

**T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS**

**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ DARBE YÜKLERİ  
ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Abdullah YILDIZ**

**Danışman:Prof. Dr. Adnan ÖZEL**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN  
2021**

**Her Hakkı Saklıdır.**

---

## ÖZET

Yüksek Lisans

### YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ DARBE YÜKLERİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Abdullah YILDIZ

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Son yıllarda otomotiv ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan yapıştırma bağlantıları ağırlık, farklı ve karmaşık malzemelerin birleştirilmesi gibi birçok avantajlar sağlamaktadır. Bu çalışma da tek tesirli bindirme yapıştırma bağlantıları darbe yükleri altında sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının ve bindirme uzunluğunun bağlantıdaki yapıştırıcının kopma yüküne nasıl etki ettiği gözlemlenmiştir. 10 farklı yapıştırıcı tabakası kalınlığı (0.1-1 mm) ve 3 farklı yapıştırıcı bindirme uzunluğu (20-25-30 mm) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar metodu ile yapılan çalışmalarda yapıştırıcının bulunduğu bölge Kohezif Bölge Modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Analizde darbe hızı 6 m/s, darbe enerjisi 90 J ve darbe süresi 10 ms olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın sonucunda yapıştırıcı kalınlığının ve bindirme uzunluğunun yapıştırıcının kopma yükü dayanımına etki eden parametreler olduğu gözlemlenmiştir. Bindirme uzunluğundaki artışın, kopma yükünü %29.5 arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Yapıştırıcı kalınlığının etkisi ise değişkenlik göstermekle beraber maksimum % 7.45 lik bir etki gösterdiği görülmüştür.

**2021,81 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Darbe, Kohezif Bölge Modeli, Sonlu Elemanlar Metodu, Tek tesirli bindirme, Yapıştırıcılar

## ABSTRACT

Master Thesis

### AN INVESTIGATION OF ADHESIVELY BONDED JOINTS BEHAVIOR UNDER IMPACT LOADS

Abdullah YILDIZ

Erzincan Binali Yıldırım University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Bonded joints frequently used in the automotive and aviation industry in recent years provide many advantages such as reduced weight, possibility combine different and complex materials. In this study, the single lap joints were examined under the impact loads by using the finite element method. It has been observed how the thickness of the adhesive and the overlap length affect the failure load of the adhesive joint. 10 different adhesive layer thicknesses and 3 different adhesive overlap lengths were used. In these studies Cohesive Zone Model was used for adhesive layer. In the analysis, the impact velocity is 6m/s, the impact energy is 90J and the impact time is 10ms.

As a result of this study, it has been observed that the thickness and overlap length of the adhesive are the parameters affecting the failure load of the adhesive. It was concluded that the increase in thrust overlap length increased the failure load by 29.5%. The effect of adhesive thickness varies, but it is observed that it shows a maximum effect of 7.45%.

**2021,81 Pages**

**Keywords:** Adhesives, Cohesive Zone Model, Finite Element Method, Impact Load, Single Lap Joint.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışma konusunu bana önererek, çalışmamın her aşamasında her konuda destek veren, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, düzenli ve disiplinli bir şekilde çalışmayı öğreten değerli danışman hocam Sayın Prof.Dr.Adnan ÖZEL’e ve ayrıca maddi ve manevi mesafe gözetmeksizin her zaman yanımda olan bütün bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlilerinden Sayın Salim ÇAM hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her konuda olduğu gibi tez çalışmam sürecinde de desteklerini ve yardımlarını eksik etmeyen anneme, babama, tüm aileme ve arkadaşlarıma sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmanın da akademik konuda diğer araştırmacılara iyi bir kaynak olmasını temenni eder ve araştırmalarından yaralandığım bütün araştırmacılara teşekkür ederim.

Abdullah YILDIZ

Şubat, 2021

## İÇİNDEKİLER

|                                                           | Sayfa      |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| <b>ÖZET.....</b>                                          | <b>i</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                     | <b>ii</b>  |
| <b>TEŞEKKÜR .....</b>                                     | <b>iii</b> |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                                  | <b>iv</b>  |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>                              | <b>vi</b>  |
| <b>TABLolar LİSTESİ.....</b>                              | <b>ix</b>  |
| <b>SİMGELER ve KISALTMALAR .....</b>                      | <b>x</b>   |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                      | <b>1</b>   |
| <b>2. LİTERATÜR BİLGİSİ.....</b>                          | <b>3</b>   |
| <b>3. KURAMSAL TEMELLER.....</b>                          | <b>12</b>  |
| 3.1. Metal Birleştirme Teknikleri .....                   | 12         |
| 3.1.1. Mekanik birleştirme .....                          | 13         |
| 3.1.2. Termal birleştirme .....                           | 13         |
| 3.1.3. Yapıştırma ile birleştirme.....                    | 13         |
| 3.2. Yapıştırma Bağlantıları .....                        | 14         |
| 3.2.1. Yapıştırma bağlantılarında yapışma teorisi.....    | 14         |
| 3.2.1.1.Difüzyon teorisi.....                             | 14         |
| 3.2.1.2.Adsorbsiyon teorisi .....                         | 14         |
| 3.2.1.3.Mekanik tutunma teorisi .....                     | 15         |
| 3.2.1.4.Elektrostatik teori .....                         | 15         |
| 3.2.1.5.Yapışma ek yerinde kopma ve hasar türleri.....    | 17         |
| 3.2.2. Yapıştırma bağlantı tipleri.....                   | 19         |
| 3.2.3. Yapıştırma bağlantılarında gerilme çeşitleri ..... | 21         |
| 3.2.4. Yapıştırıcı çeşitleri .....                        | 22         |
| a-) Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar .....       | 22         |
| b-) Formları açısından yapıştırıcılar.....                | 24         |
| 3.3. Darbe .....                                          | 24         |
| 3.3.1. Darbe test yöntemleri .....                        | 26         |

