frekansın artmasıyla yük tekrar sayılarında önemli azalmalar gözlemlenmiştir. Yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak, darbe dayanımı tahmin modeli geliştirilmiştir. Bu model ile tahmin edilen darbe dayanım değerleri, yöntemin uygun ve etkili bir tahmin yöntemi olduğunu göstermiştir.
Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcı, Yapıştırma Bağlantıları, Darbe Yükü, Yorulma, Yapay Sinir Ağları (YSA)
Projeden Yapılan Yayınlar: 1. Şekercioğlu, T., Özenç, M., "Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışları", IV. Makina Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı, 103-111, Konya, 2007. 2. Özenç, M., Şekercioğlu, T., "Experimental and Computational Investigation of Adhesive Joints Subjected to Impact Loads", Kovove Materialy – Metallic Materials, 46/3, 133-138 (2008).