



T. C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TAŞITLARDA KULLANILAN YAPIŞTIRICILARIN MEKANİK  
KARAKTERİZASYON DENEYLERİ VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Salim YAGOUB

Doç. Dr. Murat YAZICI

(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bursa- 2015

**Her Hakkı Saklıdır**

**TEZ ONAYI**

## TEZ ONAYI

Salim YAGOUB tarafından hazırlanan “Tağırlarda Kullanılan Yapıştırıcıların Mekanik Karakterizasyon Deneyleri ve Sonlu Elemanlar Analizi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Murat YAZICI

**Üye:** Doç. Dr. Murat YAZICI  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Otomotiv Mühendisliği



**Üye:** Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ  
Bursa Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
İnşaat Mühendisliği




imza

**Üye:** Yrd. Doç. Dr. İdris KAREN  
Bursa Orhan-gazi Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği



imza

  
Yukarıdaki Sonucu Onaylıyorum  
Prof. Dr. Ali Osman BEMİR  
Enstitü Müdürü ✓  
05.04.2016 (Tarih)

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.././.....

**Salim YAGOUB**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TAŞITLARDA KULLANILAN YAPIŞTIRICILARIN MEKANİK KARAKTERİZASYON DENEYLERİ VE SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Salim YAGOUB

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Murat YAZICI

Otomotiv endüstrisinde son yıllarda, hafif, ekonomik ve daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi ile alternatif birleştirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemler içerisinde hafiflik, ses ve titreşim yalıtımı, korozyon direnci gibi avantajları nedeniyle yapıştırıcılar otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı alüminyum 6013 numunelerinden üretilen tek taraflı bindirme bağlantısı kullanılarak Eposki-Gflex 655 yapıştırıcısının kohezif özelliklerinin karakterize edilmesidir. Sıcaklığın bu bağlantının mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için oda sıcaklığında ve +50°C sıcaklığında testler yapılmıştır. Oda sıcaklığında birinci moddaki kırılma enerjisini hesaplamak için DCB testi gerçekleştirilmiş ve CBBM metodu analitik çözüm olarak kullanılmıştır. İkinci moddaki kırılma enerjisini bulmak için ENF testi gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcının elastik karakteristiğini ve hasar başlangıcındaki gerilme oluşumunu belirlemek için aynı sıcaklıklarda bulk testi gerçekleştirilmiştir. Kritik sıcaklıklarda farklı bindirme boyutlarındaki tek taraflı bindirme bağlantısının çekme testi gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler kullanılarak Abaqus yazılımında yapıştırıcının mekanik modeli oluşturulmuş ve testler ile de doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** SLJ, DCB, ENF, CBBM, Abaqus, GFLEX655

**2015, xiv + 59 Sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **MECHANICAL CHARACTERIZATION EXPERIMENTS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ADHESIVES USING IN VEHICLES**

Salim YAGOUB

Uludağ University

Graduate School Of Natural And Applied Sciences

Department Of Automotive Engineering

**Supervisor:** Doç. Dr. Murat YAZICI

In the automotive industry, alternative coupling methods are needed with the development of lightweight, economical and more durable materials in recent years. Among these coupling methods, adhesives are commonly used in the automotive industry due to advantages such as corrosion resistance, light weightness, sound and vibration insulation. The aim of this work is to characterize the cohesive properties of an epoxy gflex 655 to be used in the manufacturing of single lap joint specimens of aluminum 6013. These joints were tested on +50°C and room temperature. DCB (double cantilever beam) test was realized in different critical temperatures as mentioned above and the analytical CBBM method was used to calculate G<sub>IIC</sub> fracture energy in mode one of the adhesive in room temperature. Then ENF (end-notched flexure) test was conducted also in that temperatures to get G<sub>IIC</sub> in mode two using also CBBM method. To define adhesive's elastic characteristics and the stresses occurring during damage initiation, Bulk tests were realized and also in the same temperatures. Tensile tests were conducted to a single lap joint of different overlap length in that critical temperatures. The mechanical model of the adhesive was created with Abaqus software using the data collected from the mechanical tests and verified with numerical simulation results.

Key Words: SLJ, DCB, ENF, CBBM, Abaqus, GFLEX655

**2015, xiv + 59 Pages.**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bana hayatın anlamını veren anneme, vefat eden ama ruhu ile içimde yaşayan babama, hayatım boyunca bana ağabeylik yapan kardeşim Mhamed'e, hayatta en sevdiğim insanlardan biri olan rahmetli eniştem Mohammed DADDA ve tüm aileme, akademik hayatımda bana en çok inanan, kaybettikten sonra kazanmayı öğreten, cömertçe, bilgisiyle ve sevgisiyle hayat tecrübesi ile görevinin gereğinden daha fazlasını yerine getiren danışman hocam Doç. Dr. Murat YAZICI' ya ve içinde bulunduğu araştırma grubunda yer alan Yrd. Doç. Dr. İdris KAREN ve tüm hocalarıma ve ekip arkadaşlarıma, özellikle ömür boyu dostuma, en zor günlerde beni yalnız bırakmayan Arş. Gör. Harun GÜÇLÜ'ye, aynı zamanda bana desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Hakkı ÖZER'e, staj yaptığım Portekiz'deki Prof. Dr. Lucas Filipe Martins DA SILVA hocama ve Porto Üniversitesi Makine Mühendisliği araştırma grubundaki Filip CHAVES, Eduardo MARQUES ve gurupta yer alan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışma Doç. Dr. Murat YAZICI tarafından yürütülen Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. firmasının proje müşteri kuruluşu olarak katkı koyduğu TÜBİTAK-TEYDEB 1505/5140018 nolu proje çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteğinden dolayı TÜBİTAK-TEYDEB'e ve TOFAŞ TÜRK OTOMOBİL FABRİKALARI A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca Oyak-Renault Otomobil Fabrikaları A.Ş'den Dr. Yücel CAN ve Presmetal A.Ş.'ye yapıştırıcı test aparatlarının üretimi konusunda verdikleri destek dolayısı ile şükranlarımı sunarım.

Salim YAGOUB

.././...

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
Çizelgeler Dizini .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	2
3. YAPIŞTIRICILAR VE YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRME ŞEKİLLERİ .....	6
3.1 Yapıştırıcı Bağlantı Özellikleri .....	9
3.1.1 Yapısal yapıştırıcılar.....	10
3.1.2 Yapıştırılan malzeme özellikleri .....	12
3.1.3 Yapıştırıcıların termal özellikleri .....	13
3.2 Tek Bindirme Bağlantı Analizi .....	14
3.2.1 Analitik analiz .....	14
3.2.2 Numerik analizi .....	16
4. HASAR TAHMİNİ.....	18
4.1 Yapıştırıcı ve Malzeme Özellikleri .....	18
4.2 Bindirme Boyutun Etkisi.....	20
4.3 Sıcaklık Etkisi .....	22
5. YAPIŞTIRICI KAREKTERİZASYON TEST YÖNTEMLERİ VE HESAPLAMA ŞEKİLLERİ .....	24
5.1 Bulk Numunenin Sanki-Statik Testi .....	24
5.1.1 Numune geometrisi .....	24
5.1.2 Test prosedürü ve sonuçları.....	25
5.2. Yapışma Bağlantısı Sanki-Statik Testi.....	26
6. MATERYAL VE METOD .....	31
6.1. Kullanılan Malzemeler.....	31
6.2. Bulk Testleri.....	32
6.3. Yapışma Bağlantısı Çekme Testleri.....	38
6.4.DCB Testi .....	41

6.5. ENF Testi .....	43
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	44
7.1.Deneysel Sonuçlar.....	44
7.1.1.Bulk testi.....	44
7.1.2.DCB test sonuçları.....	47
7.1.3.ENF Test sonuçları.....	49
7.2 Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları.....	51
8. TARTIŞMA .....	56
9. KAYNAKLAR .....	58





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklamalar
$a_0$	Başlangıç çatlak boyu
$a_e$	Eşdeğer çatlak boyu
$B$	Numunenin genişliği
$b$	Bağlantının genişliği
$C$	Komplyans
$C_0$	Başlangıç komplyansı
$\Delta$	Çatlak ucundaki kök dönme etkisi
$\delta$	Deplasman
$E_f$	Eğilme modülü
$E$	Plakanın young modülü
$G$	Yapıştırıcının kayma modülü
$G$	Kayma modülü
$G_{1c}$	Birinci mod kırılma enerjisi
$G_{11c}$	İkinci mod kırılma enerjisi
$K$	Eğilme momenti faktörü
$L$	Bindirme boyutu
$l$	Bindirme boyutu.
$M$	Eğilme momenti
$P_a$	Hasar yük.
$P$	Uygulanan yük
$\sigma_s$	Gerilmelerin toplamı
$\sigma_y$	Plakanın akma gerilmesi
$\sigma_t$	Doğrudan çekme gerilmesi
$T$	Plaka kalınlığı
$\tau_y$	Yapıştırıcı akma gerilmesi.
$\tau_r$	Kayma hasar mukavemeti
$t_a$	Yapıştırıcının kalınlığı
$t_s$	Plakanın kalınlığı
$\tau$	Kayma gerilmesi
$V$	Poisson oranı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	Kırılma enerjisinin ve gerilmelerin sıcaklığa göre gösterdiği değişim .....	3
Şekil 2.2.	Kırılma enerjisinin sıcaklıklara göre değişimi.....	5
Şekil 2.3.	Kırılma enerjisinin farklı metotlarla sıcaklıklara göre değişimi.....	5
Şekil 3.1.	Hasar tiplerinin bazı örnekleri .....	7
Şekil 3.2.	Mekanik bağlantıların yapıştırıcı bağlantılarıyla gerilme dağılımının karşılaştırılması .....	8
Şekil 3.3.	Farklı gerilmelerin tipleri ve standart tasarımı.....	8
Şekil 3.4.	Çatlak ilerleme türleri .....	9
Şekil 3.5.	Farklı yapıştırıcılarda sıcaklığın kayma gerilmesine etkisi.....	14
Şekil 3.6.	Rijit plakların tek taraflı bindirilmiş bağlantıdaki şekil değiştirmeleri .....	15
Şekil 3.7.	Bindirme bağlantılarında elastik plaka malzemesinin şekil değiştirmesi .....	15
Şekil 4.1.	Yapıştırıcıda gerilme dağılımı .....	18
Şekil 4.2.	Yapışma bağlantılarında yapıştırılan malzemenin deformasyonu...	19
Şekil 4.3.	SLJ deneysel sonuçlarının farklı malzemeler için hasar yükleri.....	20
Şekil 4.4.	Yükleme hasar ve bindirme boyutu (Adams hasar tahmin modeli)..	22

Şekil 4.5.	-40°C, 20°C, 90°C’de gerilme-şekil değiştirme.....	23
Şekil 4.6.	Farklı sıcaklıklarda yükleme hasarı ve yapışma tabakası kalınlığı...	23
Şekil 5.1.	EN ISO 527-2. çekme testi numune geometrisi (A) uzun numune, (B) kısa numune .....	25
Şekil 5.2.	Yapıştırıcının tipik çekme gerilmesi eğrisi ve mekanik özellikleri...	26
Şekil 5.3.	Tek bindirme yapışma bağlantı geometrisi.....	27
Şekil 5.4.	Çatlak proses bölgesi ve eşdeğer çatlak boyunun şematik gösterimi	28
Şekil 5.5.	P-δ eğrisinden R-eğrisinin elde edilmesi.....	30
Şekil 6.1.	West System® Gflex 655 yapıştırıcısı .....	31
Şekil 6.2.	Aseton.....	31
Şekil 6.3.	Bulk Kalıbı .....	32
Şekil 6.4.	Bulk kalıbının şematik gösterimi.....	32
Şekil 6.5.	Katkı Maddesi .....	33
Şekil 6.6.	Yapıştırıcı terazisi .....	33
Şekil 6.7.	Yapıştırıcı karıştırma makinesi.....	34
Şekil 6.8.	Kalıplama Süreci.....	34
Şekil 6.9.	Bastırma makinası içinde kalıbın bekletilmesi.....	34
Şekil 6.10.	Kür yapıştırıcı kaplaması .....	35
Şekil 6.11.	Standard EN ISO 527-.....	35
Şekil 6.12.	İmal edilmiş bulk numuneleri .....	35

Şekil 6.13.	Boşluk bulunan numunelerden biri .....	36
Şekil 6.14.	INSTRON üniversal test makinası .....	36
Şekil 6.15.	50°C 'de sıcaklıkta çekme testi.....	37
Şekil 6.16.	Testlerden önce ve sonra bulk numuneleri.....	37
Şekil 6.17.	Kum yüzey işleme makinesi.....	38
Şekil 6.18.	ASTM D 1002.....	38
Şekil 6.19.	SLJ test kalıbı .....	39
Şekil 6.20.	SLJ kalıbı şematik gösterimi .....	39
Şekil 6.21.	Numunelerin test edilmesi için son işlemler.....	40
Şekil 6.22.	INSTRON üniversal makinesinde SLJ testi.....	40
Şekil 6.23.	Testlerden elde edilen hasar tipleri .....	41
Şekil 6.24.	DCB numune boyutları .....	41
Şekil 6.25.	DCB numuneleri.....	42
Şekil 6.26.	INSTRON üniversal çekme makinesinde DCB testi .....	42
Şekil 6.27.	ENF testi .....	43
Şekil 6.28.	ENF test numuneleri boyutları .....	43
Şekil 7.1.	Epoksi-Gflex 655 oda sıcaklığı bulk testi sonuçları.....	44
Şekil 7.2.	Epoksi-Gflex 655 50°C sıcaklıkta bulk testi sonuçları.....	46
Şekil 7.3.	DCB testi sonuçları .....	47

Şekil 7.4.	DCB testi R eğrileri .....	48
Şekil 7.5.	ENF testi sonuçları .....	49
Şekil 7.6.	ENF testi R eğrileri .....	50
Şekil 7.7.	Modelin yapısı.....	ağ 51
Şekil 7.8.	SLJ testindeki Von-Mises gerilme dağılımı.....	51
Şekil 7.9.	Yapışma tabakasının bindirme boyutu boyunca gerilme dağılımı....	52
Şekil 7.10	SLJ testi yer değiştirme sonuçları .....	52
Şekil 7.11.	SLJ testi simülasyonu kuvvet yer-değiştirme grafiği .....	53
Şekil 7.12.	Kayma ve Sıyırılma gerilmelerinin bindirme boyutu boyunca dağılımı.....	53
Şekil 7.13.	Yapıştırma tabakasının bindirme boyutu boyunca Von-Mises gerilmesi dağılımı.....	54
Şekil 7.14.	50°C'DE SLJ testindeki eşdeğer(Von-Mises) gerilme dağılımı	54
Şekil 7.15.	50°C'de SLJ testi simülasyonu kuvvet yer-değiştirme grafiği	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. $T_g$ Sıcaklık derecesine göre kırılma enerjisinin değişimi.....	3
Çizelge 3.1. Bazı yapıştırıcıların mekanik özellikleri.....	11
Çizelge 3.2. Sık kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 7.1. Bulk testi sonucunda Gflex 655 tipi yapıştırıcının mekanik özellikleri.....	44
Çizelge 7.2. ABAQUS sonlu elemanlar analizi için kullanılacak veriler .....	45
Çizelge 7.3. Epoksi-Gflex 655 50°C’de mekanik özellikleri.....	46

## 1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv sektörü, senelerce uzay ve havacılık sektöründe uygulanan yapıştırıcı bağlantılarını uygulamaya başlamıştır. Bilindiği gibi yapıştırıcılar yük taşıyan yapılar için kullanılmaktadır. Otomotiv sektörünün en önemli amaçlarından biri, daha az maliyetle daha hafif taşıtlar üretmektir. Dolayısıyla köpük, alüminyum, kompozit gibi malzemelerin kullanımı oldukça yaygındır. Otomotivde yaygın olan birleştirme tekniği nokta kaynağıdır. Nokta kaynağı yapılırken özellikle alüminyum parçalar için alümina tabakasının aşılıp kaynak yapılmasında zorluklar bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin kaynağı mümkün olmaz ve kaynak çeliği nemden korumak için oluşturulan tabakaya zarar vermektedir. O yüzden kullanılması gereken en uygun, en az maliyetli ve verimli birleştirme tekniği, yapıştırıcılardır. Yapıştırıcıların yeterli performansta olması gerekmektedir. Yağlı çelik yüzeylerini yapıştırmak için hızlı ve seri yapıştırıcılar geliştirilmiştir. Dinamik yüklemelere dayanıklı yapıştırıcılar geliştirilmiş, dolayısıyla yapıştırıcıların kullanımındaki en önemli problemlerden biri çözülmüştür. Bundan dolayı yapıştırıcılar otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yapıştırıcılar dört kategori altında toplanır; dolgu yapıştırıcıları, düşük mukavemetli, orta mukavemetli ve yüksek mukavemetli yapıştırıcılar. Bu çalışmada yüksek mukavemetli yapıştırıcılar kullanılmıştır. Yüksek mukavemetli olan yapıştırıcılar yük taşıyan yapıların birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Otomotivde ise taşıt gövdesinde kullanımı giderek artmaktadır. Buna bağlı statik ve dinamik yüklemelere dayanacak yapıştırıcıların ve tasarımların geliştirilmesi gerekmektedir. Otomotivde yapıştırıcıların kullanım oranının artması için ilk adım, yapıştırıcı bağlantılarının maruz kaldığı tüm etkilerin laboratuvar ortamında test edilip analizlerin yapılması gereklidir ki tüm davranışları ile ilgili bir bilgi birikimi ortaya konması gerekir (Banea ve ark. 2011). Bu çalışmada epoksi Gflex655 yapıştırıcısının 50°C ve oda sıcaklığında kohezif özellikleri incelenmiş ve standartlara göre alüminyum 6015 türünde iki plaka yapıştırılıp aynı sıcaklıklarda test edilip sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Yapıştırıcı bağlantılarının en az üç boyutu mevcuttur:

- Yapıştırılan malzeme
- Kullanılan yapıştırıcı
- Termik şartlar
- Bağlantı şekli

Dolayısıyla yapılan çalışmaların çoğu yukarıda sayılan faktörler değiştirilerek yapılmıştır. Bu faktörler alana ve ihtiyaca göre değiştirilmektedir. Quini ve Marinucci (2012) tarafından yapılan çalışmada poliüretan yapısal yapıştırıcıları ve RTM, SMC ve ABS kaplama sistemleri uygulanarak, termoplastik kompozitler yapıştırılmıştır ve -40, 25, 80, 120, 177°C sıcaklıklarda, 20 dakika ve 500 saat bekletme sürelerinde kayma özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda poliüretan yapıştırıcının -40 ve -120°C sıcaklıklarda bağlantı bölgesinde hasar görülmemiş ve güzel bir performansta olduğu tespit edilmiştir. Hâlbuki 177°C sıcaklıkta kayma mukavemeti oldukça düşüktür dolayısıyla yapıştırıcının bu sıcaklıkta kullanılması tavsiye edilmez. Ayrıca 500saat/90°C ve 20dakika/177°C şartlarında da kayma mukavemeti düşmektedir fakat bunun nedeni kompozitteki polemirik zincirin kırılmasıdır.

Hu ve ark. (2013) çalışmalarında otomotiv sektöründe kullanılan tek taraflı bindirme bağlantısının statik mukavemetini kritik sıcaklıklarda incelenmişlerdir. Üç farklı yapıştırıcı maddesi kullanarak sanki-statik kayma mukavemeti 80, 25, -30°C sıcaklıklarda test edilmiştir. Sonuçları analiz etmek için MATLAB® programının üç boyutlu yüzey metodu kullanılmıştır. Ayrıca hasar bölgeleri ve mekanizmasını gözlemlemek için elektron mikroskobu kullanılmıştır. Sonuç olarak elde edilen verilerden, yapıştırıcıların kayma mukavemeti aşırı yüksek sıcaklıklardan ve aşırı düşük sıcaklıklardan oldukça etkilenmektedir fakat düşük sıcaklıklarda daha fazla etkilenmektedir. P- $\delta$  eğrileri karşılaştırıldığında, cam dönüşüm sıcaklığı düşük olan yapıştırıcıların sıcaklık değişiminden daha fazla etkilendiği görünüyor.