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.1.1.Çentik darbe testleri .....                               | 26        |
| 3.3.1.2.Ağırlık düşürme testleri.....                             | 28        |
| 3.4. Kohezif Bölge Modeli .....                                   | 30        |
| 3.4.1.Traction - separation law (Çekme - ayrılma kanunu).....     | 33        |
| <b>4. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                                 | <b>35</b> |
| 4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....                                | 35        |
| 4.2. Analizde Kullanılacak Malzemelerin Mekanik Özellikleri ..... | 35        |
| 4.3. ABAQUS Programında CZM Uygulaması.....                       | 36        |
| 4.3.1.Hasar başlangıcı.....                                       | 37        |
| 4.3.2.Hasar ilerlemesi .....                                      | 38        |
| 4.3.2.1 Enerjiye dayalı hasar ilerlemesi .....                    | 38        |
| 4.3.2.2 Efektif deplasmana dayalı hasar ilerlemesi.....           | 39        |
| 4.4.ABAQUS Programında Analizin Uygulanması.....                  | 39        |
| <b>5. BULGULAR .....</b>                                          | <b>57</b> |
| <b>6. SONUÇLAR.....</b>                                           | <b>76</b> |
| <b>7. ÖNERİLER.....</b>                                           | <b>77</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                            | <b>78</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Termal, mekanik ve yapıştırıcı (Çitil, 2012) .....                                                                                                      | 12 |
| Şekil 3.2.Yapıştırıcı ve malzeme yüzeylerinden moleküllerin difüzyonu a) yapıştırıcı molekülleri b) malzeme molekülleri (Özenç, 2014).....                         | 14 |
| Şekil 3.3. Mekanik tutunma teorisi (Yang, Gu, & Gibson, 2001) .....                                                                                                | 15 |
| Şekil 3.4.Elektrostatik teori (Özenç, 2014).....                                                                                                                   | 16 |
| Şekil 3.5.Adhezyon ve kohezyon kuvvetleri (Çitil, 2012).....                                                                                                       | 16 |
| Şekil 3.6.Temel hasar türleri (Özenç, 2014) .....                                                                                                                  | 19 |
| Şekil 3.7.Tek taraflı bindirme bağlantısı.....                                                                                                                     | 20 |
| Şekil 3.8. Pahlı bindirme bağlantısı .....                                                                                                                         | 20 |
| Şekil 3.9. Alın bağlantısı.....                                                                                                                                    | 20 |
| Şekil 3.10. Tek destek elemanlı bağlantı .....                                                                                                                     | 20 |
| Şekil 3.11. Çift destek elemanlı bağlantı .....                                                                                                                    | 21 |
| Şekil 3.12. Eğimli çift destek elemanlı bağlantı .....                                                                                                             | 21 |
| Şekil 3.13. Çift tesirli bindirme bağlantısı .....                                                                                                                 | 21 |
| Şekil 3.14. Basamaklı bindirme bağlantısı .....                                                                                                                    | 21 |
| Şekil 3.15.Gerilme çeşitleri (Cowdrey et al., 1998) .....                                                                                                          | 22 |
| Şekil 3.16.Yük-çökme eğrisi .....                                                                                                                                  | 25 |
| Şekil 3.17.Darbe problemleri için farklı analitik yaklaşımlar .....                                                                                                | 25 |
| Şekil 3.18. Çentik darbe deneyinin şematik çalışma prensibi .....                                                                                                  | 26 |
| Şekil 3.19. Charpy darbe testi.....                                                                                                                                | 27 |
| Şekil 3.20. İzod darbe testi.....                                                                                                                                  | 28 |
| Şekil 3.21. Düşük hızlı darbe deney düzeneği.....                                                                                                                  | 28 |
| Şekil 3.22.Ağırlık düşürme testi düzeneği şematik gösterimi 1) magnet, 2) ağırlık ve vurucu uç, 3) numune tutucu, 4) numune (Akın, 2008).....                      | 29 |
| Şekil 3.23.Gaz tabancası deney düzeneği şeması 1) hava filtresi, 2) basınç regülatörü, 3)hava tankı, 4)vana, 5) boru, 6) hız ölçüm cihazı, 7) örnek (Akın, 2008).. | 30 |
| Şekil 3.24. Kırılma modları .....                                                                                                                                  | 30 |
| Şekil 3.25. DCB (Double Cantilever Beam) testi (Ranaweera, 2010).....                                                                                              | 32 |
| Şekil 3.26.3ENF (Three End Notched Flexure) testi (Ranaweera, 2010) .....                                                                                          | 32 |
| Şekil 3.27.MMB (Mixed Mode Bending) testi (Ranaweera, 2010) .....                                                                                                  | 32 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.28. Çekme-ayrılma kanunu gösterimi (Noorman, 2014).....                       | 33 |
| Şekil 3.29. Bilineer çekme-ayrılma eğrisi(Korkut, 2017).....                          | 34 |
| Şekil 3.30.Trapezoid çekme-ayrılma eğrisi(Korkut, 2017) .....                         | 34 |
| Şekil 3.31. Üstel çekme-ayrılma eğrisi(Korkut, 2017) .....                            | 34 |
| Şekil 4.1. Al7075 ve DP460 gerilme-gerinim grafikleri (Çam, 2016). ....               | 36 |
| Şekil 4.2.Çekme ve ayrılma kanunu (Korkut, 2017) .....                                | 37 |
| Şekil 4.3.Darbe yükü altındaki tek tesirli bindirme bağlantısı.....                   | 40 |
| Şekil 4.4.Tek tesirli bindirme bağlantısı ölçüleri.....                               | 40 |
| Şekil 4.5.Parçaları oluşturma .....                                                   | 42 |
| Şekil 4.6.Alüminyum malzeme özellikleri .....                                         | 43 |
| Şekil 4.7. Yapıştırıcı malzeme özellikleri.....                                       | 44 |
| Şekil 4.8.Hasar başlangıç değerleri.....                                              | 45 |
| Şekil 4.9. Hasar ilerlemesi değerleri.....                                            | 46 |
| Şekil 4.10.Yapıştırıcı ve alüminyum için kesit oluşturma.....                         | 46 |
| Şekil 4.11. Vurucu kütlesi belirlenmesi.....                                          | 47 |
| Şekil 4.12. Montaj oluşturma.....                                                     | 48 |
| Şekil 4.13.Analiz tipi belirlenmesi.....                                              | 48 |
| Şekil 4.14.Yapıştırıcı ve alüminyum parçaları arasındaki ilişkinin belirlenmesi ..... | 49 |
| Şekil 4.15.Parçalar arası ilişkilerin belirlenmesi .....                              | 50 |
| Şekil 4.16.Sürtünme katsayısının girilmesi .....                                      | 50 |
| Şekil 4.17.Sınır şartları .....                                                       | 51 |
| Şekil 4.18. Vurucu hızı belirlenmesi.....                                             | 51 |
| Şekil 4.19.Sınır şartları ve yükleme.....                                             | 52 |
| Şekil 4.20. Üst tutucuların sınır şartları gösterimi .....                            | 52 |
| Şekil 4.21.Mesh kalite .....                                                          | 53 |
| Şekil 4.22.Mesh boyutu .....                                                          | 54 |
| Şekil 4.23. Yapıştırıcı eleman tipi seçimi .....                                      | 55 |
| Şekil 4.24.Modeli elemanlara bölme işlemi .....                                       | 56 |
| Şekil 4.25. a-) İş oluşturma b-) Çözüm monitörü .....                                 | 56 |
| Şekil 5.1. 0.1 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....       | 57 |
| Şekil 5.2.0.1 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....        | 58 |
| Şekil 5.3.0.1 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....        | 58 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.4.0.2 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 59 |
| Şekil 5.5.0.2 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 59 |
| Şekil 5.6.0.2 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 60 |
| Şekil 5.7.0.3 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 60 |
| Şekil 5.8.0.3 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 61 |
| Şekil 5.9.0.3 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 61 |
| Şekil 5.10. 0.4 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 62 |
| Şekil 5.11.0.4 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....  | 62 |
| Şekil 5.12.0.4 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....  | 63 |
| Şekil 5.13.0.5 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....  | 63 |
| Şekil 5.14. 0.5 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 64 |
| Şekil 5.15. 0.5 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 64 |
| Şekil 5.16.0.6 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....  | 65 |
| Şekil 5.17. 0.6 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 65 |
| Şekil 5.18. 0.6 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 66 |
| Şekil 5.19. 0.7 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 66 |
| Şekil 5.20. 0.7 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 67 |
| Şekil 5.21. 0.7 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 67 |
| Şekil 5.22. 0.8 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 68 |
| Şekil 5.23. 0.8 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 68 |
| Şekil 5.24. 0.8 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 69 |
| Şekil 5.25. 0.9 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 69 |
| Şekil 5.26. 0.9 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 70 |
| Şekil 5.27. 0.9 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti ..... | 70 |
| Şekil 5.28. 1 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 71 |
| Şekil 5.29. 1 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 71 |
| Şekil 5.30. 1 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti .....   | 72 |
| Şekil 5.31. 20 mm bindirme uzunluğu için değerler.....                           | 73 |
| Şekil 5.32.25 mm bindirme uzunluğu için değerler.....                            | 73 |
| Şekil 5.33. 30 mm bindirme uzunluğu için değerler.....                           | 74 |
| Şekil 5.34. 4 m/sn'lik hızın temas kuvvetine etkisi .....                        | 74 |
| Şekil 5.35.2 m/sn'lik hızın temas kuvvetine etkisi .....                         | 75 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> Kopma türleri (Cowdrey et al., 1998) .....                                | 17 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Kopmanın sebepleri (Cowdrey et al., 1998) .....                           | 18 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Al7075 malzemesinin mekanik özellikleri (Çam, 2016) .....                 | 36 |
| <b>Tablo 4.2.</b> DP460 yapıştırıcısının mekanik özellikleri (Durmuş & Akpınar, 2020) ..... | 36 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Hasar başlangıcı .....                                                    | 37 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Hasar ilerlemesi.....                                                     | 38 |
| <b>Tablo 4.5.</b> Yapıştırıcı kalınlıkları ve bindirme uzunlukları.....                     | 41 |
| <b>Tablo 4.6.</b> DP 460 yapıştırıcısı CZM parametreleri (Akpınar & Özel, 2019) .....       | 44 |
| <b>Tablo 4.7.</b> Eleman tipleri.....                                                       | 54 |
| <b>Tablo 5.1.</b> Analiz sonuçları (Temas kuvveti) .....                                    | 72 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