Elektronik mikroskoptan elde edilen fotoğraflardan kırılma modlarının sıcaklığa göre değiştiği görülmüştür (Banea ve ark. 2010). Bu çalışmada yapıştırıcıların (OS, 100, 150, 200°C) sıcaklıklarda birinci kırılma modu enerjisi ( $G_{Ic}$ ) incelenmiştir. DCB testi

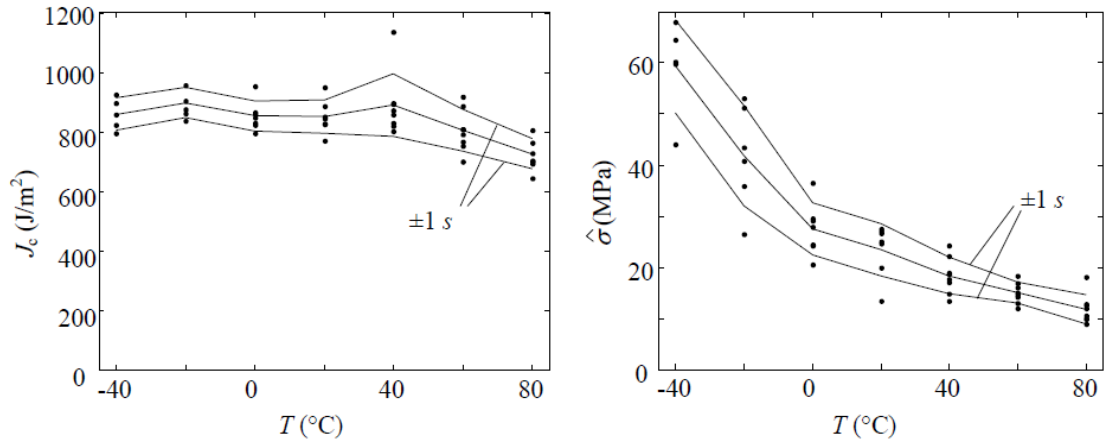


uygulanarak bağlantıların kırılma enerjileri bulunduğundan sonra sonuçlar tabloda görüldüğü gibidir. Çalışmada kullanılan yapıştırıcının  $T_g$  (cam dönüşüm sıcaklığı),  $160^\circ\text{C}$  kırılma enerjisi aşağı yukarı  $T_g^\circ\text{C}$  derecesine ulaşana kadar sabit kalmaktadır ve sonrasında düşüş göstermektedir.

**Çizelge 2.1.**  $T_g$  Sıcaklık derecesine göre kırılma enerjisinin değişimi (Banea ve ark. 2010)

RT	$0.47 \pm 0.03$
$100^\circ\text{C}$	$0.52 \pm 0.04$
$150^\circ\text{C}$	$0.43 \pm 0.06$
$200^\circ\text{C}$	$0.08 \pm 0.01$

Biel ve Carlberger (2007) çalışmasında  $T_g$ 'si  $90^\circ\text{C}$  olan bir epoksi yapıştırıcı kullanmıştır. Uygulanan sıcaklıklar  $-40^\circ\text{C}$ 'ten  $+80^\circ\text{C}$  dereceleri arasında değişmektedir. İstenen gerilme ve kırılma sonuçları aşağıdaki resimde karşılaştırılmıştır.

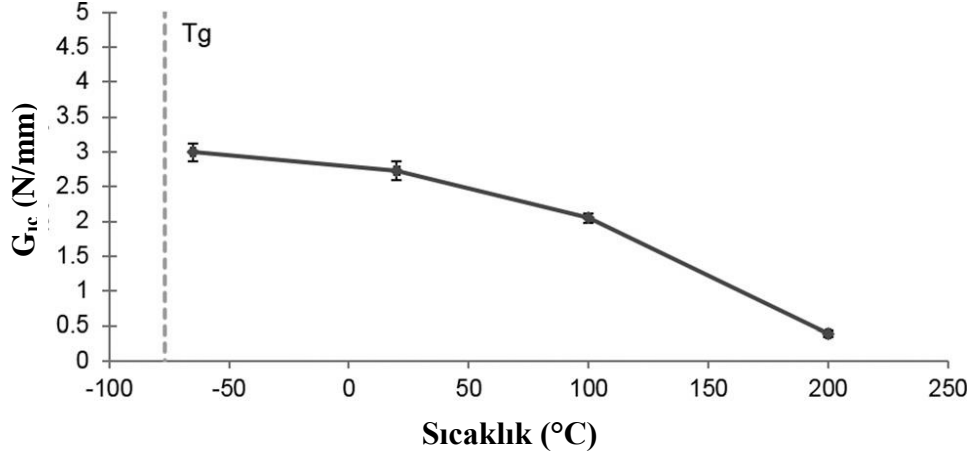


**Şekil 2.1.** Kırılma enerjisinin ve gerilmelerin sıcaklığa göre gösterdiği değişim (Biel ve Carlberger 2007).

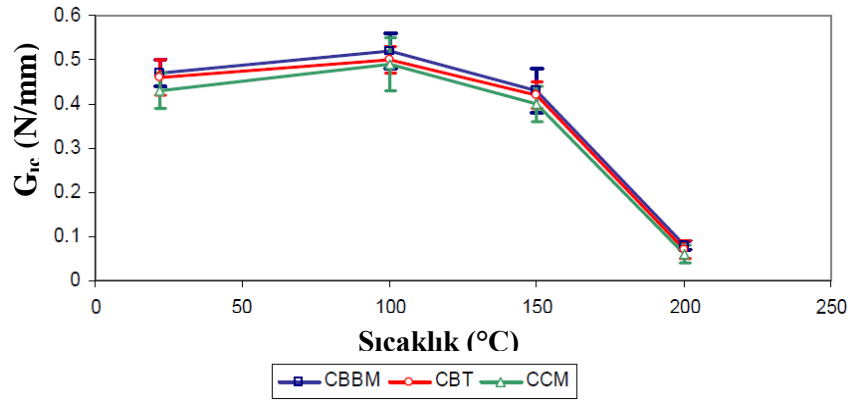
Soldaki tabloda kırılma enerjisi pek büyük bir değişim göstermediği görünüyor çünkü epoksinin  $T_g^\circ\text{C}$  derecesine ulaşılmamıştır ve yaklaşırken de ufak bir düşüş olmuştur, hâlbuki sağdaki tabloda gerilmeler  $-40^\circ\text{C}$ 'ten  $80^\circ\text{C}$  derecesine kadar büyük bir değişim göstermiştir ki sıcaklık yükselince gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Banea ve Da

silva (2010) çalışmasında epoksi ve poliüretan tipi iki farklı yapıştırıcıyı kullanarak, sıcaklığa göre kayma ve sıyırma(peel) davranışlarını BULK, TAST, SLJ testlerini uygulayarak incelemiştir. Yapıştırıcıların gösterdiği performansların her birinin avantajları ve dezavantajları görülmüştür. Cam dönüşüm sıcaklığının( $T_g$ )  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$  derecelerdeki etkisi görülmüştür. Dolayısıyla otomotiv mühendisliğinde kullanılan yapıştırıcı seçilirken sıcaklığı göz önüne alarak seçim yapılması tavsiye edilmektedir. Marques ve ark (2016) çalışmasında incelenen yapıştırıcı, RTV 106 silikon cam dönüşüm sıcaklığını ( $T_g$ ) bulmak için özel olarak geliştirmiş bir aparat kullanılmıştır.  $T_g$ ,  $78^{\circ}\text{C}$  olarak bulunmuştur. Bulk özellikleri Banea tarafından yapılan önceki çalışmalarından farklı sıcaklıklarda elastik özellikleri alınmıştır. Sonuç olarak silikon RTV 106,  $-65^{\circ}\text{C}$  ile  $100^{\circ}\text{C}$  arasında büyük bir young modülü yükselişi görülmüştür. Bu da yapıştırıcının  $T_g$  değerine yaklaşıldığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca sadece young modülü değil, çekme gerilmesi de büyük bir yükseliş göstermiştir. SLJ testi uygulanarak, geçmiş testlerden toplanmış tüm veriler kullanarak analitik tahminler yapıldığında, testlerle aynı çizgide olduğu görülmüştür.

DCB testleri de BULK ve SLJ testlerle aynı uyumluluğu göstermiştir. Bulunan birinci mod kırılma enerjisine göre  $G_{IC}$  yükseliş göstermiş, dolayısıyla RTV 106 silikon yapıştırıcısının mekanik özellikleri sıcaklığa hassasiyet göstermiştir. Buna göre düşük sıcaklığı olan ortamlarda kullanılabilir. Fakat eğer yüksek sıcaklıklarda aynı performansta davranması isteniyorsa, yüksek sıcaklığa dayanan rijit yapıştırıcılarla karıştırılarak daha geniş bir sıcaklık aralığında hep iyi bir bağlantı davranışı elde edilmelidir. Benzer çalışmalar yaygın olarak bulunmakla birlikte bu çalışmalardan sıcaklığın yapıştırıcıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin ne kadar önemli olduğunu ispat etmektedir. Bazıları şekil 2.2’de olduğu gibi düşük sıcaklıkta bazıları ise şekil 2.3’de olduğu gibi yüksek sıcaklıkta güzel performans göstermektedir. Fakat şu ana kadar hem yüksek sıcaklıkta hem düşük sıcaklıkta iyi davranan bir yapıştırıcı bulunmamaktadır. Bu yüzden otomotiv sektöründe genelde karışık içerikte yapıştırıcıların kullanılması tercih edilmektedir.



Şekil 2.2. Kırılma enerjisinin sıcaklıklara göre değişimi (Banea ve Da Silva 2010)

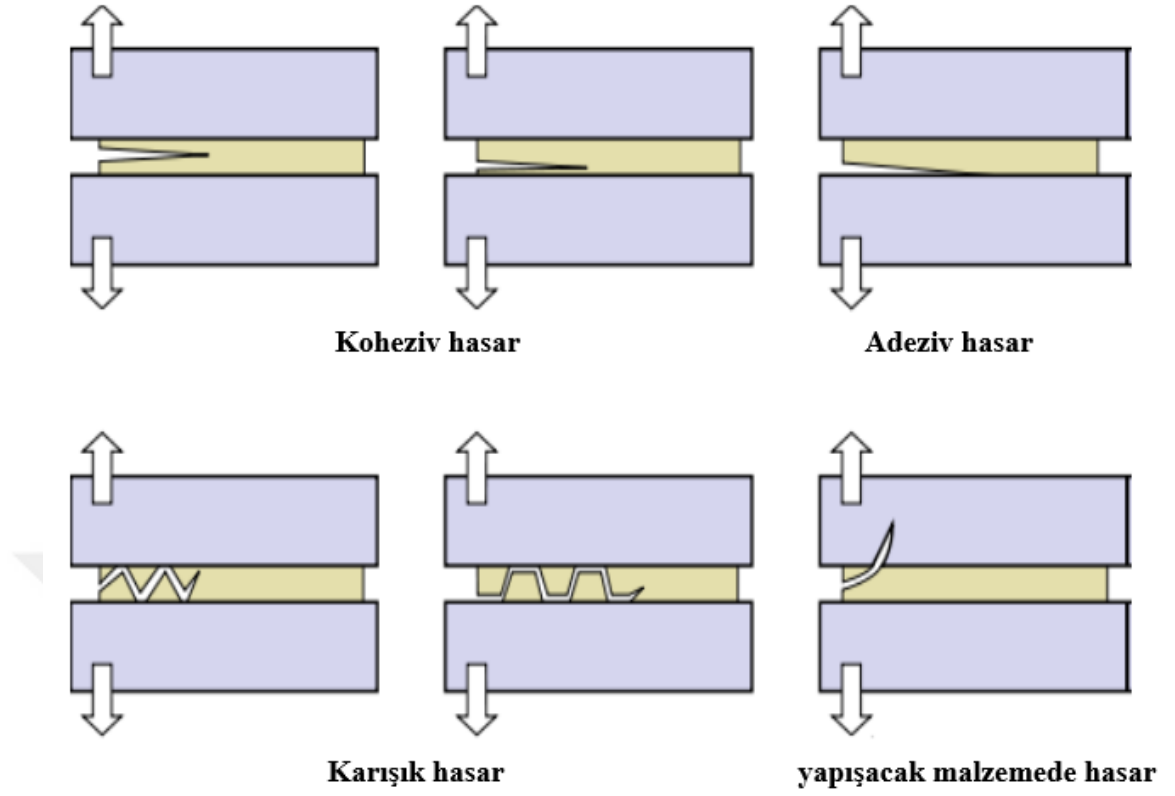


Şekil 2.3. Kırılma enerjisinin farklı metotlarla sıcaklıklara göre değişimi (Banea ve Da Silva 2010)

Bizim çalışmamızda diğer çalışmalardan farklı olarak, kullanılan yapıştırıcı böyle bir çalışma için daha önce kullanılmamıştır. Bahsi geçen çalışmalarda olduğu gibi yapıştırıcının mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklarda incelenecektir. Bilindiği gibi otomotiv parçaları aynı yüklere maruz değildir. Özellikle mekaniksel ve fiziksel yükler, çarpışma yüklerinden vibrasyonlara kadar değişmektedir. Dolayısıyla yapıştırılacak parçanın bağlantısı ona göre tasarlanmalıdır. Genelde termal şartlar parçadan parçaya değişim gösterebilir fakat bizim modelimiz tüm otomotiv parçaları için geçerli olduğundan, bu çalışmada daha önce incelenmemiş epoksi-Gflex 655'in yüksek sıcaklıklarda mekanik davranışları incelenmiştir. Daha doğrusu otomotiv sektöründe kullanılabilirliği ve bunun hangi şartlar altında geçerli olduğuna cevap verilmeye çalışılmıştır.

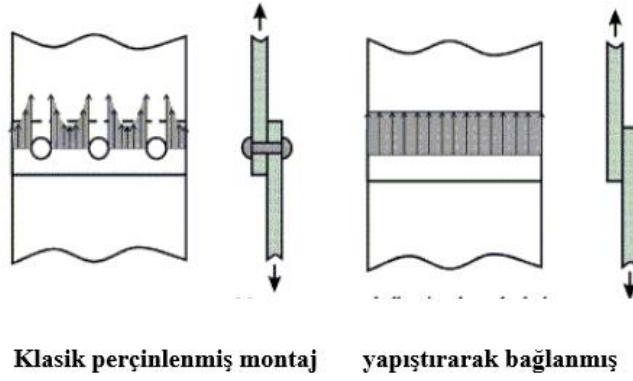
### **3. YAPIŞTIRICILAR VE YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRME ŞEKİLLERİ**

Yapıştırıcıların tanımı seçilen yaklaŐıma göre değiştiği halde, genel olarak yapıştırıcılar Şöyle tanımlanabilir; yapıştırıcı iki parŐa arasına uygulandığında o iki parŐayı taŐırken de parŐaların ağırlığına dayanması gereklidir. Böyle bir özelliğe sahip tüm maddeler yapıŐtırıcıdır, ama ők büyük yükleri taŐıyabilenlere ‘yapı yapıştırıcıları’ denir ve o yapıştırıcıların kayma mukavemeti 5 MPa (poliüretan) , -50 MPa (Epoksi) arasında yer almaktadır. Yapıştırıcı bağlantılarının temel yapısı üç tabakadan oluşmaktadır. Yapıştırıcı, yapıŐacak malzemeler ve bu malzemeler ile yapıştırıcı arasındaki tabaka. Yapıştırıcı bağlantı geometrisi derinlemesine analiz edildiğinde yapıştırıcı tabakası ile malzemenin aralarında üçüncü bir arayüz tabakası yer almaktadır. Yapıştırıcı bağlantılarında oluşan hasarları anlamak için kohezyonla adezyon arasındaki farkı anlamak gerekmektedir. İki malzemenin arasındaki intermoleküler güçler birbirlerini őkettiĐi zaman, adezyon kuvvet oluşmaktadır. Kohezyonda ise sadece malzemelerin birinde intermoleküler güç oluşmaktadır. Yapıştırılacak bağlantıyı oluŐtururken, malzemelerin üzerine kolayca sürülebilmesi için yapıştırıcı sıvı halde olmalıdır, sonra kürleyip sertleŐmesiyle yükleri taŐımaya başlamaktadır. Sonuçta bağlantının tasarımı ve sınır Şartları, mukavemeti ve dayanıklılığına karar verecektir.



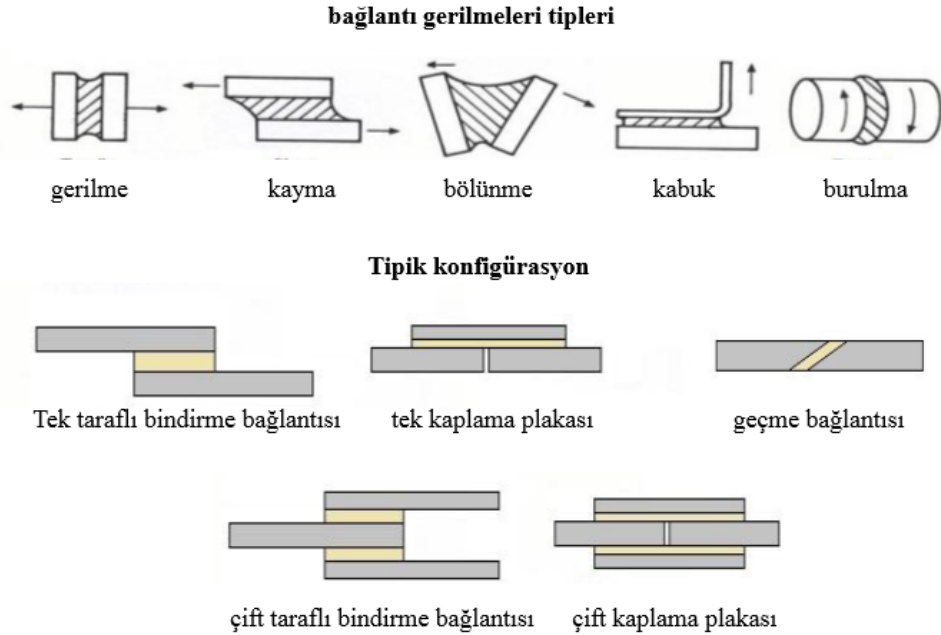
**Şekil 3.1.** Hasar tiplerinin bazı örnekleri (Mata ve ark. 2008).

Temel olarak tek taraflı bindirme bağlantısının çalışma prensibini anlatarak, yapıştırma bağlama tekniği ile diğer mekanik bağlama teknikleriyle bir karşılaştırma yapılacaktır ve neden önemli olduğu ve yaygınlaşmasının nedenleri incelenecektir. Yapıştırma tekniğinin en önemli avantajlarından biri gerilme dağılımıdır, ayrıca aynı yükleri taşıyarak, daha hafif olduğundan ağırlık kazancı sağlanmaktadır. Bunun neticesinde otomotiv üreticileri için emisyon değerleri ve yakıt tüketim değerlerini olumlu yönde etkilendiğinden önemli bir konudur.



**Şekil 3.2.** Mekanik bağlantıların yapıştırıcı bağlantılarıyla gerilme dağılımının karşılaştırılması (Mata ve ark. 2008).

Ayrıca yapıştırıcılar termal genleşmesi farklı olan malzemeleri birbirlerine yapıştırma bilirliliği ve ince plakaları bağlaya bilirliliği, hafif ve dayanıklı yapıların oluşturulmasına da imkân vermektedir. Sayılan avantajlardan ötürü yapıştırıcılar günümüzde otomotivden inşaatla pek çok sanayi sektöründe sıkça kullanılmaktadır.



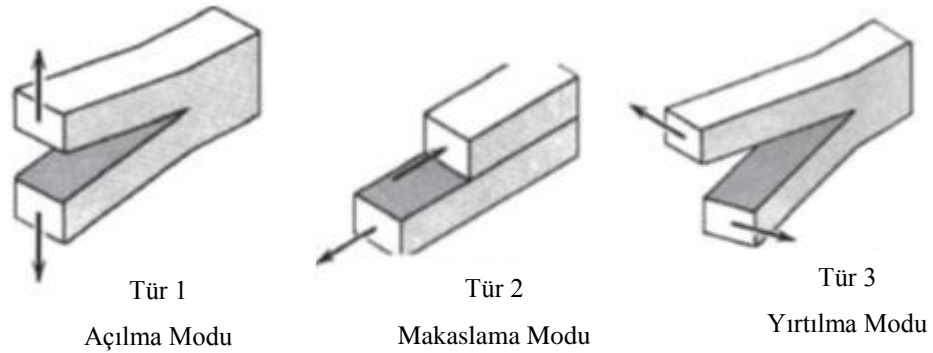
**Şekil 3.3.** Farklı gerilmelerin tipleri ve standart tasarımları (Mata ve ark. 2008).

Hâlbuki yapıştırıcıların bazı dezavantajları vardır, o da bu teknolojinin araştırılmaya devam edilmesi açısından bir sebeptir. İlk olarak yapıştırıcılar nem ve sıcaklığın çok

yüksek olduğu durumlarda dayanıklılıkları diğer mekanik birleştirme teknikline kıyasla düşüktür. Tasarım da kaçınılması gereken bazı hususlar vardır. Örneğin bölünme, kabuk ve gerilme.