|                  |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| $\alpha$         | Sarkaç Düşme Açısı                   |
| $\beta$          | Sarkaç Yükselme Açısı                |
| $\epsilon_I$     | Açılma Modu Gerinimi                 |
| $\epsilon_{II}$  | Kayma Modu Gerinimi                  |
| $\epsilon_{III}$ | Yırtılma Modu Gerinimi               |
| $\sigma_n^{max}$ | Açılma Modu Nominal Gerilme          |
| $\tau_t^{max}$   | Kesme Ve Yırtılma Nominal Gerilme    |
| $A$              | İvme (m/s <sup>2</sup> )             |
| $E$              | Elastisite (Young) Modulü            |
| $F$              | Kuvvet (N)                           |
| $G$              | Yerçekim İvmesi(m/s <sup>2</sup> )   |
| $G_C$            | Kritik Kırılma Enerjisi              |
| $G_I$            | Açılma Modu Kırılma Enerjisi         |
| $G_{II}$         | Kayma Modu Kırılma Enerjisi          |
| $G_{III}$        | Yırtılma Modu Kırılma Enerjisi       |
| $H$              | Sarkaç ağırlık merkezine uzaklık (m) |
| $L$              | Sarkaç Uzunluğu (m)                  |
| $M$              | Kütle (kg)                           |
| $P$              | Potansiyel Enerji                    |
| $T$              | Süre (s)                             |
| $T_{maks}$       | Maksimum Çekme                       |
| $V$              | Vurucu Hızı (m/s)                    |
| $\nu$            | Poisson Oranı                        |

## Kısaltmalar

|      |                                              |
|------|----------------------------------------------|
| 3ENF | Three End Notched Flexure                    |
| BK   | Benzeggagh and Kenane                        |
| CZM  | Cohesive Zone Modelling/Kohezif Bölge Modeli |
| DCB  | Double Cantilever Beam                       |
| MMB  | Mixed Mode Bending                           |
| PVA  | Polyvinyl Acetates                           |
| SEM  | Sonlu Elemanlar Methodu                      |
| SLJ  | Single Lap Joint                             |



## 1. GİRİŞ

İnsanoğlu yaşamı boyunca kullandığı araç ve gereçleri genellikle birkaç malzemeyi bir araya getirerek, montaj yaparak oluşturmuştur. Örneğin yüzyıllardır kullanılan, ağaç kesmek için yararlanılan bir balta bile; balta ucu ve balta sapının bir araya gelmesiyle oluşmuştur. Sanayinin oluşması ve gelişmesiyle birlikte parçaları bir arada tutacak, birlikte çalışmasını sağlayacak birçok bağlantı yöntemi geliştirilmiştir. Otomotiv sektöründen mobilyacılığa, inşaat sektöründen beyaz eşyaya birçok alan da bu bağlantı yöntemleri kullanılmış, kullanılıyor ve kullanılmaya devam edecektir. Vidalama, perçinleme, kaynak, lehim ve son yıllar da her alanın dikkatini çekmiş yapıştırıcılar bu bağlantı yöntemleri arasında en önemlileri olarak sayılabilirler. Her zaman kullanılan ve kullanılmaya devam edilecek olan bu bağlantı yöntemleri araştırmacıların oldukça dikkatini çekmiştir. Araştırma ve geliştirme konularında bilim ve teknoloji dünyasında önemli bir yere sahip olmuşlardır. Araştırmacıların araştırmaları sonucunda mühendislik uygulamalarında kullanılan mekanik birleştirme ve termal birleştirme bağlantı yöntemlerinin dezavantajları bulunmuş ve geliştirmek amacıyla yeni bir bağlantı yöntemi olan yapısal yapıştırıcıların kullanılmasının önü açılmıştır. Yapısal yapıştırıcılar ilk olarak ağırlık yönündeki büyük avantajlarından dolayı havacılık sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Havacılık sektöründe ince malzemelerin birleştirilmesi, farklı malzemelerin birbirleriyle olan bağlantısında yapısal yapıştırıcıların göstermiş olduğu olumlu etkiler diğer alanlarda da dikkat çekmiştir. Çevre kirliliği ve ekonomik olarak kazanç elde etmek adına yapıştırıcılar uzay, havacılık, otomotiv gibi sektörlerde son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe bir aracın hafif olması demek yakıt tasarrufuna ve dolayısı ile yakıtın yanmasından sonra çevreye atılacak olan CO<sub>2</sub> gazının azalmasını sağlamak anlamına gelmektedir. Yapıştırıcıların ağırlık açısından yararının yanında farklı tip malzemelerin birleşmesinde de bizlere önemli bir kolaylık sağlamaktadır. Örneğin alüminyum ve çelik malzemesini birleştirmemiz gereken yerlerde son yıllardaki çalışmalar kaynak yapmamızı mümkün kılarsa da, şuan ki bizim teknolojilerimizle mümkün olmaz. Bizlere vidalamanın yanında büyük bir alternatif yol olmaktadır. Yapıştırıcıların bu avantajlarının yanında, sızdırmazlık elemanı, titreşim sönmüleme kapasitesinin olması, karmaşık geometriye sahip malzemelerin kolayca birleştirilmesi, yüzey pürüzlülüğü olarak daha temiz yüzeyler elde etmemizi sağlaması da mühendislikte istenilen özelliklerdir. Yapıştırıcılar mukavemet ve rijitlik yönlerinden de diğer bağlantı yöntemlerine göre başarısı son yıllarda ilgi odağı olmasının hakkını vermektedir.

Özellikle bağlantı noktalarında yapıştırıcıların kullanılması gerilmelerin vida ve perçinleme bağlantısına göre daha homojen bir şekilde yayılımını sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında yapıştırıcıların darbe yükleri altındaki davranışları sonlu elemanlar metodu yardımıyla incelenecektir. Yapıştırıcıların bindirme uzunlukları ve kalınlıklarının darbe davranışları altında yapıştırma bağlantısına etkileri analiz edilecektir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının sonlu elemanlar analizi için, sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS isimli programın Explicit Dynamics paketi kullanılacaktır. Darbe davranışı oluşturmak için düşük hızlı darbe testleri referans alınıp gerekli vurucu, sınır şartları ve yüklemeler yapılacaktır. Darbe altındaki tek tesirli bindirme bağlantısında yapıştırıcının etkilerini daha iyi gözlemlemek adına Kohezif Bölge Modeli (CZM) yapıştırıcıya tanımlanarak analiz yapılacaktır.