### **Kırılma Modları;**

Kırılma tokluğu, kırılma mekanizmasında çatlak oluşumu ve gelişimi gibi kırılma direncine karşı kaymanın direncini gösteren başlıca özelliklerden biridir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, onun çatlak gelişimine karşı direncini veya yeni yüzey alanları oluşturmak için gerekli kırılma enerjisi tüketim hızını ifade etmektedir. Bu özellik, kaya mühendisliğinde özellikle kayaçların parçalanma ve çatlatma uygulamalarında önemli ve yararlı bir parametre olarak gösterilmektedir. (Şengün ve Altındağ 2010).



**Şekil 3.4.** Çatlak ilerleme türleri (Şengün ve Altındağ 2010).

### **3.1 Yapıştırıcı Bağlantı Özellikleri**

Hangi yapıştırıcıyı kullanılacağına seçilmesinin kolaylaştırılması için var olan tüm yapıştırıcılar kategorilere göre ayrılmıştır: İlk olarak kökenine göre doğal ve sentetik yapıştırıcılar bulunmaktadır. Doğal yapıştırıcılar starch, kazein tutkal, doğal kauçuk gibi doğal kaynaklardan ayıklanır. Sentetik yapıştırıcılar, sanayi tarafından tasarlanmış ve yapılmış, polimerlerden oluşmaktadır. Polimerler kürlenince moleküller arasındaki yapışma kuvvetine göre üçe ayrılmaktadır. Termoplastikler, termosetler ve kauçuklar, aralarındaki en önemli davranış özellikleri cam dönüşüm sıcaklığına dayanmaktadır. ( $T_g$  °C)

Yapıştırıcıların kullanımına göre sınıflandırılır ise;

- Yapısal yapıştırıcılar
- Yapısal olmayan yapıştırıcılar

Yapısal yapıştırıcılarda genelde iki türlü termoset reçine kullanılmaktadır ve mukavemeti diğer yapısal olmayanlardan daha yüksektir. Diğer taraftan yapısal olmayan yapıştırıcılar kullanımına göre sınıflandırılmaktadır. Son olarak diğer yapıştırıcılar kimyasal yapısına (epoksi, silikon), fiziksel şekli (tek tüplü, çift tüplü), kütleme zamanına göre sınıflandırmalar mevcuttur.

### **3.1.1 Yapısal yapıştırıcılar**

Bu çalışma yapısal yapıştırıcılardan özel olarak bahsetmek gerektiğinden, özet olarak bir paragraf yazıldı. Yapısal yapıştırıcılar çapraz bağlanmış termoset polimerlerdir, aynı zamanda termoplastik olabildiği söylenmektedir. Yapısal sayılabilmesi için kayma mukavemeti 05-50 MPa arasında olması gerekmektedir. İyi yapılmış bir tek taraflı bindirme bağlantısında yapışma bölgesinden kırılma olması beklenmektedir daha doğrusu kohezif bir şekilde. Genel olarak yapıştırılan malzeme yapıştırıcıdan daha rijit seçilmektedir ve herhangi bir yük altında gösterdiği şekil değiştirmeler yapıştırıcı tarafından olması beklenmektedir. Bunun neticesinde bir tek taraflı bindirme bağlantısının mukavemeti yapıştırıcının mukavemetine tamamen bağlıdır. Bağlantı mukavemetiyle yapıştırıcı mukavemeti arasındaki farkı anlamak gerekmektedir. Esnek bir yapıştırıcı normalde rijit bir yapıştırıcıdan daha zayıftır ama tek taraflı bindirme bağlantısı için uygulandığında esnek yapıştırıcı esnekliği sayesinde bağlantı boyunca gerilmeleri dağıttığı için bağlantı boyunca gerilmelerden etkilenerek plastik şekil değiştirme göstermektedir. Sonuç olarak esnek yapıştırıcıların bağlantıları diğer rijit yapıştırıcıların bağlantılarından daha mukavemettir. Bunu dikkate alarak her bir uygulama için optimum yapıştırıcıyı seçebilmek için özelliklerini bilmekte çok fayda vardır. En yaygın yapıştırıcıların mekanik özellikleri çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.



**Çizelge 3.1.** Bazı yapıştırıcıların mekanik özellikleri (Mata ve ark. 2008)

Yapıştırıcı tipi	Young Modülü (GPa)	Kayma modülü (GPa)	Gerilme direnci (MPa)	Yoğunluk (MPa)	Uzama (%)
Epoksi	2,5	1,2	60	$1,15 \cdot 10^3$	4
Poliüretan	0,02	0,008	40	$1,18 \cdot 10^3$	650
Phenolic	3,5	1,4	50	$1,4 \cdot 10^3$	1
Silikon	0,001-0,005	0,004	10	$0,98 \cdot 10^3$	700

➤ **Epoksi (EP):**

**Çalışma sıcaklığı:** -40°C / 100°C tek tüplü için, -40°C / 180°C çift tüp epoksiler.

**Fiziksel şekli:** Tek tüplü, çift tüplü.

**Avantajları:** Yüksek mukavemet, mükemmel dayanıklılık, korozyon dayanıklılığı ve boyutlar stabilite, iyi dielektrik özellikleri, düşük büzülme.

**Dezavantajları:** Boşlukların oluşması ve çift tüplülerin yavaş kurlenmesi, tek tüplü olanların yüksek kür sıcaklığı.

**Uygulamalar:** Havacılık ve uzay, otomotiv, ulaşım.

➤ **Poliüretan:**

**Çalışma sıcaklığı:** -40°C / 80°C.

**Fiziksel şekli:** Tek tüplü, çift tüplü.

**Avantajları:** aşınmaya karşı mükemmel dayanıklılık, ıslatma kabiliyeti ve düşük sıcaklıklarda mükemmel mukavemet ve dayanıklılık.

**Dezavantajları:** Neme ve sıcaklığa karşı dayanıksızlık.

**Uygulamalar:** Otomotiv sanayi, kryojenik uygulamalar, ayakkabı sanayi.

➤ **Fenolik:**

**Çalışma sıcaklığı:** -40°C / 160°C.

**Fiziksel şekli:** Nitril, polivinil, neoprene-fenolik.

**Avantajları:** Yüksek sertlik, mükemmel termal kararlılık ve dielektrik özellikleri.

**Dezavantajları:** Kırılgan.

**Uygulamalar:** Otomotiv parçaları, kablolama cihazları, ahşap sanayi.

➤ **Silikon:**

**Çalışma sıcaklığı:** -70°C / 250°C.

**Avantajları:** Sıcaklık aralığı, elektriksel özellikleri, çevresel kararlılık.

**Dezavantajları:** Düşük mukavemet, zımparalamaya karşı zayıf, yüksek maliyet.

**Uygulamalar:** Gıda proses ekipmanları, cam montaj ve elektrik yalıtımı.

Yukarıda gösterilen değerler ve özellikler, genel fikir sahibi olunması açısından gösterildi, ama liste daha büyük ve geniştir, hangi yapıştırıcının kullanılacağını seçerken genel olarak tüm sınıfları ve genel özelliklerinin bilinmesinde fayda vardır. Göz önüne alınması gereken hususların ‘malzeme türü, ön-işlem, maliyet’ ne kadar fazla ise o kadar doğru yapıştırıcıyı seçmek zorlaşmaktadır. Bunun neticesinde ne kadar tecrübe kazanılırsa o kadar optimum yapıştırıcının seçilmesi kolaylaşmaktadır.

### **3.1.2 Yapıştırılan malzeme özellikleri**

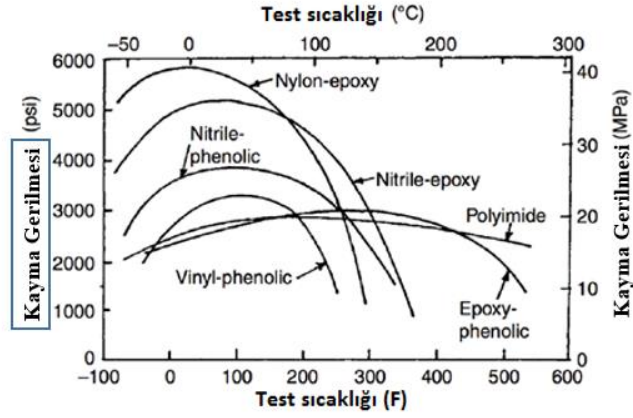
Daha önceden söylendiği gibi iyi bir şekilde üretilmiş bir tek taraflı bindirme bağlantısında, hasar yapıştırıcı bölgesinde oluşmaktadır. Fakat bazı durumlarda gerilmelerin absorbe edilmesi istendiği için, malzemenin şekil değiştirmesinin fazla olması gerekmektedir bu yüzden esnek bir malzeme kullanılabilir. Ayrıca bindirme bağlantısı yüzeyi fazla olduğu durumlarda bağlantı yüksek bir mukavemet göstermektedir. Neticede plastik deformasyon bağlantıda oluşmadan önce malzemede oluşmaya başlar, o yüzden bağlantının ve malzemenin mukavemeti birbirlerine bağlı olmaktadır. Tablo 3.2’de genel bir tarama yapıldı ve genel olarak bindirme bağlantıları için kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri verildi.

**Çizelge 3.2.** Sık kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri (Mata ve ark. 2008)

Malzeme	Young modulu (GPa)	Kayma modulu (GPa)	Çekme gerilmesi (MPa)	Elongasyon (%)	Yoğunluk
Hafif çelik	205	80	370	15	7.9
Sert çelik	200	80	650	25	7.8
Alüminyum	70	25	275	12	2.7
Karbon fiber kompozit (Std. CF)	70	5	600	0.85	1.6

### 3.1.3 Yapıştırıcıların termal özellikleri

Yapıştırıcılar sıcaklığa hassasiyet gösterdiğinden sıcaklık, bindirme bağlantılarını etkiler. Kürlenirken ve kürlendikten sonra sıcaklığın etkisi olmuştur. Dolayısıyla yapıştırıcının  $T_g$ °C'sini (cam dönüşüm sıcaklığı) bilmek ve onu aşmamakta fayda vardır. Yapıştırıcıların kürlenmesi için değişik prosesler bulunmakta, malum ki tüm yapıştırıcılar aynı sıcaklıkta kürlenmemektedir ve bu yöntem yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Yapıştırıcı kürlendikten sonra kullanıma hazır hale gelmektedir bunun için bu aşamada termal özellikler önemlidir. Daha önce söylendiği gibi dikkate alınması gereken en önemli husus bu konuda yapıştırıcının  $T_g$ 'sidir. Düşük sıcaklıklarda yapıştırıcıların çoğu cam halde kalmaktadır (glassy state), kırılkan ve esnek olmamaktadır. Fakat  $T_g$ °C derecesine yaklaşınca kauçuk gibi esnek olmaya başlar, neticede yapılarda kullanılmaz olur, fakat bazı durumlarda yapıştırıcının kauçuk haldeki durumu istenebilir ve kullanılabilir. Yapıştırıcıların her birinin  $T_g$ °C'si farklı olabilir ama hepsi sıcaklıktan oldukça etkilenmektedir ve bu şekil 3.5'den görülmektedir.



**Şekil 3.5.** Farklı yapıştırıcılarda sıcaklığın kayma gerilmelerine etkisi (Mata ve ark. 2008).

Kristal erime sıcaklığı, ‘cam dönüşüm sıcaklığı’  $T_g$ °C kadar önemli değildir. Bunun nedeni yapıştırıcıların çoğunun yapısı amorf olduğu için ve moleküler düzeni az olduğundan.(Mata ve ark. 2008)

### 3.2 Tek Bindirme Bağlantı Analizi

Yapıştırılmış bağlantıların hasar mekaniğini anlayarak daha mukavemetli ve sağlam bağlantıları elde edilebilir. Onun için yapıştırılmış bağlantıları analiz etmek için ve gerilmelerin dağılımını tahmin edebilmek için hem analitik hem numerik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

#### 3.2.1 Analitik analiz

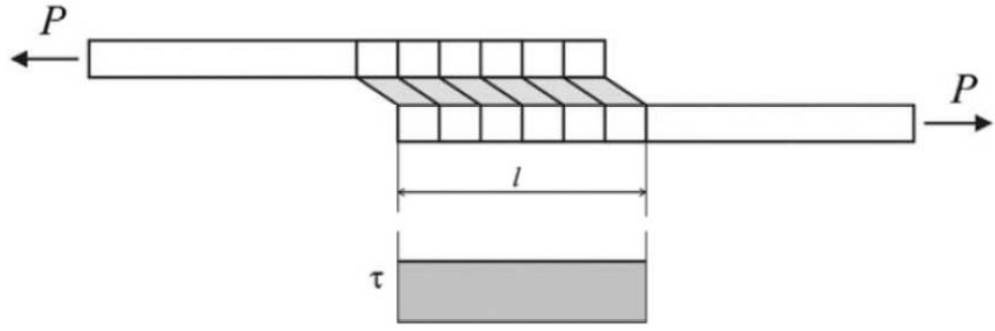
Temel lineer analitik analiz;

En ortak ve Adams tarafından geliştirilmiş model, yapıştırılacak malzeme rijit, şekil değiştirmeyen, yapıştırıcının ise kayma gerilmesi sabit kabul edilmektedir. Neticede yapıştırıcının kayma gerilmesi, formül (3.1) ile verilmiştir.

P: Uygulanan yük.

B: Numunenin genişliği.

L: Bindirme boyutu.

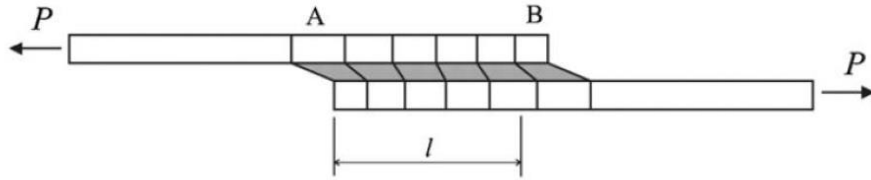


**Şekil 3.6.** Rijit plakların tek taraflı bindirilmiş bağlantıdaki şekil değiştirmeleri (Luis Fernando ve Da Silva 2014).

$$\tau = \frac{P}{l.b} \quad (3.1)$$

### Volkersen analizi;

Volkersen analizi diferansiyel kayma kavramı, malzemenin şekil değiştirmeyi netice olarak kabul ediyor. Ayrıca yapışma bağlantısının hiç bir eğilme momentinin olmadığını farz ediyor ki malzemeler saf gerilim altındadır.



**Şekil 3.7.** Bindirme bağlantılarında elastik plaka malzemesinin şekil değiştirmesi (Luis Fernando ve Da Silva 2014).

Şekil 3.7'de ki A noktasında en yüksek gerilmeler oluşmaktadır ve en düşük gerilmeler zıt ucunda, B noktasında oluşmaktadır. Bindirme boyunca oluşan şekil değiştirmenin azalması uniform olmayan bir gerilme dağılımı oluşturmaktadır. Formül (3.2) yapıştırıcının kayma gerilmesini vermektedir.

$$P = \tau_r \frac{2bl \sinh(\lambda l)}{\lambda L [1 + \cosh(\lambda l)]} \quad (3.2)$$

$$\lambda^2 = \frac{G}{t_a} \left( \frac{2}{Et_s} \right) \quad (3.3)$$

Burada;  $b$ : bağlantının genişliği,  $t_a$  yapıştırıcının kalınlığı,  $t_s$  plakanın kalınlığı,  $\tau_r$  kayma hasar mukavemeti,  $G$  yapıştırıcının kayma modülü,  $E$  plakanın young modülü. (Luis Fernando ve Da Silva 2014)

### 3.2.2 Numerik analizi

Sonlu Elemanlar Metodu;

Çözülmesi uzun zaman alan karmaşık problemlerin, daha basit ve kısa zamanda çözmek için bu problemlere eşdeğer ancak daha basit hale getirilmiş problemlerin çözüme gidilmesi sonlu elemanlar metodunun temelindeki fikirdir. Genellikle, basitleştirmeye gidilmesi sonucunda doğru sonuç yerine, yaklaşık bir sonuç bulunmaktadır. Günümüzde, sonlu elemanlar metodlarının bilgisayarlarda uygulanması sonucunda hemen her problem istenilen ölçüler arasında yaklaşık sonuçlar elde edilmektedir. Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin çok sayıda sonlu ve birbirine bağlı elemanlardan oluşmaktadır. Çözüme gidilirken, sonlu elemanların hepsi çeşitli teoriler kullanılarak, sınır koşul ve denge denklemlerin tanımlanmasıyla yaklaşık sonuçlar bulunmaktadır.

Sonlu Elemanlar Metodun kısa tarihi;

Günümüzde sonlu elemanlar metodu olarak bilinen çözüm metodlarının arkasında bulunan temel fikirler yüzyıllar öncesine dayanmaktadır. Örneğin, yüzyıllar öncesinde bilim adamları çemberin çevre uzunluğunu bulmak için çemberin etrafından poligonlar çizerek bulmaktaydılar. Köşe sayısı arttırılan poligon, sonuca daha fazla yaklaştırmaktaydı. Yakın tarihimizde, sonlu elemanlar metoduna benzer bir yöntem Courant tarafından 1943' te ilk kez ortaya atılmıştır. Bu yöntemde, üçgensel bölgeler üzerinde parçasal sürekli fonksiyonlar tanımlanmaktadır. Günümüzde bilinen sonlu elemanlar metodu ise, 1956 yılında Turner, Clough, Martin ve Top tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada, perçin bağlantılı profil ve üçgensel iç gerilmeli tabaka şeklindeki sonlu elemanların bir uçağın analizinde kullanımı ele alınmıştır. Çağımızın

en büyük teknolojik gelişimi olarak bilinen bilgisayar teknolojisinin gelişmesi, bu yöntemle çok büyük katkı sağlamıştır. Günümüzün bilgisayarları, çözülmesi aylar bulan problemleri, en kısa zamanda çözmekte ve gerçek sonuçlara çok yakın yaklaşık sonuçlar verebilmektedirler.

Abaqus/CAE Sonlu Elemanlar Paket Programı;

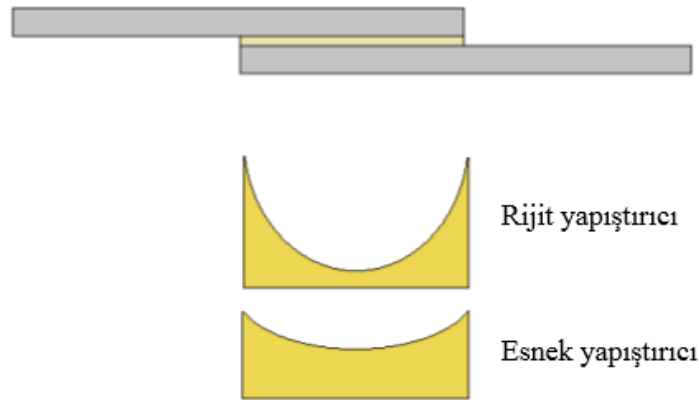
Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi karmaşık ve çözülmesi uzun zaman alan problemlerin bilgisayarlarda çözülmesi hem zaman tasarrufundan hem de işlemin daha doğru sonuçlar vermesi bakımından çok önemlidir. Bilgisayarlarda, sonlu eleman metodu çeşitli paket programlar vasıtasıyla basit bir şekilde modelleme yapılmakta, daha sonra bu modeller küçük sonlu elemanlara bölünerek analizler yapılmaktadır. Günümüzde, SEM uygulamaları için birçok yazılım geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları, Abaqus®, MSC Nastran&Patran®, Ansys®'dir. Bazı SEM yazılımları kendi bünyesinde modelleme paketleri bulundurmasına karşı çoğunlukla karmaşık geometrilerin modellenmesi uzun zaman almakta, bazen ise hiç yapılamamaktadır. Bundan dolayı, iki ve üç boyutlu problemlerin modellenmesi amacıyla çeşitli paket programlar hazırlanmıştır. Bunlar arasında Catia®, Pro/Engineer®, Solidworks®, Autocad® programları en çok bilinenleridir. (Demir ve Soykasap 2013)

#### 4. HASAR TAHMİNİ

Biliniyor ki gerilme dağılımı bindirme boyunca uniform değildir ki bölgesel gerilmeler yapışma bölgesinin gerilme oranından daha fazla olup bağlantıda beklenmeyen hasarlara sebep olabilmektedir. Onun için yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerini geliştirmek için bazı kuralların takip edilmesi gerekiyor. Örneğin esnek ve modülü düşük bir yapıştırıcıyı kullanmak, kalın bir yapıştırıcı tabakası kullanmak ya da geniş bir yapışma yüzeyi kullanmak. Hâlbuki yapısal yapıştırıcıların çoğu için bağlantı hasarı tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Otomotiv sektörü için, mukavemetli yapışma bağlantıları tasarlarken göz önüne alınması gereken birkaç önemli faktör vardır. Birincisi malzeme seçimi plaka için ve yapıştırıcı için, ondan sonra yapıştırıcı kalınlığı, bindirme boyutu, ortam sıcaklığıdır. Bu çalışmada sergilenecek deneyleri ve deney sonuçlarını anlamak için bu bölümde bu faktörlerden özet bir şekilde bahsedilecektir.

##### 4.1 Yapıştırıcı ve Malzeme Özellikleri

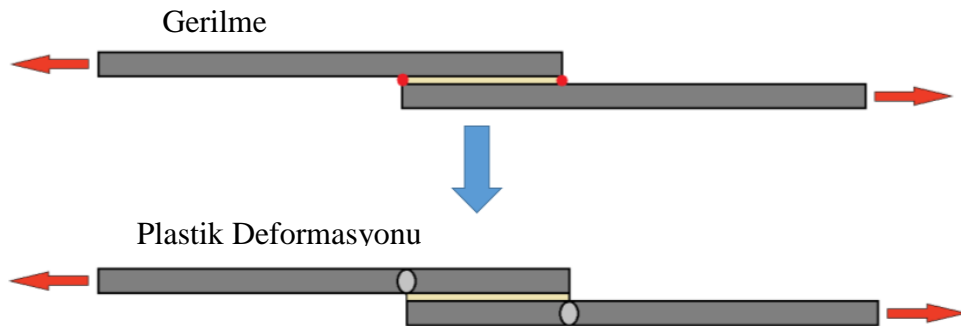
Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, esnek yapıştırıcıların rijit yapıştırıcılarından daha az mukavemetli olduğu halde yapıştırma bağlantılarında aksi olarak esnek yapıştırıcıların, rijit olanlardan daha fazla kullanılması daha uyumlu görünmektedir. Çünkü yapıştırıcı esnekliği bağlantı boyunca gerilmelerin uniform olmasını sağlamaktadır. Bunun neticesinde daha sağlam bir yapıştırma bağlantısı ortaya çıkarmaktadır.



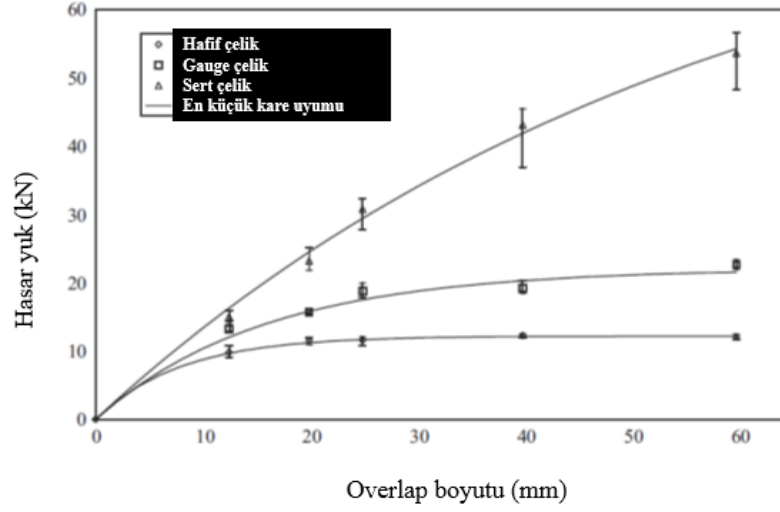


**Şekil 4.1.** Yapıştırıcıda gerilme dağılımı (Adams ve Wake 1997).

Genel olarak esnek yapıştırıcıların kullanılması yorulmaya karşı daha dayanıklı olduklarından dolayı tercih edilmektedir. Fakat bu özelliğe etki eden faktörlerden bir tanesi bindirme boyutudur. Yapıştırılacak malzemenin yapıştırıcıya etki eden faktörler ise elastisite modülü ve mukavemetidir. Volkersen analizinden anlaşıldığı gibi bindirmenin uçlarında oluşan deformasyonlar, yapıştırıcının şekil değiştirmesini gösterir, bunun neticesinde yapıştırılacak malzemenin modülü ne kadar yüksekse o kadar deformasyonları azaltarak, yapıştırıcılarda şekil değiştirmenin diferansiyelini azaltmış olur. Yapıştırılacak malzemenin mukavemeti yapıştırma bağlantısının hasarında önemli bir rol oynamaktadır. Yapıştırılacak malzemenin hasara uğradığı durumda, yapıştırma bölgesinin bindirme boyunca hasara uğradığı durumdan daha erken kopma meydana getirmektedir. Eğer yapıştırılacak malzemenin maksimum gerilmeleri bindirmenin uçlarında oluşursa, plastik şekilde deformasyon göstermeye başlar. Yapıştırıcı maksimum şekil değiştirmeye ulaştığında yapıştırma bağlantısı kırılır. Esnek bir malzemenin hasar yükü rijit malzemelerden daha düşük olmaktadır. Bunu göstermek adına şekil 4.2.'de deneysel sonuçların farklı yapıştırılacak malzemeler için hasar yüklerinin farkları gösterilmektedir. Hâlbuki otomotiv sanayinde sünek olan çeliklerin kullanılması tercih edilmektedir çünkü kaza durumlarında deformasyona ihtiyaç duyulmaktadır. Çarpışma anında gelen yüklerin araba yapısı tarafından iyi absorbe edilmesi istenmektedir. Yolculara zarar vermemek için, neticede yapışma bağlantısını iyi bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.



**Şekil 4.2.** Yapışma bağlantılarında yapıştırılan malzemenin deformasyonu (Adams ve Wake 1997).



Şekil 4.3. SLJ deneysel sonuçlarının farklı malzemeler için hasar yükleri (Adams ve Wake 1997).

#### 4.2 Bindirme Boyutun Etkisi

Bindirme boyutunun hasarı nasıl etkilediğini anlamak için, yapıştırıcı ve yapıştırılacak malzemenin etkisini anlamak gerekir ki bu da bize üç farklı durum vermektedir:

- **Elastik plaka ve esnek yapıştırıcı:** Yapıştırma bağlantısı neredeyse tamamen bindirme boyutuna bağlıdır. Yapıştırıcı plastik şekilde deforme olmaktadır ve yük ne kadar artarsa o kadar gerilmeler bindirme boyutu boyunca dağılmaktadır. Neticede global şekil değiştirme ve deformasyonlar yapıştırıcı bölgesinde oluşmaktadır.
- **Elastik plaka ve kırılgen yapıştırıcı:** Yapıştırma bağlantısı bindirme boyutuna bağlı değildir. Gerilmeler bindirmenin uçlarında birikmektedir. Ne kadar bindirmenin boyutu büyütülürse büyütülsün aynı gerilme dağılımı elde edilmektedir.
- **Deforme olan plaka:** Plakanın akma gerilmesi hasarı vermektedir ve neticede bindirme boyutuna dayanan eğilme momenti önem taşımaktadır.

Yük altında yapışma bağlantılarının hasar tahmininin analitik modeli geliştirmiştir; Bindirme boyutu 40 mm olana kadar ve yapıştırıcı kalınlığı 1 mm'yi geçen deneylerde, kurulan model ile bulunan sonuçlar aynı bulunmuştur. (Adams ve Wake 1997)

Daha uzun bir bindirme boyutu için daha karmaşık bir model gerekmektedir. Fakat önce sayılmış üç durumdan, sadece elastik plaka, esnek yapıştırıcı ve deforme olan plaka durumları çözülebilir, kırılğan yapıştırıcılar için Volkersen modeli daha uygundur.

Elastik plaka, esnek yapıştırıcı kullanırken tahmin edilen hasar yapıştırma bölgesindeki plastik deformasyona atfediliyor ve formül (4.1)'le verilmektedir.

$$P_a = \tau_y bl \quad (4.1)$$

$P_a$ : hasar yükü

$\tau_y$ : yapıştırıcı akma gerilmesi

$b$ : bağlantının genişliği

$l$ : Bindirme boyutu

Yapıştırıcının kaymada akma gerilmesi, çekmede akma gerilmesinden von mises akma modeli yaklaşım olarak varsayarak çıkartılabilir.

Uygulanan P yükünden kaynaklanan plakaya etki eden doğrudan çekme gerilmesi  $\sigma_t$  ;

$$\sigma_t = P/bt \quad (4.2)$$

$t$ : Plaka kalınlığı

Eğer ki eğilme momenti (M) oluşursa, iç plaka yüzeyindeki gerilme aşağıdaki formülle verilir.

$$\sigma_s = 6M/bt^2 \quad (4.3)$$

Goland ve Reissner modeline göre  $M = kPt/2$ , plaka ucu yük altında döndüğü için eğilme momenti faktörü ( $k$ ) üniteden azaltılır.

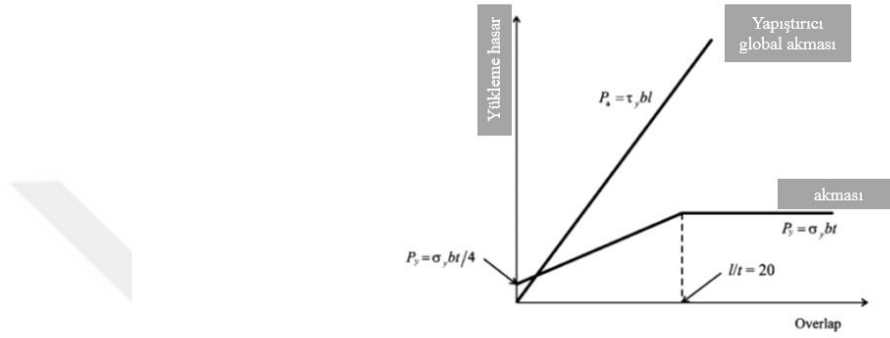
Plakada oluşan global gerilme,  $\sigma_t$  ve  $\sigma_s$  gerilmelerin toplamı ile hesaplanır ve sonuç olarak plaka akmasının maksimum yükleme hasarı;

$$P_y = \sigma_y bt/(1 + 3k) \quad (4.4)$$

$\sigma_y$ : Plakanın akma gerilmesi

Düşük yükler ve kısa bindirme için eğilme momenti faktörü 1, eğer bindirmeyle yapıştırma tabakası arasındaki ilişki  $l/t \geq 20$  ise eğilme faktörü 0 olur.

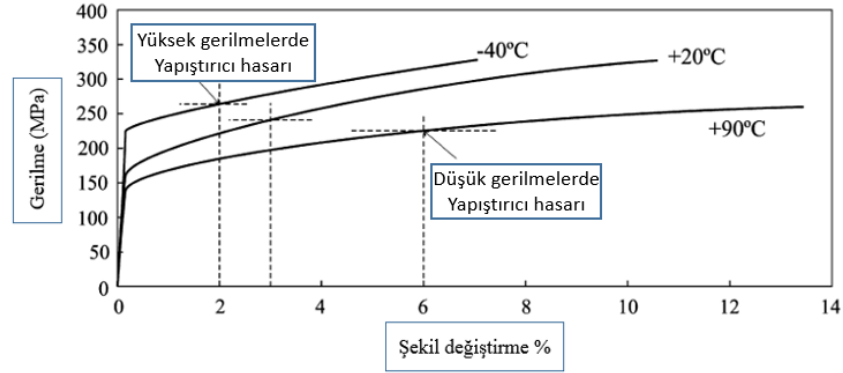
Şekil 4.4'deki grafikte formüller ve bindirme boyutu ile yükleme hasarına bağlı olarak lineer ilişkisi yansıtılmaktadır. Yapıştırma bağlantısında, akmayan plakalar için ve esnek yapıştırıcı görünebilir.



**Şekil 4.4.** Yükleme hasar ve bindirme boyutu (Adams hasar tahmin modeli) (Adams ve Wake 1997).

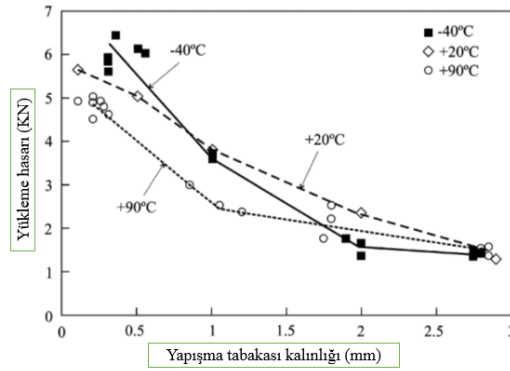
### 4.3 Sıcaklık Etkisi

Otomotiv sanayinde, göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden yapıştırma bağlantıları için sıcaklık değişikliğidir. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri sıcaklığa ve polimer tabiatına göre nasıl değiştiği anlamak ve tahmin edebilmek oldukça önemlidir. Bağlantıların mukavemeti sıcaklığa bağlı olduğu zaten ispat edilmiştir. Özellikle yapıştırıcının  $T_g$  °C'si değerine yaklaşıncaya bu etki daha da belirgin olmaktadır. Termal genişleme katsayısı (CTE) özel olarak farklı malzemeler için yapıştırılınca ve yapıştırıcının mekanik özellikleri sıcaklıkla, geniş bir sıcaklık aralığı için (18, 19, 20, 21) yapıştırıcının mukavemetini en çok etkileyen özelliklerdir. Otomotiv sanayinde kullanılan yapıştırıcıların -40°C ve 90°C arasındaki sıcaklıklar altında direnmesi gerekmektedir. Neticede karakterizasyonlardan çıkarılan gerilme-şekil değiştirme sonucu bu aralığı kapsaması gerekmektedir. (Mata ve ark. 2014)



**Şekil 4.5.** -40°C, 20°C, 90°C'de gerilme-şekil değiştirme (Adams ve Wake 1997).

Birçok çalışmada ki deneyler neticesinde yapıştırıcıların, özellikle epoksilerin mukavemeti, düşük ve yüksek sıcaklıklarda azaldığı gözlemlendi. Farklı malzemelerin yapıştırma bağlantıları için yapıştırıcılar yüksek sıcaklıklar altında, zayıflığı yapıştırma dayancından kaynaklanıyor ve sıcaklık düşürülünce zayıflığı termal gerilmelerden kaynaklanmaya başlamaktadır. Hâlbuki aynı malzemelerden yapıştırma bağlantıları için yapıştırıcının düşük sıcaklıklar altında kırılabilirliği artar. Son yapılan çalışmalardan bir tanesinde akmaya maruz kalan bir plaka ve esnek bir yapıştırıcı, yüksek ve düşük sıcaklıklarda test edilmiş sonucu şekil 4.5'te gösterildiği gibi oda sıcaklığında mukavemeti, yüksek sıcaklığından daha iyi ama düşük sıcaklıkta daha düşüktür. Açıklamasına göre yüksek sıcaklıklarda yapışma bağlantısı zayıf olur çünkü plakanın oda sıcaklığına göre akması düşük gerilmelerde olur. Hâlbuki düşük sıcaklıklarda malzemenin akma gerilmesi artar ve daha mukavemetli yapıştırma bağlantısı elde edilir.



**Şekil 4.6.** Farklı sıcaklıklarda yükleme hasarı ve yapışma tabakası kalınlığı (Adams ve Wake 1997).

## **5. YAPIŞTIRICI KAREKTERİZASYON TEST YÖNTEMLERİ VE HESAPLAMA ŞEKİLLERİ**

Mekanik ve fizik alanlarında yapıştırıcıların değişik yükler altında davranışlarını gözlemleyerek özelliklerini bilmemiz için belli testlerin yapılması gerekmektedir. Ne kadar test yapılırsa o kadar yapıştırıcı ile ilgili bilgi toplanır, neticede doğru bir numerik model yapılabilir. Genel olarak yapıştırıcıların test edilmesi gerekir çünkü bazen beklenmeyen sonuçlar elde edilebilir. Yapıştırıcıların hasar mukavemeti verilerini elde etmek için mevcut olan çok test vardır ve o testler ikiye bölünmüştür;

- Bulk numune testleri.
- Bağlantı testleri.

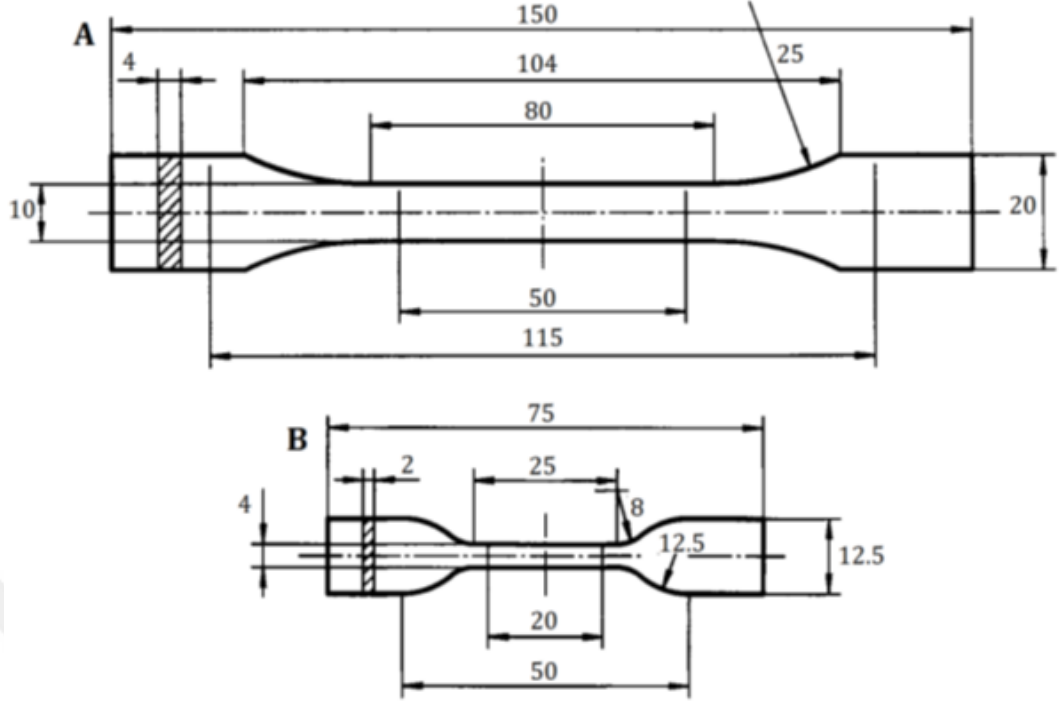
İlk olarak yapıştırıcının saf malzeme numunesini üretilip küredikten sonra çekme testi yapılır sonra iki plakaya bindirme bağlantısı uygulanarak çekme testi yapılır. Böylece gerçekte yapıştırıcıların çalıştığı ortam şartları oluşturulmuş olur.

### **5.1 Bulk Numunenin Sanki-Statik Testi**

Genelde yapıştırıcının mekanik özelliklerini bulmak için bulk numuneye çekme testi uygulanır. Doğrusal bir yük yapıştırılan malzemenin hiç bir etkisi olmadan, test sonucundan hasar tahmini verileri belirlenir.

#### **5.1.1 Numune geometrisi**

Numune geometrisinin birçok standardı mevcuttur. Yapıştırıcının malzemesine göre değişir, ama en çok kullanılan standart dogbone-shaped numunesi EN ISO 527-2'dir. Standardına göre test edilecek yapıştırıcı rijit ise numune esnek yapıştırıcılardan daha uzun tutulmaktadır. Şekil 5.1'de gösterildiği gibidir.

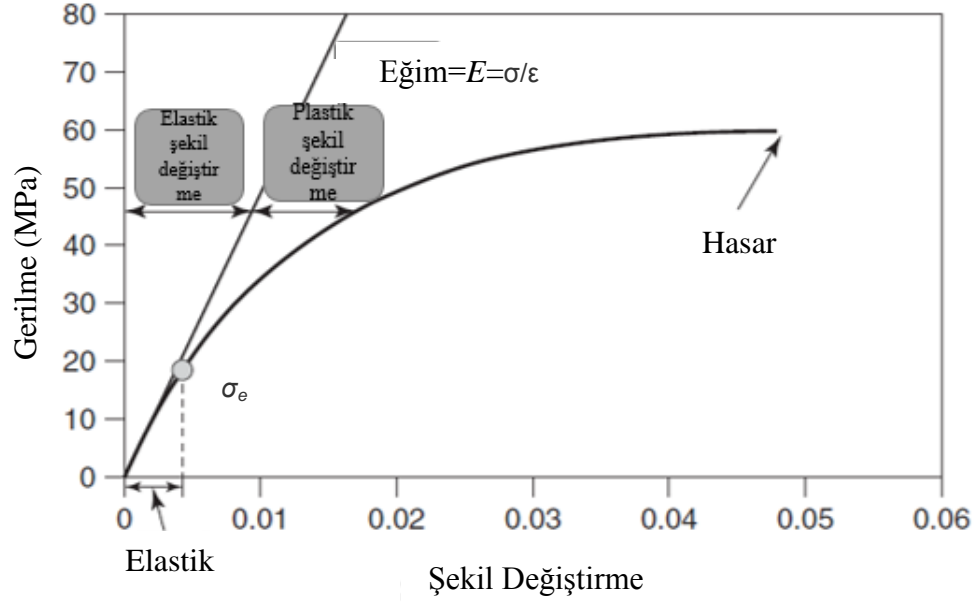


**Şekil 5.1.** EN ISO 527-2. çekme testi numune geometrisi (A) uzun numune, (B) kısa numune (Mata ve ark. 2014).

Numune kalınlığı çok önemlidir çünkü elde edilecek tüm özellikler ona dayanır. İstenmeyen bir durum olarak genelde testlerde kullanılan kalınlık 2 mm'dir. Fakat gerçekteki kalınlık 0,1 ve 0,2 mm olmaktadır. Ama çok ince numuneleri test etmek yapıştırıcının esnekliğinden dolayı zor olmaktadır.