Bu çalışmanın kapsamı, yapıştırıcıların statik yüklerin yanında dinamik yüklerdeki başarısı ve kullanılabilirliği ile otomotiv, havacılık, uzay ve birçok sanayi alanında diğer bağlantı elemanlarına alternatif bir yöntem olmasını sağlamaktır. Bu çalışmanın sonunda sonuçların mühendisler, araştırmacılar ve tasarımcılar açısından önemli bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİSİ

Malzemelerin yapıştırılma işlemi, ilkel kabilelerin kırılan parçalarını, ağaç özsuyundan elde ettikleri reçineleri kullanarak yapıştırmasıyla başlamaktadır. Arkeologların yaptıkları bu çalışmalarda malzemeleri bir arada tutmak için kullanılan bu yöntemin M.Ö. 4000 yıllarına kadar dayandığı gözlemlenmiştir. 18.yüzyılda hayvan derilerinden üretilen yapıştırıcılar ve bu konuda ilk ticari fabrikanın Hollanda’da kurulmasıyla, yapıştırıcıların kullanılması yaygınlaşmıştır (Tın, 2006).

Hayvansal ve bitkisel yapıştırıcılar I.Dünya Savaşında uçakların ahşap bölgelerinde kullanılmış fakat nemli bölgelerde düşük mukavemet ve direnç gösterdikleri görülmüştür. Bu sebeple yapılan araştırmalar sonucu üretilen sentetik reçineler yapıştırıcıların endüstride de kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. II. Dünya Savaşında uçaklarda epoksi reçine ve fenol formaldehitlerin kullanılması endüstride, birleştirme teknikleri arasında yapıştırıcıların da kullanılmasına yol açmıştır. Araştırmacıların dikkatini çeken yapıştırıcılar, dayanım, titreşim sönümleme, esneklik ve benzeri gibi konularda iyileştirmeler yapılarak günden güne endüstrideki kullanımları arttırılmıştır (Tezcan, 2001).

Kinloch 1997’de ‘Mühendislikte Yapıştırıcılar’ adlı, hazırladığı yayınında yapıştırıcıların otomotiv ve uçak sektörü gibi alanlarda da kullanılabileceği üzerinde çalışmalar yapmıştır. Adhezyon, kohezyon ve sertleştirme olaylarının yapıştırıcıların kullanım amaçlarındaki en önemli parametreler olduğunu açıklamıştır. Yapıştırma bağlantılarında geometrik şeklin soyulma kuvveti ile ilişkisi incelenmiş ve çevresel faktörlerin yapıştırıcılar üzerindeki etkileri incelenmiştir (Kinloch, 1997).

Cam fiber takviyeli numunelerin kullanıldığı bir deneyde; yapıştırıcılar ile birleştirme işlemi uygulanan numuneler çekme testlerine sokulmuştur. Kanada’da yapılan bu deneyde yapıştırıcıların kalınlığı ve ortamın nem oranı arttıkça numunelerin daha düşük yüklerde koptukları görülmüştür (Boukhili, Taib, Said, Sebastien, & Hychem, 2006).

Ojaluo ve Eidinoff ‘un yaptığı çalışmada yapıştırıcı kalınlığının üzerinde durulmuştur. Yapıştırma işlemi ile birleştirilen malzemelerin uzunlukları yönünde oluşan gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığıyla doğrusal olarak değiştiği, ilişkili olduğunu söylemişlerdir.

Maksimum kayma gerilmelerinin de; numunelerin yapıştırıcı ile birleştirildiği bölgenin uç kısımlarında olduğu gözlemlenmiştir (Ojalvo & Eidinoff, 1978).

Andruet 1998'deki yayınında mekanik davranışların incelenmesinde tek taraflı bindirme bağlantısının deneysel olarak bize daha kolaylık sağlamasından dolayı bu yöntemin daha yaygın kullanıldığı ve bu bindirme bağlantı yöntemi ile birçok bağlantı geometrisinin geliştirildiği üzerinde durmuştur (Andruet, 1998).

Tek taraflı bindirme bağlantılarında yapılan çalışmada kayma ve soyulma gerilmelerinin yapıştırıcı kalınlığı ile ilişkisi incelenmiştir. Yapıştırıcı tabakasının bulunduğu bölgede oluşan gerilmelerin, yapıştırıcı kalınlığı ile doğrudan ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Kalınlık arttıkça gerilmelerin arttığı sonucuna ulaşılmıştır (Toshiyuki Sawa & Uchida, 1997).

Aydın 2003'de iki farklı yapıştırıcı ve tek tesirli bindirme bağlantısını kullanarak yaptığı çalışmada çekme ve dört noktada eğme kuvvetleriyle oluşturduğu yüklemenin yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğu ile ilişkisini incelemiştir. Sonuç olarak çekme ve dört noktada eğme yüklemelerinin oluşturduğu gerilmelerin yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğunun artmasıyla azaldığını gözlemlemiştir. Yaptığı bu çalışmada yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğunun yük taşıma dayanımı ile doğrudan ilişkili olduğunu söylemiştir (Aydın, 2003).

Tek tesirli bindirme bağlantılarında serbest uçlarda ayrılma gerilmesi, orta bölgelerde kayma gerilmesi oluşur. Yapıştırıcı kalınlığının artması orta bölgedeki kayma gerilmesinin artmasına, malzeme kalınlığının artması serbest uçlardan merkeze doğru gerilmenin ilerlemesine neden olmaktadır. Sonuç olarak tek tesirli bindirme bağlantılarında gerilmeler serbest uçlardan ara bölgeye doğru ilerleyerek artış göstermektedir (Özel, Temiz, Aydın, & Şen, 2005).

Sawa ve arkadaşları 2000 yılında tek taraflı bindirme bağlantısında farklı yapıştırıcıların kullanıldığı ve çekme kuvvetinin uygulandığı bir çalışma yapmışlardır. Yapıştırma bağlantısında ara yüzeyde oluşan gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak analiz ettikleri bağlantıda ara yüzeydeki yapıştırıcı kalınlığının ve yapıştırılan malzemenin elastisite modülünün gerilme dağılımları

üzerindeki etkisinin bir hayli yüksek olduğunu göstermişlerdir (Toshiyuki Sawa, Jiemin, Katsuyuki, & Junnya, 2000).

Gleich ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yapıştırıcı maddenin kalınlığı ve maksimum yük arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantıda bağlantının dayanımı yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla birlikte artmıştır. Gleich ve arkadaşlarının çalışmasında 0,1 mm ve 0,5 mm arasındaki yapıştırıcı kalınlıklarında; kalınlık arttıkça gerilmenin azaldığı; kalınlık azaldıkça da gerilmenin arttığını gözlemlemişlerdir (Gleich, Van Tooren, & Beukers, 2001).

Mortensen ve Thomsen 2002'deki çalışmalarında, yapıştırıcı kalınlığını lineer elastik davranışlarda malzemelerin kalınlığından oldukça küçük kabulünü yapmışlar ve Von-Mises kriteri ile birlikte uygulamışlardır. Diğer bir yaklaşım olarak lineer olmayan davranışı ele almışlardır. İki yaklaşım kıyaslandığında; lineer olmayan davranışlarda çok düşük yüklemelerde bile yapıştırıcı tabakasındaki gerilmelerin etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bindirme bölgesinin uç kısımlarında gerilme yığılmalarını onarma eğiliminde bulunduğu gözlemlenmiştir (Mortensen & Thomsen, 2002).

1997'de yapılan bu araştırmada; malzemelerin elastisite modülü, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğunun tek tesirli bindirme bağlantılarında gerilme dağılımlarına ve bağlantı deformasyonuna etkisini sonlu elemanlar metodu ve deneysel analizler ile birlikte incelemişlerdir. Yapıştırılan malzemelerin elastisite modülü ve yapıştırıcı kalınlığının; sonlu elemanlar metodu ve deneysel analizlerde tespit ettikleri gibi tamamiyle gerilme dağılımlarında etkili olduklarını görmüşlerdir. Kalınlık ve elastisite modülü azaldığında, gerilmelerde artış olduğunu söylemişlerdir (Toshiyuki Sawa, Nakano, & Toratani, 1997).

Özel ve arkadaşları tek taraflı bindirme bağlantılarında sonlu elemanlar metodu kullanarak farklı iki yapıştırıcı ile dört noktadan eğme yüküne maruz bırakılmış yapıştırma bağlantılarında çalışmalar yapmışlar ve aynı zamanda deneysel olarak da elde ettikleri verileri karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda yapıştırıcı kalınlığının önemini bir kez daha vurgulamışlardır (Özel, Kadioglu, Şen, & Sadeler, 2003).

2006'da yapılan bu çalışmada üç farklı yapıştırıcı kullanılarak, yapıştırıcı kalınlığının tek tesirli bindirme bağlantılarında etkisi gözlemlenmiştir. Önceki çalışmaların aksine

deneysel olarak yapıştırıcı kalınlığının düşürülmesiyle bindirme kayma dayanımının artış gösterdiğini söylemişlerdir. Sonlu elemanlar metodunda yapıştırıcı bulk numunesinin dikkate alınmasının daha doğru olacağını söylemişlerdir (Lucas F. M. Da Silva, Rodrigues, Figueiredo, De Moura, & Chousal, 2006).

Da silva ve diğerleri 2009'da yaptıkları başka bir çalışmada; tek tesirli bindirme bağlantılarında; bindirme kayma dayanımının yapıştırıcı ve malzeme kalınlığı ile ters orantılı olduğu, bindirme uzunluğu ile ve yapıştırılan malzemenin akma mukavemeti ile ise de doğru orantılı olduğunu söylemişlerdir. Yüzey işlemleriyle pek de ilişkili olmadığını belirtmişlerdir (Lucas F.M. Da Silva, Das Neves, Adams, & Spelt, 2009).

Özel ve arkadaşları iki boyutlu doğrusal olmayan tek tesirli bindirme bağlantılarında sonlu elemanlar metodu ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Eğilme momentine maruz bırakılan bu bağlantıda sert ve sünek özellikte yapıştırıcılar kullanmışlardır. Yapıştırıcı kalınlığının iki tip yapıştırıcı da önemli rol oynadığını, bindirme uzunluğunda ise sadece sünek yapıştırıcıda olumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir (Özel, Aydın, & Temiz, 2004).

Epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan iki kompozit malzemenin kopma yükünün yapıştırıcı kalınlığı kadar bindirme uzunluğu ile de ilişkili olduğu gözlemlenmiştir (Mazumdar & Mallick, 1998).

Özel ve arkadaşları tek tesirli bindirme bağlantısı yöntemi kullanarak alüminyum ve 16 tabakalı karbon/epoksi kompozit malzemeleri ile incelemeler yapmışlar ve bağlantının yük taşıma kapasitesi ve gerilme dağılımlarının malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğu ile ilişkili olduğunu söylemişlerdir (Özel, Yazıcı, Akpınar, Aydın, & Temiz, 2014).

Bu çalışmada deneysel olarak üç farklı yapıştırıcının beş farklı yapıştırıcı kalınlıklarında ve üç ayrı test hızıyla incelemeler yapılmış olup test hızının etkisi ve yapıştırıcı kalınlığının darbe davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada silindirik çubuk malzemelerin darbe testlerine en uygun olduğu, darbe enerjisi emme bakımından 0,5 mm kalınlığında poliüretan yapıştırıcının en iyi olduğu gözlemlenmiştir. Darbe absorbe etmede en uygun kalınlık 0,25 mm bulunmuştur. Ayrıca test hızlarının yükseltilmesi durumunda daha fazla enerjinin absorbe edildiği de gözlemlenmiştir (Bezemer, Guyt, & Vlot, 1998).

Sawa ve arkadaşları 2002’de hazırladıkları çalışmalarında yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının bulunduğu ara yüzeyde darbe yükü altında, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcının young modülünün etkilerini incelemişlerdir. Darbe yükü altındaki yapıştırıcının young modülünün artırılmasıyla ara yüzeydeki gerilmelerin artması, yapıştırıcı kalınlığındaki artışın ise gerilmeleri azalttığına etki ettiği gözlemlenmiştir (Toshiyuki Sawa, Suzuki, & Kido, 2002).

İzumi ve arkadaşları bu çalışmalarında T tipi yapıştırma bağlantılarında darbe yükü ile eğilme momenti uygulanan malzemelerin gerilme analizleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Ara yüzeylerdeki gerilmelerin young modülü ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir (İzumi, Toshiyuki, Hirohisa, & Shinya, 2003). Higuchi ve arkadaşları bir başka çalışmalarında yine darbe yükü altında eğilme momenti uygulayarak tek taraflı bindirme bağlantılarında sonlu elemanlar metodu kullanarak gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda dinamik eğilme momenti ile statik eğilme momenti kuvvetlerinden aldıkları sonuçların uyuşmadıklarını görmüşlerdir. Dinamik yüklerde young modülü ve yapıştırma uzunluğu artarken gerilmede artış gördüklerini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada malzeme kalınlığı arttırıp, yapıştırıcı kalınlığını düşürdüklerinde gerilme değerinin arttığını görmüşlerdir. Bu çalışmayı deneysel sonuçlar ile de desteklemişlerdir (Higuchi, Sawa, & Suga, 2002).

Blackman ve arkadaşları 2000’de yaptıkları bir çalışmada yapıştırıcıların kırılma dirençlerini kamalı darbe metodu kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada çelik ve alüminyum alaşımlı malzemeler kullandıkları ve deneyde oluşan çatlağın düzenli ve düzensiz ilerleyip kohesif hasar oluşturduğu görülmüştür (Blackman, Kinloch, Taylor, & Wang, 2000).

Galliot ve arkadaşları darbe yükünün yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıdaki etkisini ağırlık düşürme test düzeneği altında incelemişlerdir. Tek tesirli bindirme bağlantısı ve çekme gerilmesi uyguladıkları sistemde rijitliğin, hasar yükünün ve sönümlenen enerjinin yüklenme ile birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca bağlantının yarı statik durumla benzer olduğu, tasarımda yarı statik durumunda verdiği sonuçlarında kabul edilebileceğini belirtmişlerdir (Galliot, Rousseau, & Verchery, 2012).

Aga ve Woldesonbet grafit/epoksi kompozitlerin yapıştırıcı ile yapıştırılmasını farklı enerji değerleri kullanarak ağırlık düşürme deneyi ile incelemişlerdir. Bu deneyle

yapıştırıcı kalınlığının etkisini gözlemlemişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığının artması ile temas kuvvetinin de arttığı sonucuna varmışlardır (Aga & Woldesenbet, 2007).

Ghasemnejad ve diğerleri tek tesirli bindirme bağlantılarını kullanarak düşük hızlı darbe altında, yapıştırma bölgesinde elyaf pim kullanmanın etkisini incelemişlerdir. Cam ve karbon epoksi malzemeler kullanmışlardır. Elyaf pim kullandıkları yapıştırma bağlantısının enerji sönümleme açısından katkısı olduğunu söylemişlerdir (Ghasemnejad, Argentiero, Tez, & Barrington, 2013).

Adamvalli ve Paramesworan tek tesirli bindirme bağlantısının dinamik dayanımını farklı yükler ve 25°C - 100°C sıcaklıkları arasında Hopkins deney düzeneği yardımıyla incelemişlerdir. Bağlantıda titanyum levhalar ve Areldite2014 yapıştırıcısını kullanmışlardır. Hasarın yapıştırıcının bulunduğu bölgede oluştuğunu ve bağlantı dayanımının artan yükleme hızı ile birlikte arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca sıcaklığın artması dayanımda olumsuz yönde etkili olduğunu söylemişlerdir (Adamvalli & Parameswaran, 2008).