### 5.1.2 Test prosedürü ve sonuçları

Numuneye doğrusal yükler altında 1mm/dk hızıyla çekme testi uygulanır. Hasara uğramasına kadar devam ettirilir ve bu test farklı sıcaklıklarda uygulanabilir. Gerilme-şekil değiştirmeyi hesaplamak için yük ve deplasman verilerin ölçülmesi gerekir. Klip gauge ya da strain gauge'ı kullanarak deplasman ölçülür. Bilinmelidir ki yüksek ya da düşük sıcaklıklarda çalışırken strain gauge'nin ortama göre ayarlanması gerekir. Tipik olarak sonuçlar şekil 5.2'deki grafikteki gibi gerilme-şekil değiştirmeyi gösterilmektedir. Elastisite modülü, çekme gerilmesi, şekil değiştirme hasarı bulmak için EN ISO 527-2 gibi standart metotlar bulunmaktadır.



**Şekil 5.2.** Yapıştırıcının tipik çekme gerilmesi eğrisi ve mekanik özellikleri (Adams ve Da Silva 2012).

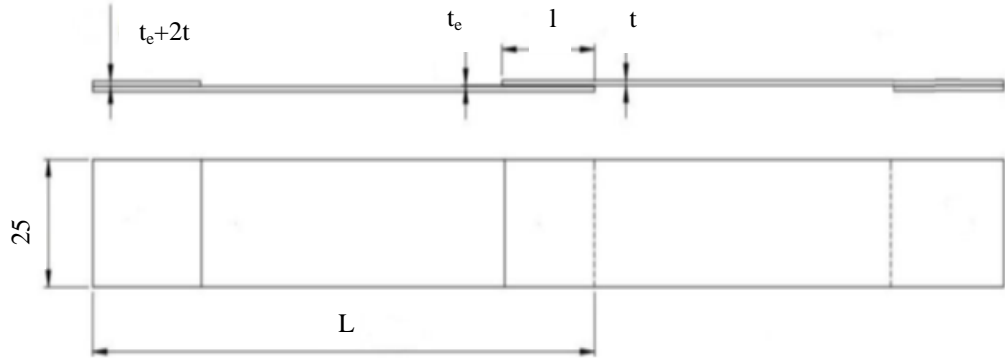
## 5.2. Yapışma Bağlantısı Sanki-Statik Testi

Birbiri üstüne bindirilmiş ve yapıştırılmış ince iki plaka otomotivde kullanılan yapıştırma bağlantıların en doğru yapısal gösterimidir. Tekli yapıştırma bağlantısı imalatı en ekonomik olan ve test edildiğinde doğru ve gerçeğe yakın sonuçları veren modeldir. ASTM D 1002 ve ISO 4587 tek bindirme yapışma bağlantısını tanımlayan standartlardır. Hâlbuki gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek için standarda bazı değişiklikler yapılabilir.

### Numune geometrisi;

Tek bindirilmiş yapıştırma bağlantıları, birbirlerine bindirilmiş iki plaka uçlarında 'bindirme(overlap)' bölgesinde yapıştırılmış şekilde tanımlanır. Yapışma tabakası, plaka kalınlığı ve 'bindirme' boyutu özellikleri yapıştırma bağlantısına direkt bir şekilde etki etmektedir. Bu yüzden sayılı çalışmalarda, farklı sonuçları karşılaştırmak için bu özellikler değiştirilmektedir. Genişlik genelde 25 mm'dir. Uygulanan teste göre yapıştırma bağlantıların sımsıkı tutmasını iyileştirmek için ve yüklenen kuvvet yapışma düzlemiyle hizalanmış olmasını sağlamak için uçlarına ince plakalar yapıştırılabilmektedir.





**Şekil 5.3.** Tek bindirme yapışma bağlantı geometrisi (Mata ve ark. 2014).

### **Test prosedürü ve sonuçları;**

Bulk testlerinde olduğu gibi tek yapıştırma bağlantısına doğrusal yönde hasara uğrayana kadar 1mm/dk hızında çekme kuvveti uygulanır. Yük-deplasman eğrisi elde edilir. Kullanılan boyutlar bağlantı geometrisinde gösterilmiştir. Bunlar ortam sıcaklığı gibi parametrelere göre değişiklik göstermektedir. Tek yapıştırma bağlantı modeli (çarpışma, nem, vibrasyon) gibi birçok yükleme şartlarında kullanıldığı için elde edilen özellikler farklı yükleme şartları altında karşılaştırılabilir. (Mata ve ark. 2014)

### **Hesaplama şekilleri;**

Birinci ve ikinci modta oluşan kırılma enerjisini bulmak için geliştirilmiş birçok yöntem vardır ve çoğu çatlak boyunun ölçülmesini gerektirmektedir. Bu çalışmada çatlak boyunu ölçmek için yeterli imkânlar olmadığı için çatlak boyunun ölçmesini gerektirmeyen CBBM yöntemi uygulandı.

### **CBBM;**

- 1. Birinci kırılma modu;

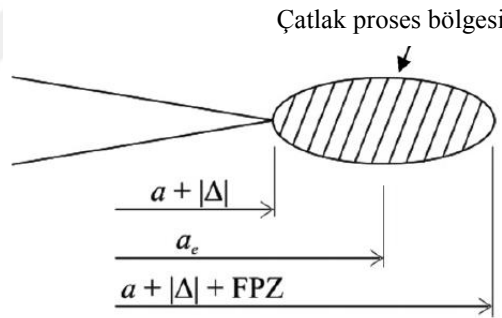
Castigliano teoreminden deplasman  $\delta$  aşağıdaki formül ile ifade edilebilir.

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{E_l B h^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{LR}} \quad (5.1)$$

Bu formül kiriş teorisine dayanan bir yaklaşımdır ve numunenin kompliyansının hesaplanmasını  $C = \frac{\delta}{P}$  ifade ederek mücade edilmektedir.

Halbuki şekil 5.4'de gösterildiği gibi çatlak ucundaki gerilmeler gibi  $P - \delta$  eğrisini olumsuz bir şekilde etki edebilir, bazı sorunlar kiriş teorisinde hesaba katılmış değildir. Bunun yansıra çok iyi biliniyor ki tahta, kompozit gibi malzemeler heterojen olduğu için young modülü numune malzemesine göre değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla, DCB testten bağımsız olarak elastik sabitleri ölçmek uygun olmaz. Bu problemin üstesinden gelmek için, düzeltilmiş eğilme modülü ( $E_f$ ), ( $E_L$ )'nin yerine kullanılabilir, her bir numune için  $E_f$ , ölçülen başlangıç kompliyansı ( $C_0$ ) ve düzeltilmiş çatlak boyu ( $a_0 + |\Delta|$ ) kullanılarak denklem (5.2)'den bulunur.

$$\alpha a_e^3 + \beta a_e + \gamma = 0 \quad (5.2)$$



**Şekil 5.4.** Çatlak proses bölgesi ve eşdeğer çatlak boyunun şematik gösterimi (De Moura ve ark. 2008)

$$\alpha = \frac{8}{Bh^3E_f} \quad (5.3)$$

$$\beta = \frac{12}{5BhG_{LR}} \quad (5.4)$$

$$\gamma = -C \quad (5.5)$$

Matlab programı kullanarak  $a_e$  değeri aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$a_e = \frac{1}{6\alpha}A - \frac{2\beta}{A} \quad (5.6)$$

$$\text{Sonuç olarak } A \text{ değeri ifadesi; } A = \left( \left( -108\gamma + 12\sqrt{3\left(\frac{4\beta^3 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha}\right)} \right) \right)^{1/3} \quad (5.7)$$

$$E_f = \left( C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{LR}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3} \quad (5.8)$$

$\Delta$  ise, çatlak ucundaki kök dönme etkisi olmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta = h\sqrt{\frac{E_f}{11G_{LR}} \left[ 3 - 2\left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right)^2 \right]} \quad (5.9)$$

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_f E_R}}{G_{LR}} \quad (5.10)$$

$E_f$  Değerini bulmak için (5.8) ve (5.9) denklemlerine iterasyon prosedürü uygulanarak bulunabilir. Böylece  $G_I$  değerini bulmak için tüm değerler elde edilmiş olur; (De Moura ve ark. 2008)

$$G_I = \frac{6P^2}{B^2h} \left( \frac{2a_e^2}{B^2E_f} + \frac{1}{5G_{LR}} \right) \quad (5.11)$$

- 2. ikinci kırılma modu;

CBBM metodu kompliyansın hesaplanmasına dayanan bir metottur, dolayısıyla aşağıdaki formül onu ifade eder.

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1Bh^3} + \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (5.12)$$

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (5.13)$$

(5.12) ve (5.13) denklemlerinden;

$$E_f = \frac{3a_0^3}{8Bh^3C_{0corr}} \quad (5.14)$$

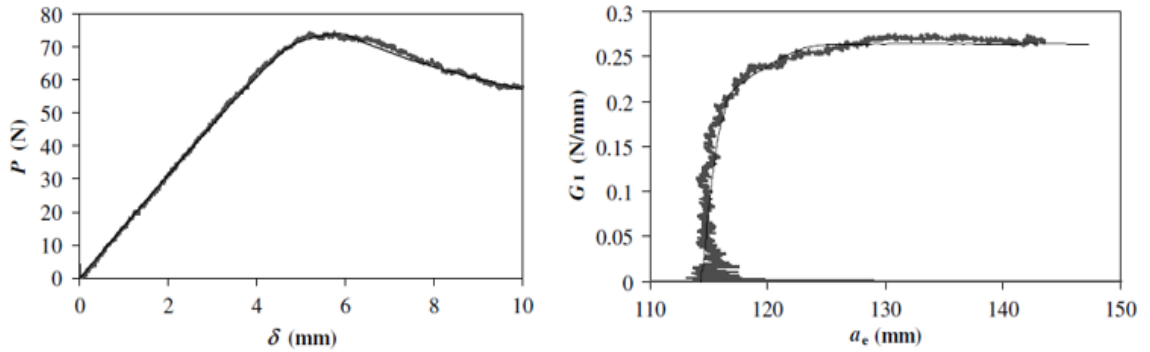
İfadesiyle  $P - \delta$  grafiğini ciddi bir şekilde etki eden eğilme momenti  $E_f$  hesaplanabilir. CBBM metodu denildiği gibi çatlak boyu hesaplanmasını gerektirmeyen bir metot olduğu için  $a$ 'nın yerine  $a_{eq}$  geçer ve aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$a_{eq} = a + \Delta a_{FPZ} = \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5.15)$$

$C$ 'nin yerine  $C_{0corr}$ 'nin kullanılarak,  $G_{II}$  değeri sonunda hesaplanabilir ve şöyle ifade edilir; (De Moura ve ark. 2009)

$$G_{uc} = \frac{9P^2 a_e^2}{16B^2 E_f h^3} \quad (5.16)$$

Yapılan testlerden elde edilen  $P - \delta$  verileri kullanarak, Bahsedilen mod 1 ve mod 2 kırılma enerjisi hesaplama yöntemleriyle R-eğrisi elde edilince plato neredeyse analizlerde kullanılacak  $G_1$  ve  $G_2$  değerleri bulunabilir.



Şekil 5.5.  $P - \delta$  eğrisinden R-eğrisinin elde edilmesi (De Moura ve ark. 2008).

## 6. MATERYAL VE METOD

### 6.1. Kullanılan Malzemeler

#### Yapıştırıcı;

Bu çalışmada West System® şirketi tarafından üretilmiş epoksi Gflex yapıştırıcısı kullanılmıştır.



Şekil 6.1. West System® Gflex 655 yapıştırıcısı

Flex kelimesinden esnek bir yapıştırıcı olduğu belli olmaktadır, dolayısıyla genel olarak testlerde nasıl bir davranış sergileyeceği hakkında fikir sahibi olunabilir.

#### Yüzey temizleyicisi;

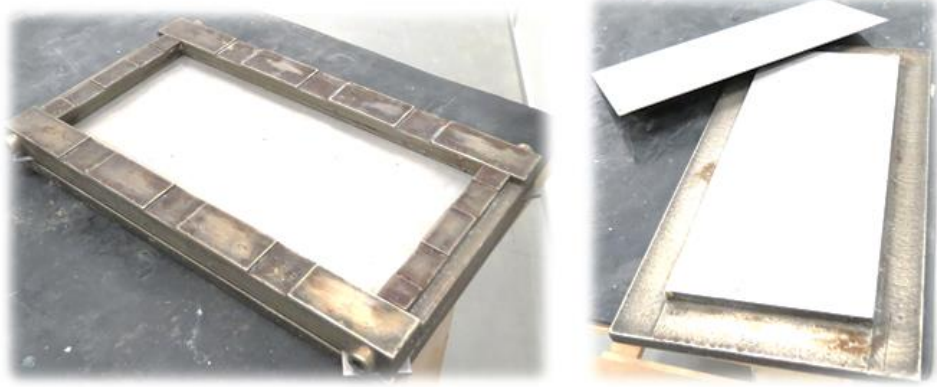
Bu çalışmada kullanılan malzeme alüminyum olduğu için oksit tabakası kaldırılıp yüzey işlemlerinin yapılması gerekmektedir, bunun için alüminyum yüzeydeki yağları ve tozları almak için uygun olan aseton maddesi kullanılmıştır.



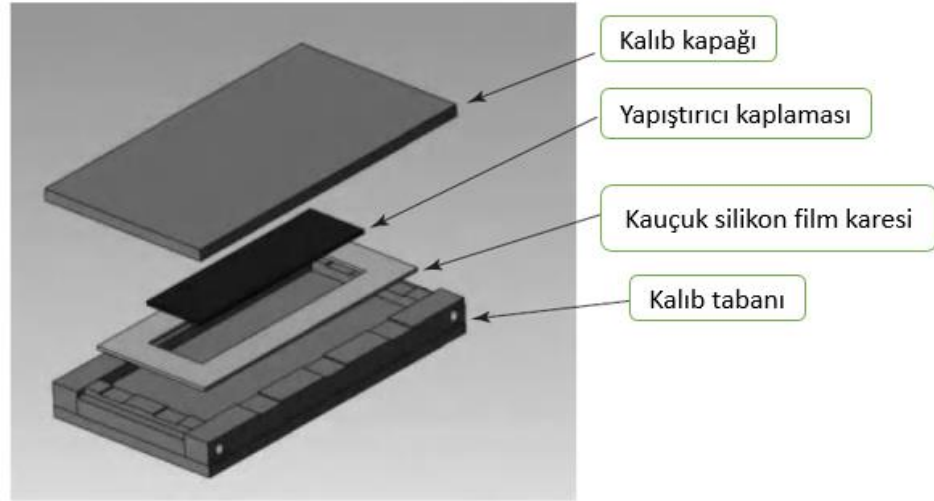
Şekil 6.2. Aseton

## 6.2. Bulk Testleri

**Bulk kalıbı;**



**Şekil 6.3.** Bulk Kalıbı



**Şekil 6.4.** Bulk kalıbının şematik gösterimi (Adams ve Da Silva 2012)



**Şekil 6.5.** Katkı Maddesi

Bulk testi yapılmadan önce kalıbın hazırlanması gerekir, bunun için kalıbın üzerine özel bir katkı maddesi sürülerek, yapıştırıcının kürlendiği zaman kalıptan kaldırılmasının kolay olması sağlanmıştır. Bu işlem dört kere tekrarlanmıştır çünkü maddenin iyice oturmuş olması gerekmektedir.

#### **Yapıştırıcı ağırlığının ayarlanması;**

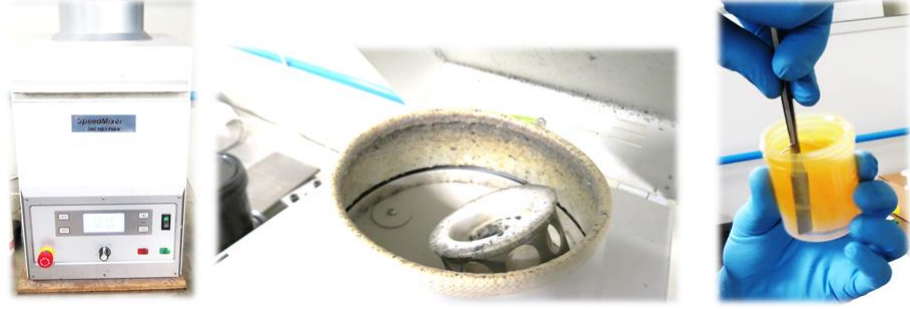
Şekil 6.6' da yapıştırıcının veri listesinde yazıldığı gibi, reçine ve sertleştirici eğer hacim olarak ayarlanıyorsa 1:1 oranına göre yani yarı yarıya, eğer ağırlığa göre ise 1.2:1 oranına göre ayarlanmalıdır. Resimde gösterildiği gibi ağırlığı ayarlamak için terazi kullanılarak 48:40 gr reçine/sertleştirici ayarlanmıştır.



**Şekil 6.6.** Yapıştırıcı terazisi

### Yapıştırıcının karıştırılması;

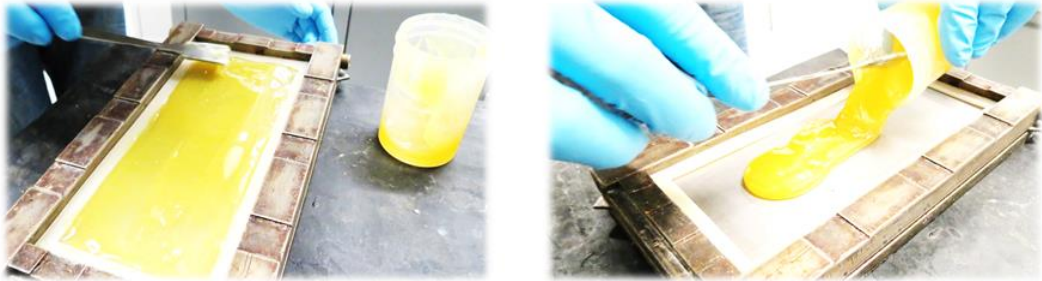
Şekil 6.7'de yapıştırıcının reçine/sertleştirici oranı ayarlandıktan sonra kutu makinaya verilmiştir, iki kere her iki dakika makinadan çıkartılıp elle karıştırılıp bir daha makinaya verilmiştir. Makina yapıştırıcıyı karıştırarak hem dönme hem vibrasyon hareketleri yapar.



Şekil 6.7. Yapıştırıcı karıştırma makinesi

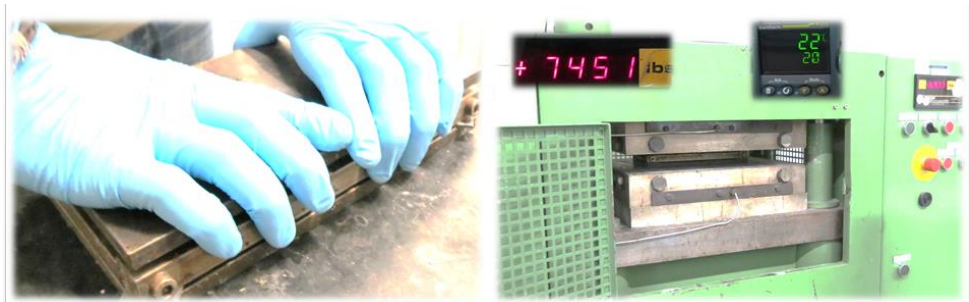
### Kalıplama süreci;

Yapıştırıcı güzel bir şekilde karıştırıldıktan sonra kalıbın üzerine sürülür. Kalınlığı sabit tutmak için her tarafının yapıştırıcı ile dolmasından emin olunması gerekmektedir.



Şekil 6.8. Kalıplama süreci

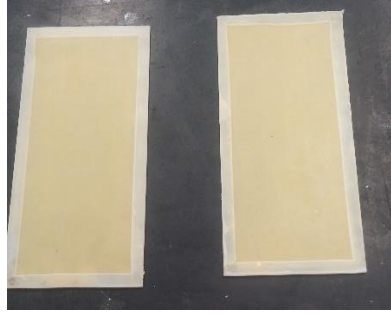
### Bastırma süreci;





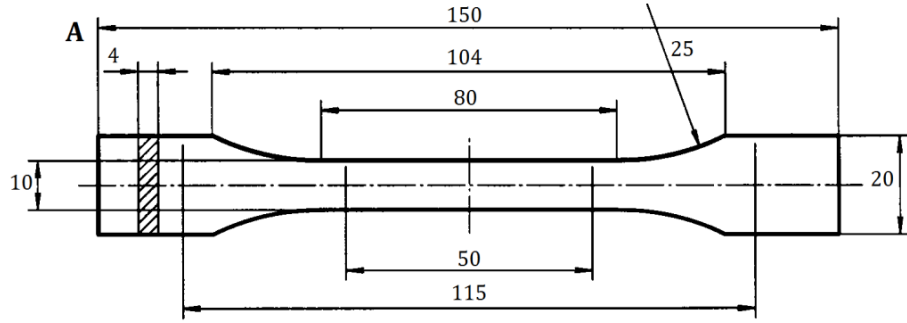
### Şekil 6.9. Bastırma makinası içinde kalıbın bekletilmesi

Bulk testinin başarılı olması için, yapıştırıcının homojen olması göz önüne alınması gereken en önemli meselelerden biridir. En ufak boşluk oluşmasında çekme testi olumsuz bir şekilde etkilenir. Bunun için 22°C 'de yapıştırıcının veri listesine göre kür sıcaklığında, 7450 N kuvvetiyle bastırılmıştır. Yapıştırıcının veri listesine göre kür zamanı 11 saat yük uygulanması için 24 saat beklenmesi gerekmektedir. Bunun için yapıştırıcıyı bastırma makinesinin içinde 24 saat bekletildikten sonra kaplamalar çıkarılmıştır.



Şekil 6.10. Kür yapıştırıcı kaplaması

### Bulk Numenesi;

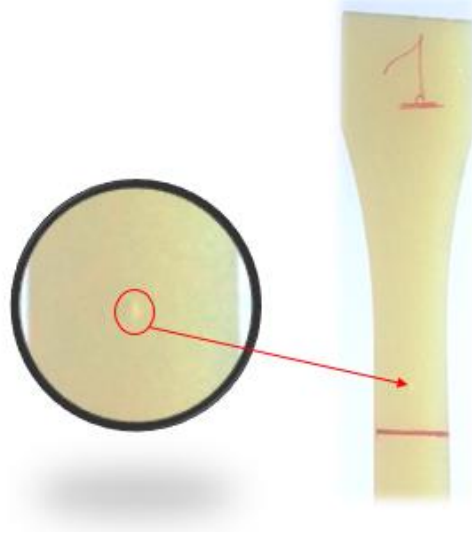


Şekil 6.11. Standard EN ISO 527-2 (Adams ve Da Silva 2012)

### Standarda göre bulk numune imalatı;



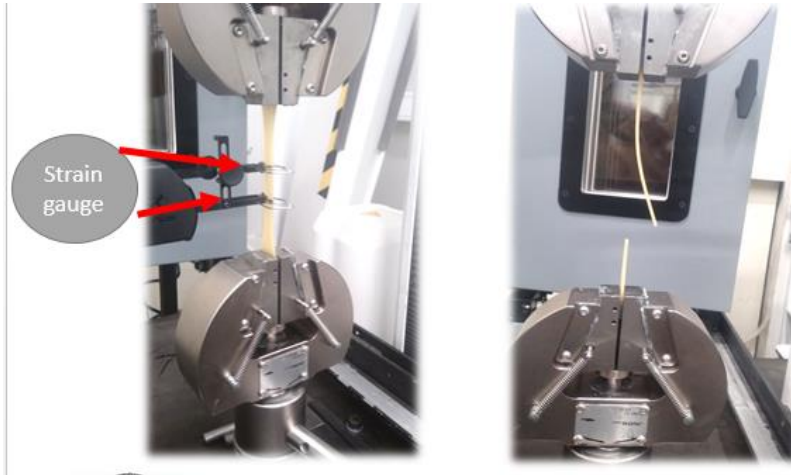
**Şekil 6.12.** İmal edilmiş bulk numuneleri



**Şekil 6.13.** Boşluk bulunan numunelerden biri

EN ISO 527-2 standarda göre bulk numuneleri üretilmiştir. Numuneler tek tek kontrol edilerek Şekil 6.13’de gösterildiği gibi boşluk bulunan tüm numuneler çıkartılarak uygun numuneler seçilmiştir.

**Oda sıcaklığında ve 50°C ‘de bulk çekme testi;**



**Şekil 6.14.** INSTRON üniversal test makinesi

Oda sıcaklığında çekme testi uygulanmıştır. Strain gauge kullanılarak şekil değiştirmeler hesaplanmıştır. Bilgisayarla kaydedilen birbirlerine en yakın eğriler seçilmiştir. Diğerleri ise gözle görünmeyen mikro boşluklar içerdiğinden dikkate alınmamıştır.



**Şekil 6.15.** 50°C 'de sıcaklıkta çekme testi

50°C sıcaklıkta bulk çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.15'de görüldüğü gibi strain gauge'in fırın içine konması mümkün olmadığı için kamera ile fotoğraf çekilerek şekil değiştirmeler hesaplanmıştır.



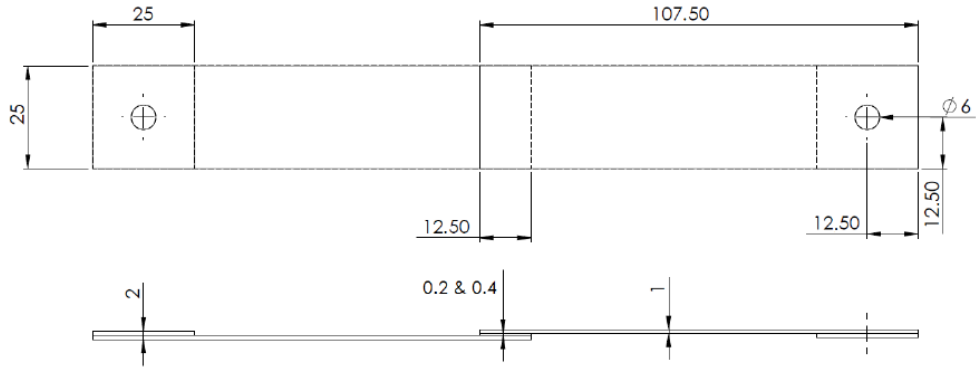
**Şekil 6.16.** Testlerden önce ve sonra bulk numuneleri

### 6.3. Yapışma Bağlantısı Çekme Testleri

Yüzey işlemleri;



Şekil 6.17. Kum yüzey işleme makinesi

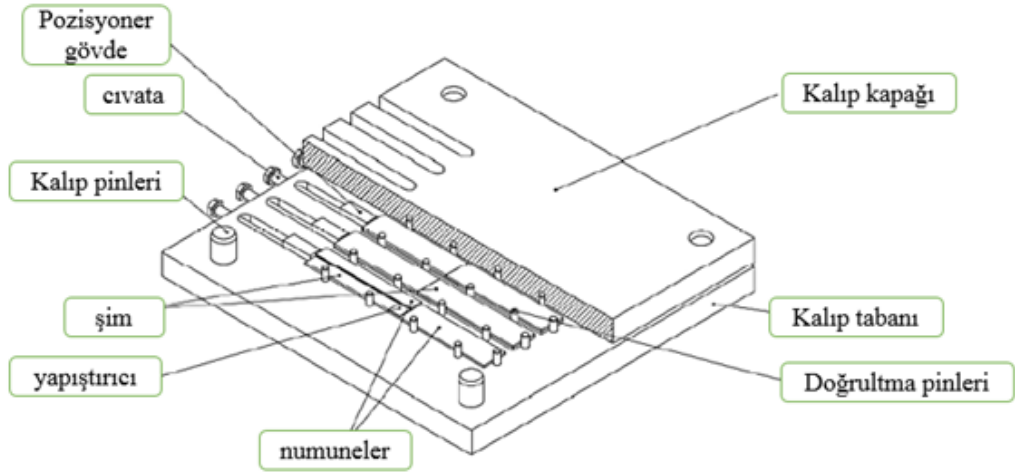


Şekil 6.18. ASTM D 1002 (Adams ve Da Silva 2012).

ASTM D 1002 standardına uygun on altı numune hazırlanmıştır. Numune sayısı fazla olduğu için yüzeydeki oksit tabakasını kaldırmak için elle değil makine ile işlem yapılmıştır. Yüzeydeki tozlar ve yağlar aseton maddesi kullanılarak alınmıştır.



Şekil 6.19. SLJ test kalıbı



Şekil 6.20. SLJ kalıbı şematik gösterimi (Adams ve Da Silva 2012).

Yüzey işlemleri gerçekleştirildikten sonra 12,7 ve 25 mm bindirme boyutunda on altı tane numune kalıba dizilmiştir ve kalıp kapağı ile bastırılıp kapatılmıştır. Fırına verilerek oda sıcaklığında 7450 N kuvvetle bastırılıp 24 saat bekletilmiştir.



**Şekil 6.21.** Numunelerin test edilmesi için son işlemler

Numuneler fırın içinde 24 saat bekletildikten sonra çıkarılıp son işlemler yapılmıştır. Birbirlerinden ayırarak mengene de tutturulup yapıştırıcının fazla olduğu bölgeler zımpara ile temizlenmiştir.



**Şekil 6.22.** INSTRON üniversal makinesinde SLJ testi

Yapışma bağlantılarına çekme testleri yapıldı fakat yapışma bölgesinde kohezif hasar oluşmadığı için testler durduruldu. Farklı boyutlarda yeni numuneler üretilip testler tekrarlanmıştır ve kohezif hasar gözlemlenmiştir.



Adeziv Hasar

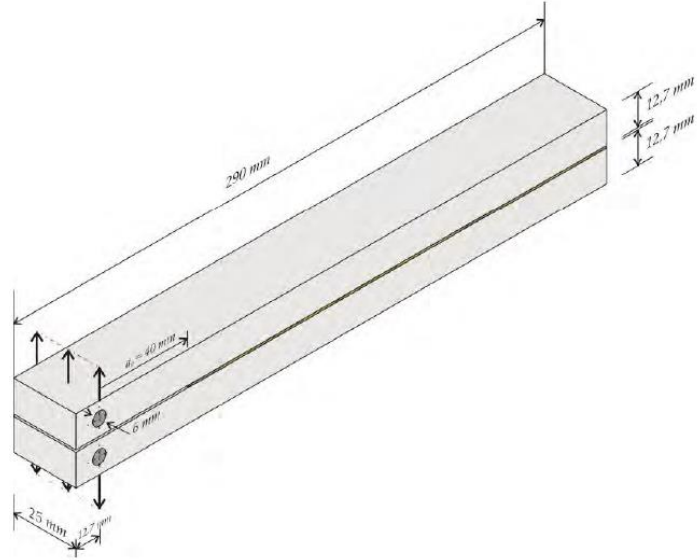


Karışık Hasar

### Şekil 6.23. Testlerden elde edilen hasar tipleri

SLJ testleri yapıldıktan sonra eğer kohezif hasar oluşmamış ise yüzeye elektro-kimyasal anodizin yapılır veya numunenin boyutları büyütülür veya alüminyum yerine çelik kullanılır.

### 6.4.DCB Testi



Şekil 6.24. DCB numune boyutları (Filipe. 2013).

Çekme yükleri altındaki yapıştırıcının kırılma enerjisini incelemek için yapılan DCB testinin Şekil 6.24 ASTM D5528 standardına göre numune boyutlarını göstermektedir. Fakat önceden bahsedildiği gibi standarda bazı değişiklikler yapılabilir bunun sebebi testin daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlamaktır.



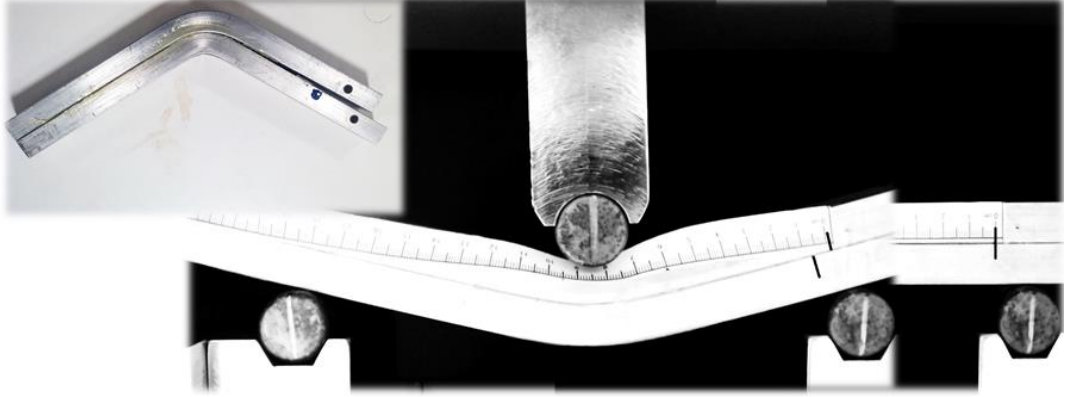
**Şekil 6.25.** DCB numuneleri



**Şekil 6.26.** INSTRON üniversal çekme makinesinde DCB testi

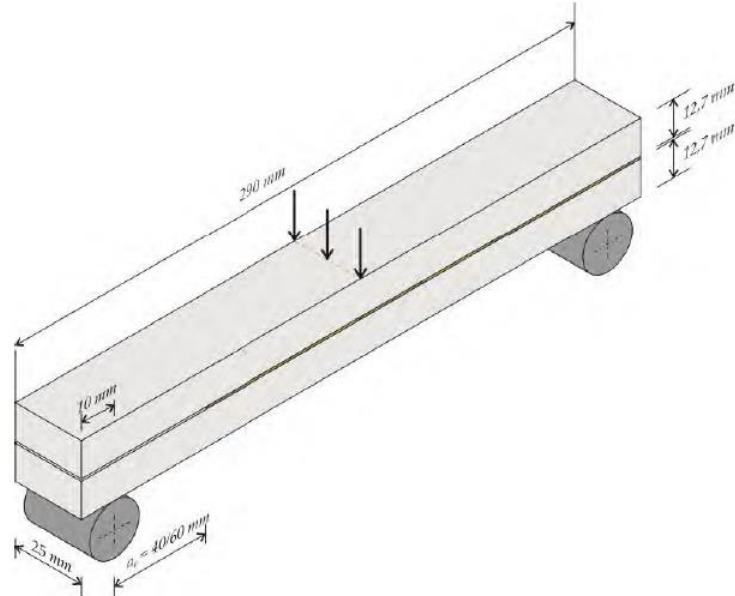


## 6.5. ENF Testi



Şekil 6.27. ENF testi

Hem SLJ hem DCB ve ENF testlerinde plaka malzemesi plastik deformasyon göstermemeli çünkü amaç yapıştırıcının saf davranışlarını incelemektir. Eğer malzeme plastik davranırsa modellenmesi zor bir hasar oluşur dolayısıyla Şekil 6.27’de görülen plastik deformasyon yapıştırıcı çatlığı oluşuktan sonra gerçekleşmiş, testin durdurulması gerekirken durdurulmadığı için malzeme plastik bölgeye geçmiştir Fakat sonuçlarda plastik deformasyonlar dikkate alınmamıştır.

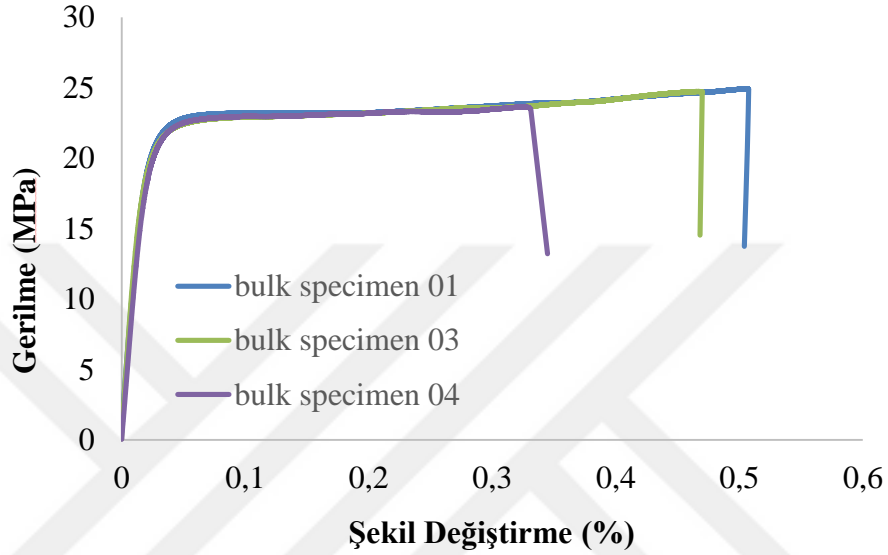


Şekil 6.28. ENF test numuneleri boyutları (Filipe. 2013).

## 7. SONUÇLAR

### 7.1.Deneysel Sonuçlar

#### 7.1.1.Bulk testi



Şekil 7.1. Epoksi-Gflex 655 oda sıcaklığı bulk testi sonuçları

Oda sıcaklığında yapılan bulk çekme testlerinden üçü dikkate alınmıştır. İkinci numuneye ait eğri diğerlerine göre çok farklı olduğu için dikkate alınmamıştır. Gözle görünmeyen mikroskobik boşluklar içerdiği için kabul edilmemiştir.

Çizelge 7.1. Bulk testi sonucunda Gflex 655 tipi yapıştırıcının mekanik özellikleri

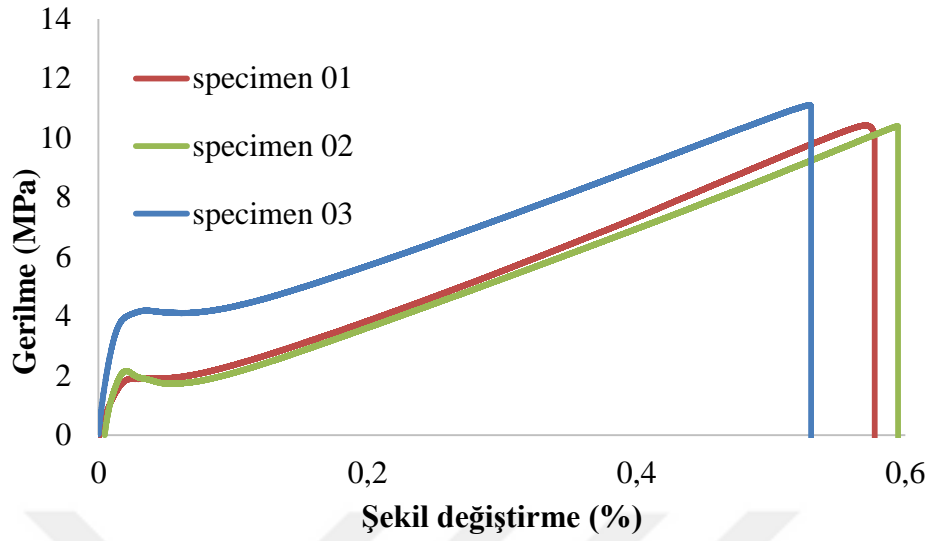
	Maksimum yük	Maksimum akma gerilmesi	Maksimum şekil değişirme	Young modulu "makina"	Grakikten hesaplanmış gerçek young modulu	genişlik	kalınlık
	(N)	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(MPa)	(mm)	(mm)
1	551,21	24,93	0,50766	1104,55	1053,12	10,05	2,2
3	445,41	24,74	0,47005	1264,01	1234,21	10	1,80
4	510,78	23,63	0,34479	1098,93	1055,24	10,05	2,15
oran	502,47	24,43	0,44083	1155,83	1114,19	10,033	2,05

Çizelge 7.1’de instron cihazına bağlı bilgisayar programının verdiği sonuçlar görülmektedir. EN ISO 527-2 standardına dayanarak grafiklerden gerçek young modülü hesaplanmıştır ve çizelgede görüldüğü gibi programın verdiği sonuçlara yakın olsa da farklılıklar söz konusudur.