Kompozit malzemeler yapıştırıcılar ile birleştirilmesinden sonraki üretim aşamaları veya servis aşamalarında çeşitli darbe yüklerine maruz kalırlar. Bu darbe yükleri sonraki aşamalar için mukavemet yönünden olumsuzluk yaratacaktır (Aga & Woldesenbet, 2007). C-tarama metodu kullanarak yaptıkları çalışmada darbe anında yapıştırıcı kalınlığının artırılması ile temas kuvvetlerinde maksimuma ulaşıldığını gözlemlemişlerdir (Aga & Woldesenbet, 2007).

Goglio ve Rosetto 2008 yaptıkları çalışmada sarkaç çekiç yöntemi ile yapıştırma bağlantılarında darbe yüklerini incelemişlerdir. Çelik numuneleri kullandıkları bu deneylerde soyulma ve kayma darbe yükleri altında bindirme uzunluğu, yapıştırıcı ve malzeme kalınlığının etkilerini incelemişlerdir. Ortalama kayma gerilmesinin, elde ettiği bulgular sonucunda yapıştırıcı kalınlığı ve malzeme kalınlığının artmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Ek olarak dinamik yüklerin statik yüklere göre daha yüksek gerilmeler oluşturduğunu belirtmişlerdir (Goglio & Rosetto, 2008).

Asgharifar ve arkadaşları malzeme olarak Al6111 ve yapıştırıcı olarak üç farklı türde yapıştırıcı kullandıkları bir çalışmada düşük hızlı darbe uygulayarak yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal olarak

yaptıkları çalışmada yapıştırıcı kalınlığının, vurucu boyutunun, vurucu hızının, yapıştırıcı özelliklerinin ve malzeme şekil değiştirme hızlarının birer parametre olduğunu belirtmişlerdir (Asgharifar, Kong, Carlson, & Kovacevic, 2014).

Akın 2008 yılında yaptığı bu çalışmada dinamik yük altındaki kompozit levhaların bağlantı koşullarına göre dinamik davranışlarını deneysel çalışmalarla incelemiştir. Bağlantı şartlarının numunenin dayanıklılığına ve üzerindeki enerji miktarına doğrudan etki ettiğini söylemiştir. Dört taraftan ankastre ve iki taraftan ankastre bağlantı durumlarını kıyaslamış ve daha rijit olan dört taraftan ankastre bağlantısı; hem darbe enerjisi hem de absorbe edilen enerji bakımından daha düşük değerleri göstermiştir (Akın, 2008).

Yıldırım 2011 de yazmış olduğu doktora tezinde yapıştırıcı bağlantılarının düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. Sayısal ve deneysel olarak çalıştığı tezinde, yapıştırıcı kalınlığının artması darbe sönümlemede etkili olduğunu söylemiş fakat yapıştırıcı kalınlığının da bir üst sınırı olduğunu vurgulamıştır (Yıldırım, 2011).

Atahan 2015’de yaptığı yüksek lisans çalışmasında yapıştırıcıların tek tesirli bindirme bağlantılarının eğik darbe altındaki davranışlarını incelemiştir. Sırasıyla 0°,10°,20° ve 30° açılarında uyguladığı darbelerin, eğiklik açısı arttıkça düzlem içi kayma gerilmelerinde artış gösterdiğini belirtmiştir. Sonuç olarak darbe açısındaki artış ile meydana gelen kayma gerilmeleri ayrılma hasarına etki etmektedir (Atahan, 2015).

Sayman ve arkadaşları darbe altında bulunan yapıştırma bağlantılarında sıcaklığın ve yüzey pürüzlülüğün etkisini dört farklı sıcaklık ve dört farklı darbe yükü enerji değerlerini kullanarak incelemişlerdir. Sonuç olarak yüksek ve düşük sıcaklıklarda yük taşıma kapasitesinin azaldığını ve pürüzlü yüzeylerin pürüzsüz yüzeylere göre daha çok yük taşıdığını söylemişlerdir (Sayman, Arıkan, Dogan, Soykok, & Dogan, 2013).

Özenç 2007’de yaptığı tez çalışmasında tek taraflı bindirme bağlantılarının darbe yükleri altında; yüzey pürüzlülüğünün ve yapıştırıcı kalınlığının etkisini farklı malzemeler kullanarak incelemiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından yaptığı deneyde; en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinde en düşük mukavemet değerini bulmuştur. Yapıştırıcı kalınlığında ise her malzeme ve yüzey pürüzlülük değerinde farklılıklar gösterdiğini belirtmiş ve yaptığı çalışmada optimum bir kalınlık değeri seçmiştir (Özenç, 2007).

Salim am 2016 yılında yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırılacak malzemelerde; gerilme yığılmalarını azaltmak amacıyla, karşı çentik etkisini incelemiştir. Malzemelerde oluşturduğu bu çentikleri incelemek amacıyla onbir farklı tipte bağlantı geometrisi oluşturmuş ve deneysel-nümerik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların sonucunda bağlantının dayanımının %22 artış gösterdiğini belirtmiştir (am, 2016).

Tsai ve Morton (1995) tek tesirli bindirme bağlantılarında dolgu kullanılmasının etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Yapıştırıcı dolgusunun kayma ve soyma gerilmelerini önemli miktarda düşürdüğünü gözlemlemişlerdir (Tsai & Morton, 1995).

Lopes ve arkadaşları da darbe altında bulunan yapıştırma bağlantısının hasar analizini yapmak için kohezif bölge modelini kullanmışlardır. Bu modeli kullanmalarındaki sebep tabakalar arası ayrılmanın gözlem açısından daha iyi olduğunu söylemişlerdir. Sonlu elemanlar metodu ile yaptıkları bu çalışma deneysel sonuçlarla da desteklemişlerdir. Ayrıca bu analiz metodunun zaman ve maliyet açısından avantajlı olduğunu belirtmişlerdir (Lopes, Camanho, & González, 2014).

Kanar ve arkadaşları DCB bağlantı yöntemi ile yapıştırıcıların kırılma davranışlarının sıcaklıkla ilişkisini ve yapıştırıcılara nanoyapısal takviyelerin eklenmesinin etkisini incelemişlerdir. Yapıştırıcılarda takviyesiz, Grafen-COOH, Carbonnanotube-COOH ve Fullerene takviyeli olarak Ansys programında kohezif bölge modeli metodunu kullanarak özümlemişler ve deneysel sonuçlarla yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Ortam sıcaklığında yapıştırıcıya ilave edilen nanoyapısal malzemelerin yapıştırıcı bağlantısının maksimum yükünü arttırdığını görmüşlerdir. Sayısal yöntemlerde en doğru yöntemin kohezif bölge modeli olduğunu belirtmişlerdir (Kanar, Akpınar, Akpınar, Akbulut, & Özel, 2018).

Özel ve Akpınar 2019 da termal döngü ve ortam sıcaklığı koşulları ile ilgili yaptıkları başka bir çalışmalarında takviye olan ve olmayan yapıştırıcılar da termal yüklere maruz kalan bağlantıların kırılma yüklerinde azalma tespit etmişlerdir. Sonuç olarak termal çevrimin yani bağlantı sıcaklığının düşmesiyle, kırılma yükünün de azaldığını belirtmişlerdir (Akpınar & Özel, 2019).

Akpınar ve Durmuş 2019 da yaptıkları çalışmada tek tesirli bindirme bağlantı yöntemi ile tek ve üç basamakta bindirme uygulamışlardır. özümlemlerini kohezif bölge modeli metodu

ve deneysel yollarla incelemişlerdir. Üç basamaklı bindirme bağlantılarında kırılma yükünün olumlu sonuçlar verdiğini görmüşlerdir ve üç basamakta beş farklı bindirme uzunluğundan ‘8 mm ’ uzunluğundaki bindirmenin en iyi sonuç verdiğini açıklamışlardır (Durmuş & Akpınar, 2020).

Caputo ve diğerleri karbon epoksi kompozit bir levhanın hasar oluşumunu ve ilerlemesini düşük hızlı darbe davranışı altında sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. ABAQUS programında kohezif bölge modelini uyguladıkları çalışmalarında 6 J, 10 J ve 13 J’luk darbe enerjilerini kullandıkları deneysel sonuçlarla, sayısal analizlerinin uyumunu belirtmişlerdir (Caputo, De Luca, Lamanna, Borrelli, & Mercurio, 2014).

Batra ve arkadaşları ABAQUS sonlu elemanlar programını kullanarak; rijit küresel uçlu vurucu yardımıyla düşük hızlı darbe yöntemiyle fiber takviyeli kompozit malzeme üzerinde incelemeler yapmışlardır. Hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Kohezif bölge modelini uyguladıkları analizde literatürdeki deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Batra, Gopinath, & Zheng, 2012).

Israr ve diğerleri karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) plakanın düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını sayısal olarak incelemişlerdir. ABAQUS/ Explicit paketini kullandıkları çalışmalarında tabakalar arasında kohezif eleman modelini uygulamışlardır. Sayısal ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir (Israr, Rivallant, Bouvet, & Barrau, 2014).

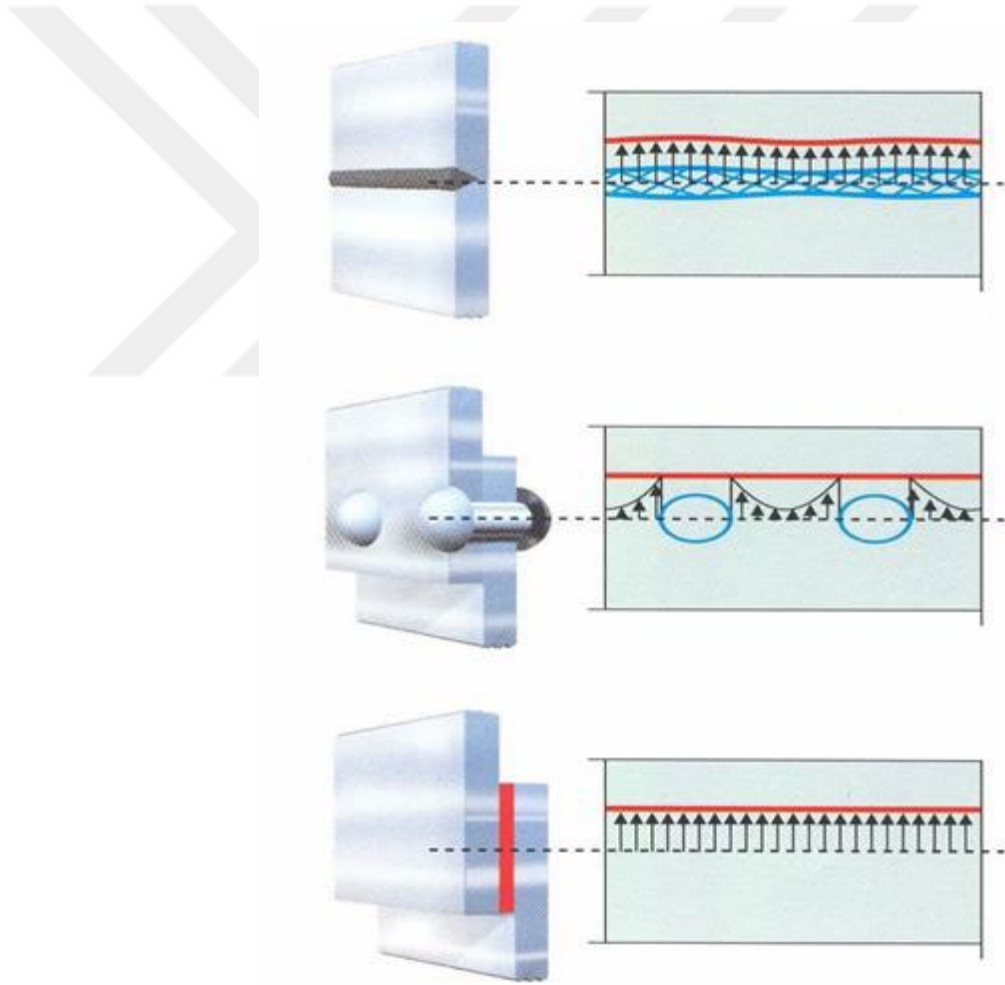
Akademik alanda yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere genellikle yapıştırıcı kalınlıklarının yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapıştırma bağlantılarında çalışmaların amacı yapıştırma işleminin bulunduğu ara yüzeydeki yüklerden dolayı meydana gelen gerilme dağılımlarını minimuma indirmek ve yahuatta gerilimi homojen bir şekilde ara yüzeye yayıp dayanıklılığı arttırmaktır. Darbe yüklerinde yapıştırıcının bulunduğu ara yüzeydeki kırılma enerjisini yüksek tutmak, kırılma olayının oluşabilmesi için gerekli enerjinin yükselmesi anlamına gelmektedir. Darbe yükleri altındaki yapıştırma bağlantılarında amaç bu yüzden, bağlantının olabildiğince fazla enerjiyi sönümlemesini sağlamaktır. Bu olayları nümerik olarak incelememizi Sonlu Elemanlar Metodu sağlamaktadır. Yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcıda meydana gelen hasarı daha iyi gözlemlemek için Kohezif Bölge Modeli araştırmacılar tarafından en doğru sonuçlar vermesinden dolayı çok yaygın kullanılmaktadır.

### 3. KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1. Metal Birleştirme Teknikleri

Genellikle endüstri de sıklıkla kullanılan metal malzemelerin birleştirilmesi 3 teknik ile gerçekleşir. Bunlar; (Bkz. Şekil 3.1)

- Mekanik Birleştirme
- Termal Birleştirme
- Yapıştırıcı ile Birleştirme



Şekil 3.1. Termal, mekanik ve yapıştırıcı (Çitil, 2012)

### **3.1.1. Mekanik birleştirme**

Mekanik birleştirme yönteminde bağlantının oluşabilmesi için; perçin, vida vb. gibi bağlantı elemanlarının girebileceği, bağlantı yapılacak malzemelerin üzerlerinde deliklerin bulunması gerekir. İki veya daha fazla malzeme üzerinde bulunan bu deliklerden bağlantı elemanları geçirilip malzemelerin bir arada çalışması sağlanır. Bu bağlantı tekniği sökölme açısından bize kolaylık sağlasa da aslında birçok dezavantajı olan bir tekniktir. Malzemelerdeki delikler parçanın üzerindeki gerilmenin o deliklerde yığılmasını sağlayacak ve bu da parçaların mukavemet yönünden olumsuz etkilenmesini sağlayacaktır. Mukavemet yönünden bir kayıp olmaması için parçalarda kalınlık artırımı olacak ve bu da ağırlığa etki edecektir. Ayrıca malzemelerdeki delikler korozyon açısından da parçalarda önemli etki yaratacağından gerekli yüzey koruma işlemlerinin yapılmasını zorunlu hale getirecektir.