**Çizelge 7.2.** Abaqus sonlu elemanlar analizi için kullanılacak veriler

<b>E (Knn)</b>	<b>G1 (Kss)</b>	<b>G2(Ktt)</b>	
1114,19 MPa	428,53 MPa	428,53 MPa	Bulk + $G = E / 2(1+\nu)$
<b>Nominal stress normal-only mode</b>	<b>Nominal stress first direction</b>	<b>Nominal stress second direction</b>	
24,43 Mpa <i>Birinci mod hasar başlangıcı 'initiation'.</i>			
<b>Normal mode fracture energy</b>	<b>Shear mode fracture energy first direction</b>	<b>Shear mode fracture energy second direction</b>	DCB+ENF
0,77 N/mm	4 N/mm	4 N/mm	

Abaqus programına ait İngilizce olarak yazıldığı gibi çizelgede veriler görülmektedir. Analizler çekme-ayırılma kanununa dayandığı için sonlu elemanlar modelini oluşturmak için ihtiyaç duyulan veriler, çekme başlangıcından hasar olmadan önceki elastik lineer veriler, çizelgede bulk testinden elde edilen E young modülü değeri ve  $G_1, G = E/2(1+\nu)$  denklemiyle hesaplanmıştır. Kullanılan malzeme izotropik olduğu için x ve z doğrultusunda aynı şekilde davrandığı için model iki boyutludur, dolayısıyla  $G_2 = G_1$  olarak alınmıştır. Hasarın başlangıç noktasındaki gerilmeler bulk testi uygulanarak, y doğrultusundaki gerilmesi bulunmuştur. Diğer x ve z doğrultusundaki gerilmeleri bulmak için TAST(thick adherend shear test) uygulanması gerekir. (Da Silva ve ark 2012) Bu çalışma da imkân ve zaman kısıtlarından dolayı uygulanamamıştır. Analiz için elde edilemeyen veriler için eğri uydurma metoduyla veriler bulunmaya çalışılmıştır. Son olarak hasar yayılımının enerji verileri çizelgede görüldüğü gibi DCB ve ENF testleri uygulanarak elde edilmiştir. Mantıklı olarak  $G_2, G_1$ 'den daha fazla olması beklendiği gibi bulunmuştur. Çünkü düzlemde yapıştırılmış bir bant düşünülürse, bandı x ya da z doğrultusunda çekilmesi y doğrultusuna kıyasen daha zordur.



**Şekil 7.2.** Epoksi-Gflex 655 50°C sıcaklıkta bulk testi sonuçları

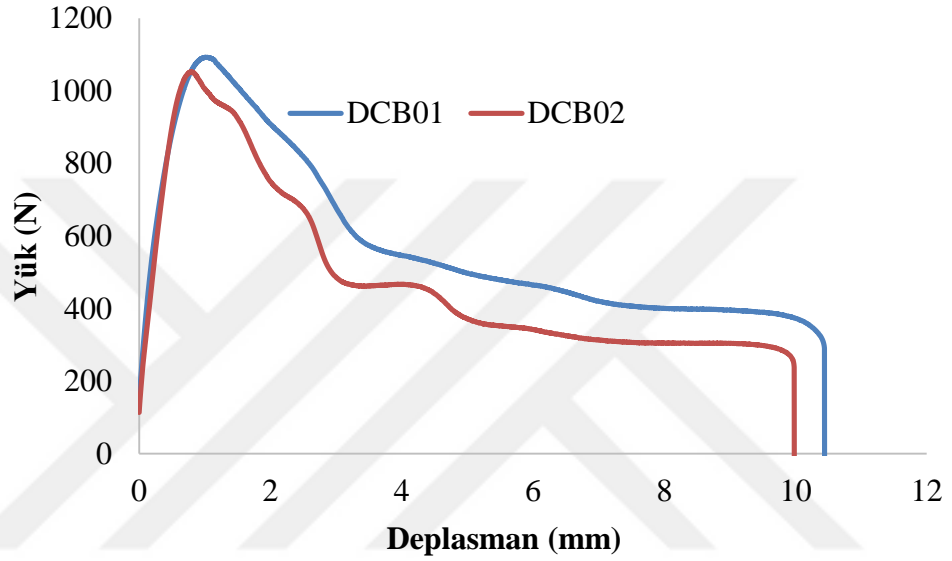
Bulk testi 50°C sıcaklık altında uygulanmıştır. Üçüncü numune mikro boşlukların bulunmasından dolayı dikkate alınmamıştır. 50°C sıcaklığın seçilmesinin sebebi, Gflex 655 yapıştırıcısının veri tablosuna göre cam dönüşüm sıcaklığı ( $T_g$ )'si 65°C olmasıdır. Literatüre göre yapıştırıcılar cam dönüşüm sıcaklığına yaklaşınca mekaniksel özelliklerini tamamen değiştirip amorf olmaya başlarlar, neticede kritik yüksek sıcaklık olarak cam dönüşüm sıcaklığının 15°C altında tutulması tavsiye edilir. Bu çalışmada 65°C'den 50°C'ye düşerek, yapıştırıcının mikro yapısal özelliklerini kaybetmeden nasıl bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

**Çizelge 7.3.** Epoksi-Gflex 655 50°C'de mekanik özellikleri

	Makine maksimum yükü	Hesaplanmış maksimum yük	Maksimum akma gerilmesi	Maksimum şekil değiştirme	Hesaplanmış young modülü	genişlik	kalınlık
	(N)	(N)	(MPa)	(mm/mm)	(MPa)	(mm)	(mm)
1	248,90	247,39	10,36	0,61158	127,88	9,95	2,4
3	212,14	211,31	10,36	0,5972	111,525	9,95	2,05
oran	230,52	229,35	10,36	0,6041	119,70	9,95	2,225

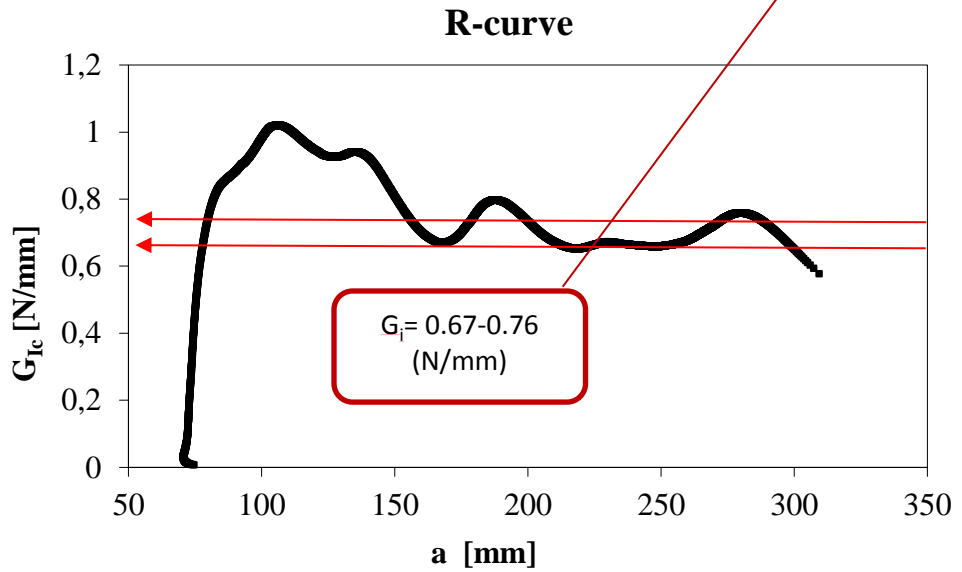
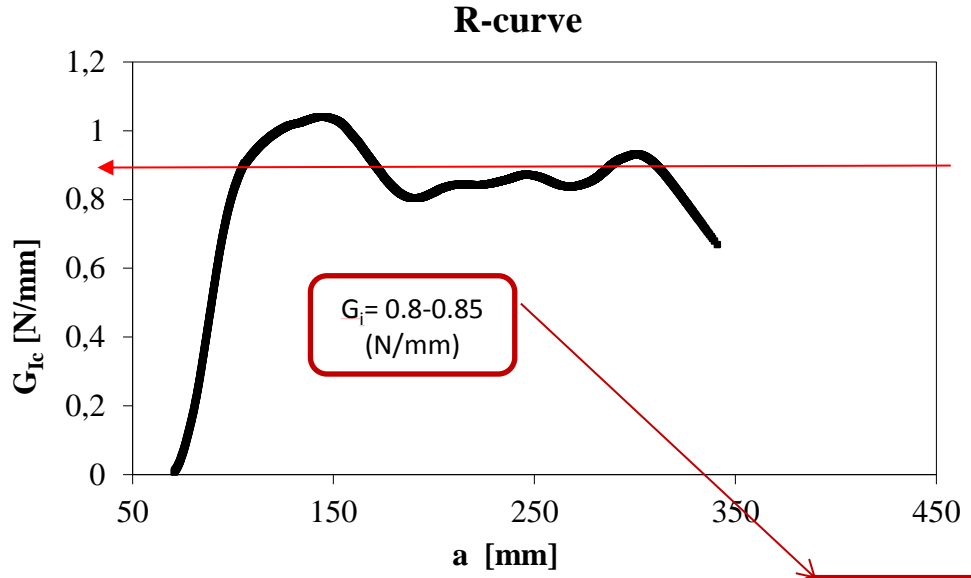
Önceki oda sıcaklığında yapılan bulk testlerinde olduğu gibi 50°C’de bulk test sonuçlarına göre Abaqus analizlerinin yapılması için gerekli olan mekanik özellikler çıkarılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan deneylerden elde edilenlere göre değerlerde kayda değer bir düşüş görülmüştür.

### 7.1.2.DCB test sonuçları



Şekil 7.3. DCB test sonuçları

Şekil 7.3’de y doğrultusunda yapıştırıcının hasara uğraması için ne kadar enerjiye ihtiyaç duyulduğunu bulmak için en çok uygulanan testlerden biri olan DCB testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyde 2 numenin sonuçları birilerine benzediği için deney sonuçları yeterli sayılmıştır.

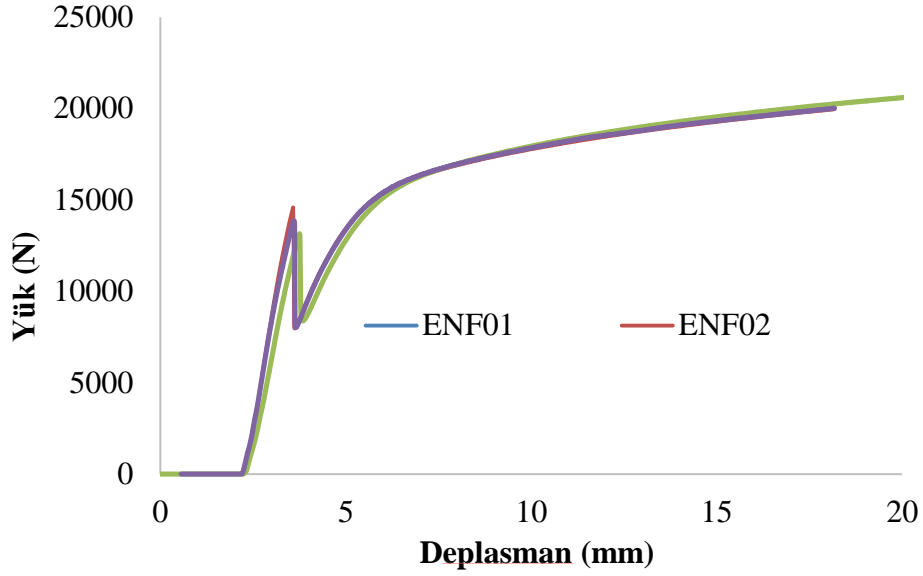


**Şekil 7.4.** DCB testi *R* eğrileri

Şekil 7.4’de DCB testlerden elde edilen  $P-\delta$  değerleri kullanarak literatürde anlatıldığı gibi uygulanan CBBM metoduyla birinci mod’taki kırılma enerjisinin *R*-eğrisi elde edilmiştir. Enerji değeri eğrinin plato yaptığı noktalar arasından çıkarılmıştır. 0,77 N/mm değeri bulunmuştur. Bazen birbirlerinden çok uzak platolar elde edilebilir bu durumda platoların hangisinin doğru olduğunu bilmek için daha önce yapılan makalelere bakılabilir ya da tahmin edilebilir. Örneğin eğer kullanılan yapıştırıcı

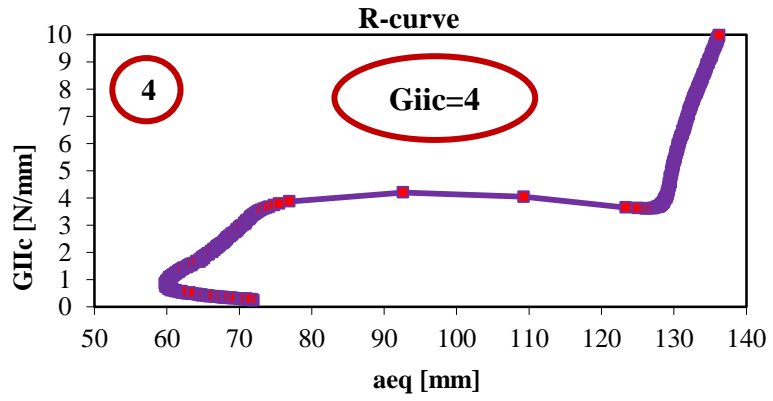
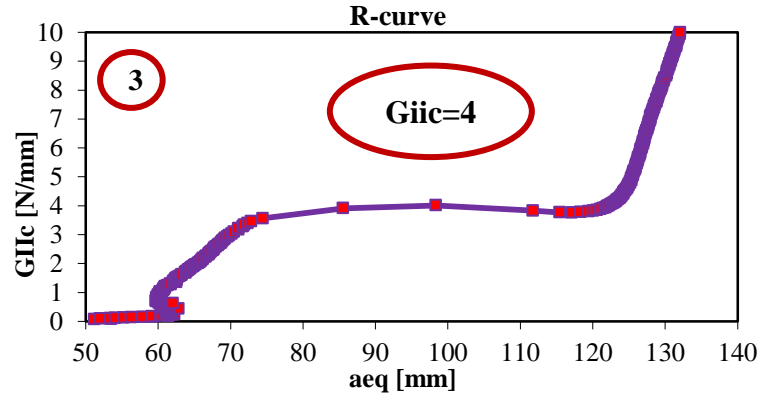
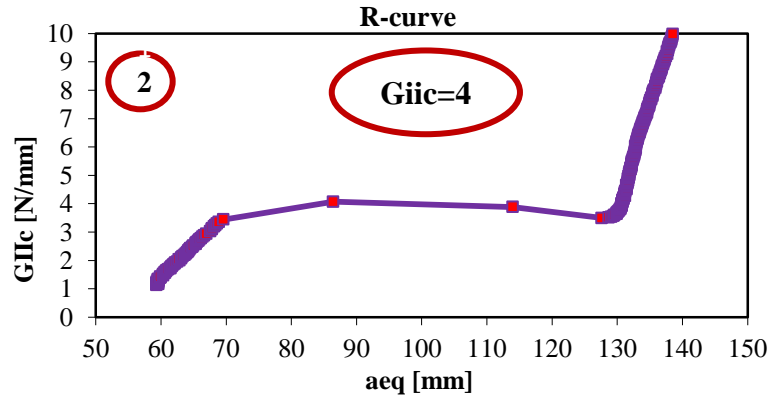
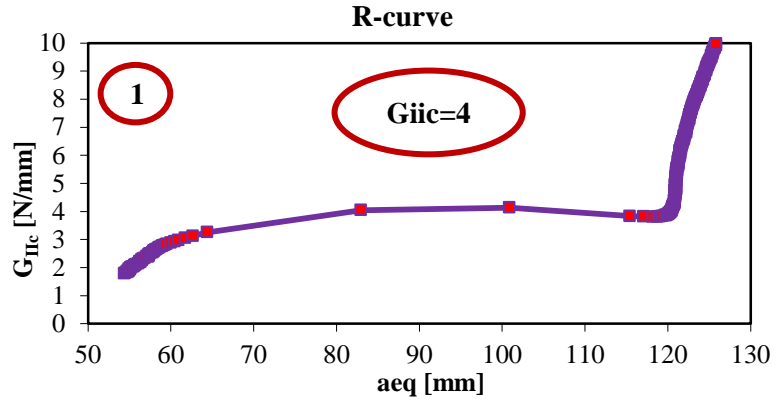
esnekse kırılma enerjisi yüksek olacağı bilindiği için elde edilen platolardan birisi düşük enerjiyi gösteriyorsa yanlışır demektir.

### 7.1.3.ENF Test sonuçları



Şekil 7.5. ENF testi sonuçları

İkinci mod'taki kırılma enerjisi bulmak için ENF (end notched flexure) testi uygulanmıştır. Dört numuneden de hemen hemen aynı eğriler elde edilmiştir. Eğriler şekil 7.5'de görüldüğü gibi sonsuza gidiyor ve numunelerde plastik şekil değiştirmeler olmuştur. Dikkate alınan veriler pikten sonraki en düşük verilere kadar, numuneler plastik şekil değişmeyi göstermeden öncedir.



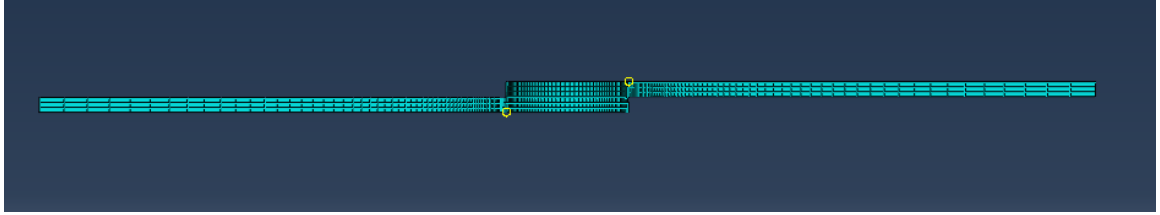
Şekil 7.6. ENF testi R eğrileri



Şekil 7.6’de  $R$ -eğrileri CBBM metoduyla elde edilmiştir. Plato hemen hemen tüm eğrilerde kolayca görülebileceği şekilde tam 4 N/mm değerinde oluşmuştur.

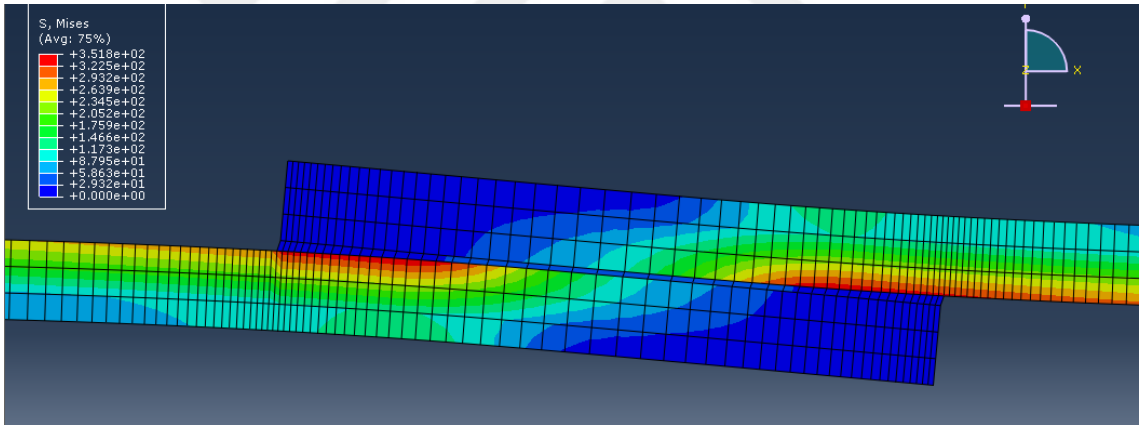
## 7.2 Sonlu Elemanlar Analizi Sonuçları

Oda sıcaklığı:



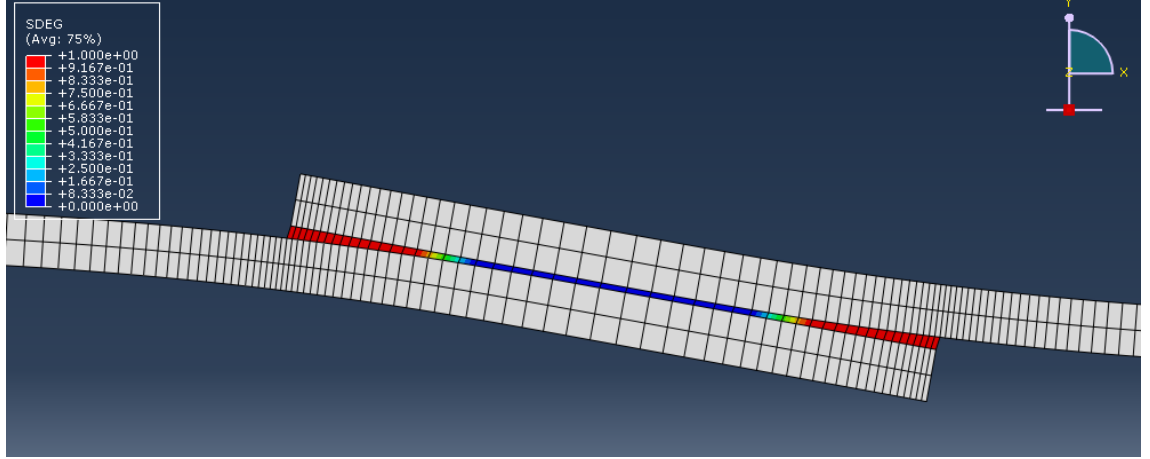
Şekil 7.7. Modelin ağ yapısı

Yapışma bölgesi COH2D4 eleman tipi, plaka malzemeleri CPS4R eleman tipi ile, 735 elemandan ve 920 düğüm noktasından oluşmaktadır.



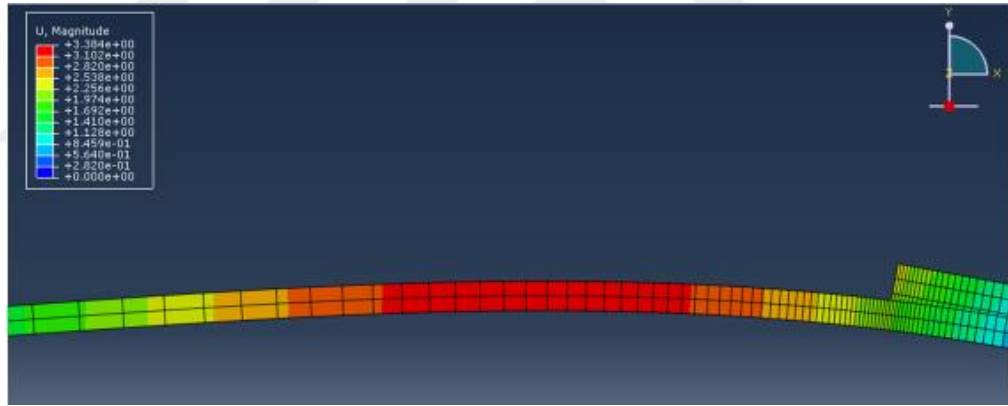
Şekil 7.8. SLJ testindeki Von-Mises gerilme dağılımı

Kullanılan 6013 alüminyumun akma gerilmesi 317 MPa olduğuna göre Şekil 7.8’de SLJ testindeki Von-Mises maksimum gerilmesi 351 MPa olduğu için yapışma tabakası hasara uğramadan önce plaka malzemesi plastik deformasyon göstermiştir.



**Şekil 7.9.** Yapıştırma tabakasının bindirme boyutu boyunca gerilme dağılımı

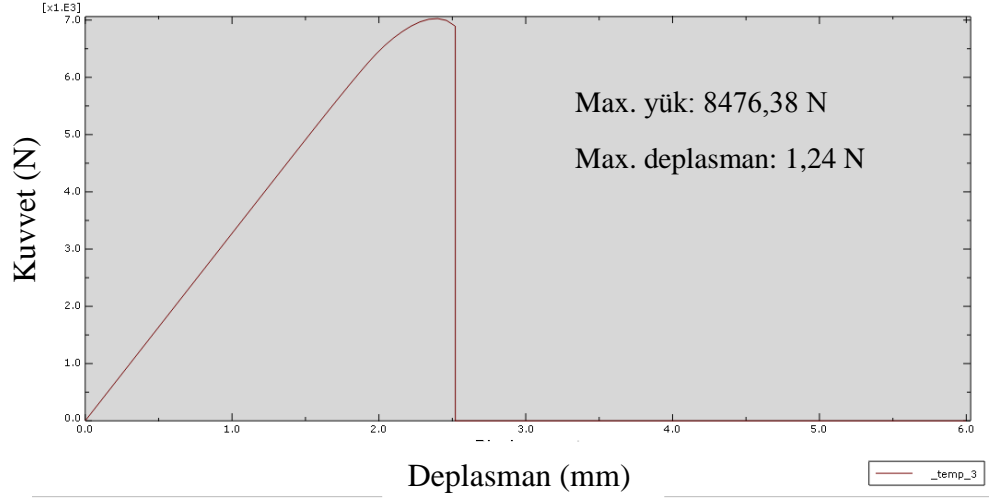
Şekil 7.9'de görüldüğü gibi gerilmeler bindirmenin boyunca yarısına kadar dağılmış durumda olduğu için çekme deneyinde yüksek mukavemet göstermiştir. Literatür kısmında anlatıldığı gibi yapıştırıcı esnek olduğu zaman gerilme dağılımından, rijit ve çok mukavemetli yapıştırıcılara göre daha dayanıklı olduğu görülmektedir.



**Şekil 7.10.** SLJ testi yer değiştirme sonuçları

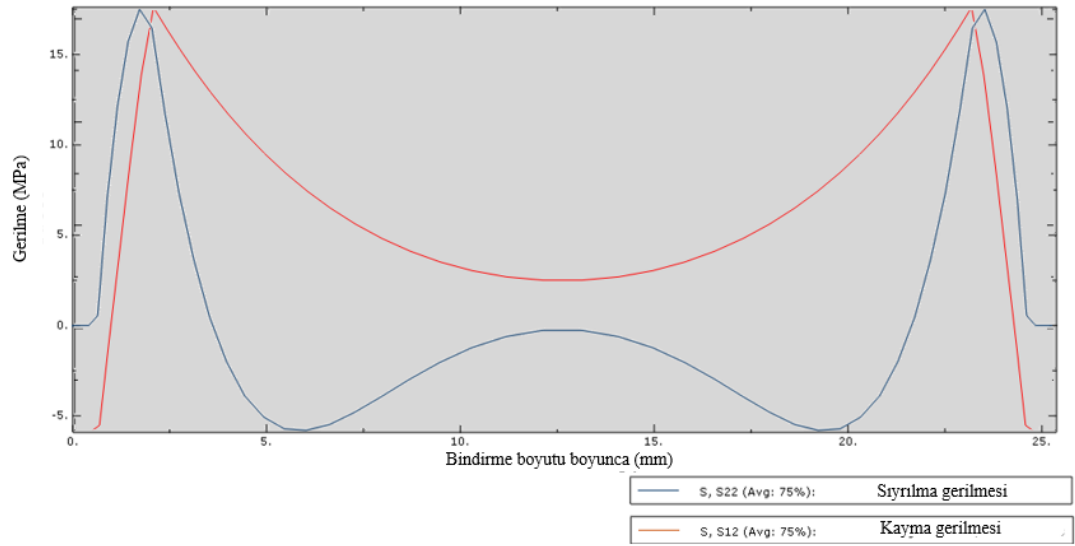
Plaka malzemenin gösterdiği plastik şekil değiştirmenin olduğu bölge önemlidir. Şekil 7.10'deki kırmızı bölgedeki plastik şekil değiştirme, yapıştırıcının rijitliğinden değil, alüminyumun sünekliğinden kaynaklanmaktadır.

Genelde amaç yapıştırıcıyı incelemek olduğu için SLJ testlerinde plaka malzemenin plastik şekil değiştirmesi istenmeyen bir durumdur. Böyle bir durumda hasarın malzemedan ya da yapıştırıcı kaynaklığı olduğu veya hangi parametrelerin hasarı başlattığı konusu tam olarak belirlenemez. Neticede alüminyum yerine çeliğin kullanılmasında fayda vardır.



**Şekil 7.11.** SLJ testi simülasyonu kuvvet-yer değiştirme grafiği

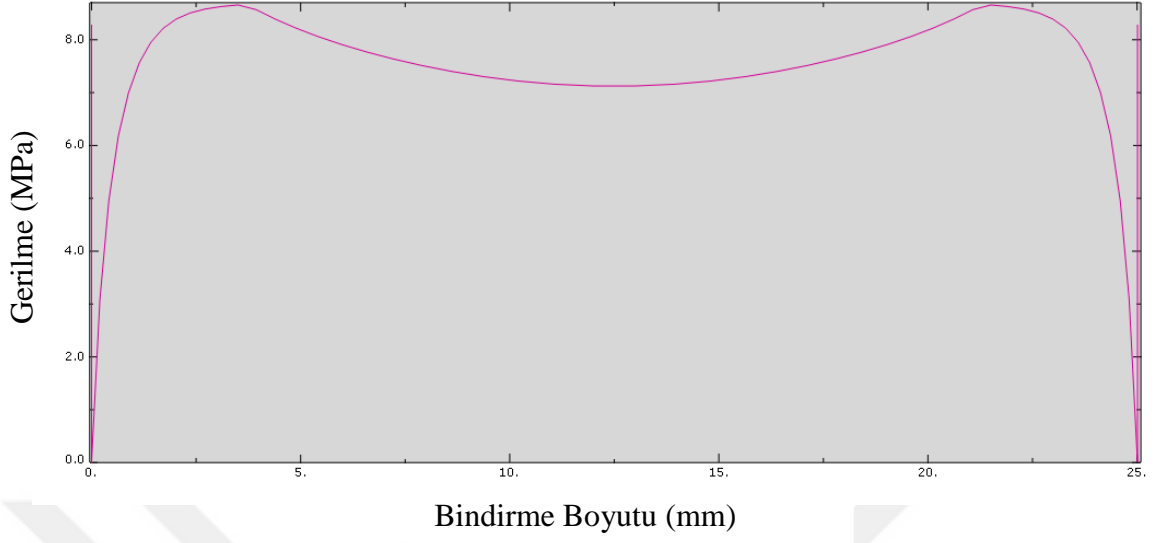
Sıyırılma ve kayma gerilmelerin olduğu bir model çekme-ayırma kanununa göre şekil 7.11’de olduğu gibi sonuç vermektedir. Modeli doğrulamak için başarılı bir gerçek SLJ testi sonuçlarının elde edilmiş olması gerekmektedir.



**Şekil 7.12.** Kayma ve Sıyırılma gerilmelerinin bindirme boyutu boyunca dağılımı

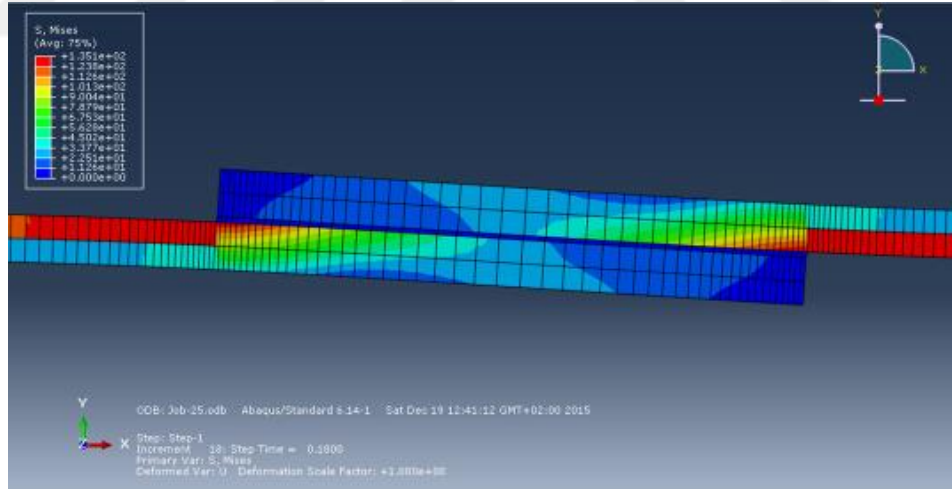
SLJ modelini karakterize eden faktörlerden biri, hem sıyırılmayı hem kaymayı içermesiyle birleşik bir durumu temsil etmesidir. Bunun için önce standartlara göre sıyırılmayı sonra kaymayı ayrı bir şekilde analiz ederek daha sonra ikisini birleştirip SLJ testinin analiz edilmesi tavsiye edilir.

50°C sıcaklığında;



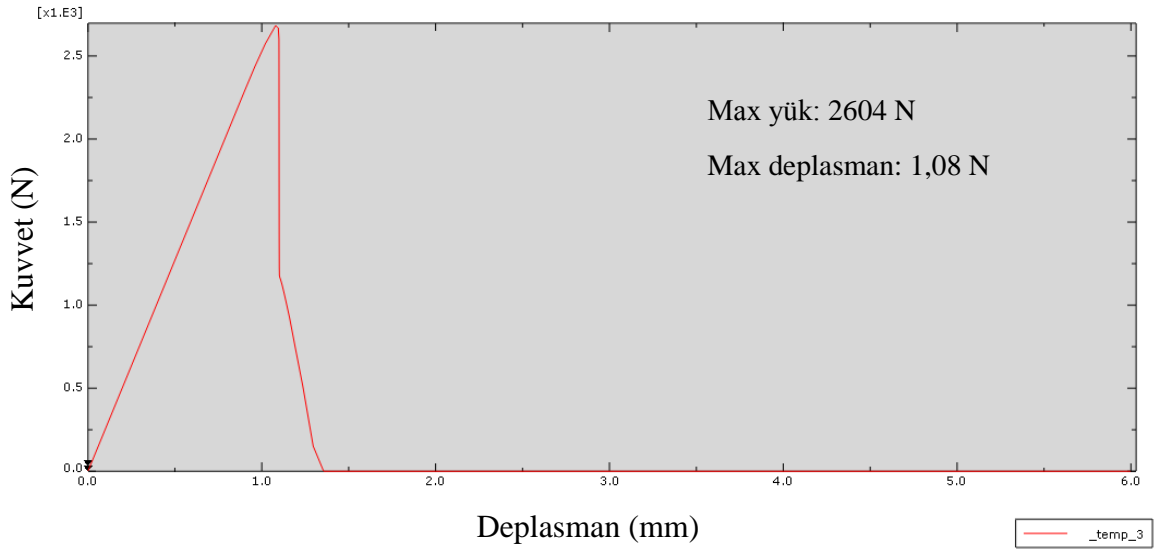
**Şekil 7.13.** Yapıştırma tabakasının bindirme boyutu boyunca Von-Mises gerilmesi dağılımı

50°C sıcaklığında şekil 7.13’de yapıştırıcının ne kadar esnediği görülmektedir.



**Şekil 7.14.** 50°C’DE SLJ testindeki eşdeğer(Von-Mises) gerilme dağılımı

Maksimum gösterilen akma gerilmesi 135 MPa olduğuna göre plaka malzemesi kaymadan yapıştırıcı hasara uğramıştır. Bu durumda yapıştırıcının saf davranışı incelenebilir.



**Şekil 7.15.** 50°C’de SLJ testi simülasyonu kuvvet-yer değiştirme grafiği

Yapıştırıcının  $T_g$ °C’sine yaklaşınca mekanik özellikleri temel olarak değişmese de şekil 7.15’de görüldüğü gibi kauçuk bir özellik göstermeye başlamıştır. Yapıştırıcının esnekliği bindirme dayanıklılığı ile artmaktadır fakat bu değerin aşılmaması için bir üst limiti vardır.

## 8. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında epoksi Gflex yapıştırıcısının mekanik özellikleri araştırıldı. Uludağ Üniversitesinde, Bursa Orhangazi Üniversitesi ve Porto Üniversitesinde testler yapılmıştır. Bazı yapıştırıcıların özelliklerinin araştırılması bazı araştırma laboratuvarlarında altı ay sürebilir, bu çalışmada o kadar uzun sürmese de kolay olmadığı söylenebilir, çünkü testlerde titizlik gerekir, en ufak hatadan dolayı yanlış sonuçlara ulaşılabilir. Bulk testleri oda sıcaklığında ve 50°C sıcaklığında başarıyla gerçekleştirilmiştir. Epoksi-Gflex yapıştırıcısının mekanik özellikleri belirlenmiştir. DCB testleri de başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcının sıyrılma mukavemeti incelenerek birinci mod da kırılma enerjisi CBBM analitik metoduyla bulunmuştur. Sonra ENF testleri de başarıyla gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcının kayma özellikleri incelenerek ikinci mod'daki kırılma enerjisi CBBM analitik metoduyla bulunmuştur. Genelde alüminyum kullanarak gerçekleştirilen SLJ testlerinde yapıştırıcının saf davranışı incelendiğinde kohezif hasarın oluşması zordur ayrıca elektro-kimyasal prosesin karmaşık ve zaman alıcı olduğu için alüminyum yerine çelik kullanılmaktadır. Fakat bu çalışma da çeliği kullanmadan alüminyumun yüzey işlemleri klasik aseton metoduyla hazırlanarak kohezif hasar elde edilmeye çalışılmıştır. Son olarak Bulk, DCB ve ENF testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak Abaqus® programıyla sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında, yapıştırıcı hasara uğramadan önce alüminyum plaka malzemesi plastik bölgeye girdiği için yapıştırıcının saf davranışı incelenememiştir. Ayrıca yapıştırıcı gerilmeleri düzgün bir şekilde bindirme boyunca dağılması için yeterince esnek değildir hem de plaka malzemesinin sünekliği plastik şekil değiştirmeye neden olmuştur.

Bu çalışmanın sonlu elemanlar analizi yapıştırıcının oda sıcaklığında ve 50°C'de bulk testten elde edilen young modülü ve kayma modülü kullanılıp çizelge 7.2'de gösterilen denklem uygulanarak yapılmıştır. Hâlbuki sonlu elemanlar analizinin daha gerçekçi sonuçlar vermesi için TAST testinden edilen verilerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Da Silva ve ark 2012). Aynı testten, hasar başlangıcındaki gerilme değerlerinin bulunması, 50°C sıcaklığında DCB ve ENF testlerin yapılması, tasarlanmış ve kullanıma hazır olan mixed mod aparatıyla yapıştırıcının mixed mod hasar değerlerin bulunması beklenmektedir.

Gflex 655 yapıştırıcısı bahsedildiği gibi alüminyuma yapıştırıldığında kohezif hasarın oluşması için yüzey hazırlanması elektro-kimyasal proses ile yapılması gerekmektedir. Fakat bu çalışmada gerçekleştirilmiş olan DCB ve ENF testlerinde kohezif hasar görülmüştür. Dolayısıyla bu durum diğer kullanılan yapıştırıcılara kıyasla özel sayılabilir. Bu çalışmadan çıkarılan sonuçlara göre Gflex 655 yapıştırıcısı ile yüzey hazırlama işlemleri ve numune boyutları ile ilgili bir çalışma yapılması önerilmektedir.



## 9. KAYNAKLAR

**Altındağ, R., Şengün, N. 2010.** Kayaçların kırılma tokluğu (Mod I) ile fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi. Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Dergisi 31(2): 127-140.

**Banea, M.D., Da Silva, L.F.M., Campilho, R.D.S.G. 2011.** Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: Experimental and numerical study. International Journal of Adhesion and Adhesives 31(5): 273-279.

**Biel, A., Carlberger T. 2007.** Influence of temperature on cohesive parameters for adhesives. Proceedings of the 28th Risø international symposium on materials science, 3-6 September, Sweden.

**Banea, M.D., Da Silva, L.F.M. 2010.** The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry. Journal of materials design and applications 224(2): 51-62.

**Carbas, R.J.C., Da Silva, L.F.M., Critchlow, G.W. 2014.** Adhesively bonded functionally graded joints by induction heating. International Journal of Adhesion and Adhesives 48: 110-118.

**Da Silva, L.F.M., Adams, R.D., Grant, L.D.R. 2009.** Experimental and Numerical Analysis of Single-Lap Joints for the Automotive Industry. International Journal of Adhesion and Adhesives, 29(04): 405-413.

**Da Silva, L.F.M., Dillard, D.A., Blackman, B., Adams, R.D. 2012.** Testing Adhesive Joints: Best Practices. Wile-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany.

**Demir, H. 2013.** Kompozit yapıların sonlu elemanlarda alt modellenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, AKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon.

**De Moura, M.F.S.F., Campilho, RD.S.G., Gonçalves, J.P.M. 2009.** Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. International Journal of Solids and Structures 46(6): 1589-1595.

**De Moura, M.F.S.F., Morais, J.J.L., Dourado, N. 2008.** A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test. Engineering Fracture Mechanics 75: 3852-3865.

**Filipe, J.P.C 2013.** Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints. *Doctorate Thesis*, Faculty of Mechanical Engineering, Porto University, Portugal.



- Grant, L.D.R., Adams, R.D., Da Silva, L.F.M. 2009.** Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(5): 535-542.
- Hu, P., Han, X., Li, W.D., Li, L., Shao, Q. 2013.** Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subjected to extreme temperature environment for automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 41: 119-126.
- Marinucci G., Quini J.G. 2012.** Polyurethane Structural Adhesives Applied in Automotive Composite Joints. *Materials Research* 15(3): 1516-1439.
- Marques, E.A.S., Banea, M.D., Da Silva, L.F.M., Carbas, R.J.C., Sato C. 2016.** Effect of Low Temperature on Tensile Strength and Mod I Fracture Energy of a Room Temperature Vulcanizing Silicone Adhesive. *Journal of Testing and Evaluation* 44(3): 1-12.
- Mata, R.A. 2014.** Impact of adhesive joints for the automotive industry at low and high temperatures. *Master Thesis*, Faculty of Mechanical Engineering, Porto University, Portugal.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Salim YAGOUB  
Doğum Yeri ve Tarihi : Ben izgen/Cezayir 29/03/1986  
Yabancı Dili : Fransızca, İngilizce, Türkçe

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ramdan Hamoud Teknik Lisesi (2004)  
Lisans : University of Science and Technology Mechanical  
Engineering Faculty Material Science Department  
(2005-2008)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,  
Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2012  
İletişim(e-posta) : Saly47011@gmail.com