### **3.1.2. Termal birleştirme**

Termal birleştirme yöntemi mukavemet açısından uygun gibi görünse de bu bağlantı tekniğinin de en önemli dezavantajı farklı türdeki malzemelerin birleştirilememesidir. Metal ile alüminyum mekanik birleştirme ile birleştirebiliriz fakat kaynak yöntemi ile birleştirmek mümkün değildir. Ayrıca termal birleştirme tekniğinde birleştirilen malzemeler tekrardan sökülemezler. Termal birleştirme tekniği sırasında kaynağın etkisiyle yüksek sıcaklıktan etkilenen bölgelerde yapı olarak bozulma meydana gelir.

### **3.1.3. Yapıştırma ile birleştirme**

Yapıştırma bağlantıları diğer bağlantı tekniklerine göre bizlere çok büyük avantajlar sağlar. Farklı malzemelerin farklı geometrik yapısına sahip olsalar bile bu bağlantı tekniği ile birleştirilebilirler. Gerilme dağılımları diğer tekniklere göre en düzgün yayılımı bizlere verir. Malzemelerde bozulma olmaz. (Mekanikte deliklerden dolayı korozyon, termal de sıcaklıktan dolayı bozulma). Birleştirme elemanı olmasının yanında bir sızdırmazlık elemanı olarak da görev yapabilirler. Titreşimi azaltabilirler. Birleştirmeden sonra, birleştirme noktalarındaki yüzeyler daha pürüzsüzdür ve aerodinamik açısından bağlantıya katkı sağlar. Malzemelerin ağırlıkları açısından avantaj sağlar. Yapıştırma ile bağlantı tekniğinin bu tür avantajları son yıllarda her sektör için ilgi odağı olmuştur ve birçok araştırmalar yapılmıştır (Çitil, 2012).

## 3.2. Yapıştırma Bağlantıları

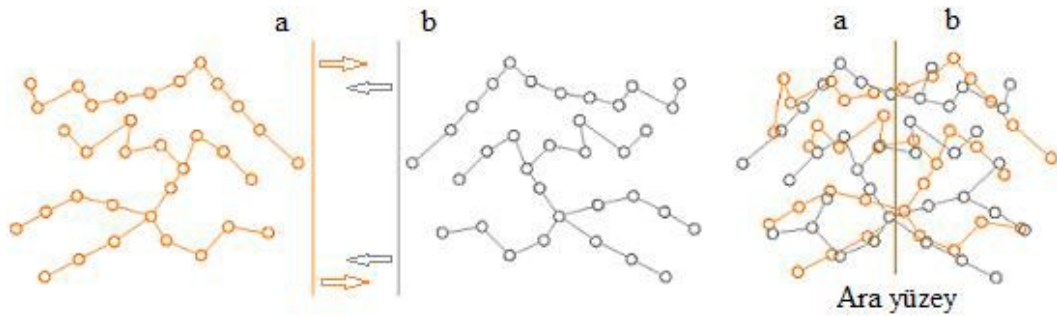
### 3.2.1. Yapıştırma bağlantılarında yapışma teorisi

Yapıştırma bağlantılarında yapışma teorisi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır ve ortaya birçok teori atılmıştır. Bu çalışmada bu teorilerde 4 tanesi ele alınıp açıklanacaktır. Fakat bu teoriler tek başlarına yapışma olayını anlamamıza yardımcı olmazlar. Çalışmada açıklanacak teoriler: (Temiz 2003).

- Difüzyon Teorisi
- Adsorbsiyon Teorisi
- Mekanik Tutunma Teorisi
- Elektrostatik Teorisi

#### 3.2.1.1. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisinde yapışma olayı malzeme ile yapıştırıcı arasındaki moleküllerin birbiri içerisine yayılması ile olur. Difüzyon teorisi için yapıştırıcı ve malzemenin polimerik yapıya sahip olması gereklidir. Polimerik yapıdan oluşan bu iki malzeme içlerindeki polimer zincirleri ile birbirleri içerisine yayılırlar. Bunun sonucunda bağlantı noktaları oluşmuş olur. Polimerlerin ağırlıkları azaldıkça nüfuz derecesi de o denli artış gösterir (Çam, 2016). (Bkz. Şekil 3.2)



**Şekil 3.2.** Yapıştırıcı ve malzeme yüzeylerinden moleküllerin difüzyonu a) yapıştırıcı molekülleri b) malzeme molekülleri (Özenç, 2014)

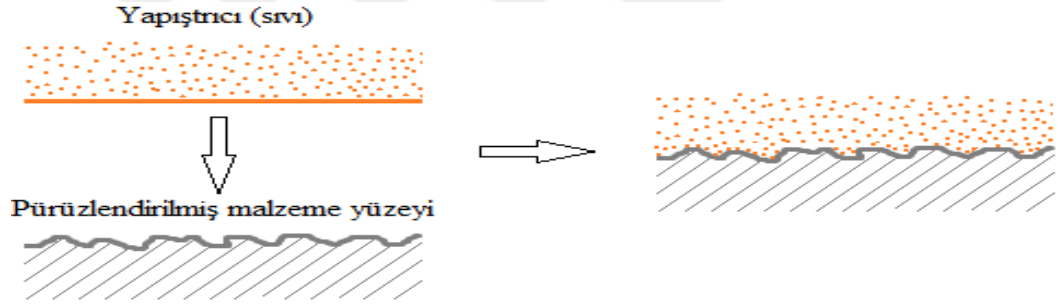
#### 3.2.1.2. Adsorbsiyon teorisi

Adsorbsiyon teorisi, yapıştırıcının malzemenin yüzeyi ile arasında oluşan tutunma olayıdır. Bu olayda katı yüzeye sahip olan malzeme Adsorbent diye adlandırılır. Teori

ismini buradan alır. Katı halde bulunan malzemelerin içerisindeki iyonlar denge halinde ve statiktirler. Bu katı yüzeyin yüzeyindeki atomlar ise bir denge halinde değildirler ve denge haline gelmek için yapıştırıcıdaki katı maddeleri kendilerine çekerler bu duruma da katı yüzey adsorbsiyonu adı verilir.

### 3.2.1.3.Mekanik tutunma teorisi

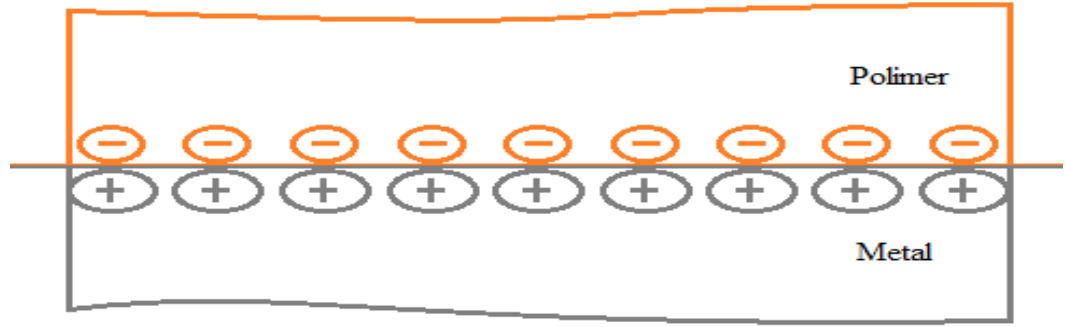
Malzemelerin yüzeylerini incelediğimiz zaman her malzemenin yüzeyinde gözle görülmese bile girintiler çıkıntılar bulunur. Yapıştırıcı elemanın bu girinti çıkıntıları doldurmasıyla malzemeye kendini kenetler. Bu olaya mekanik tutunma denir. Fakat mekanik teori sadece bu olayın gerçekleştiği bağlantıları açıklar birbirleriyle gerekli yüzey pürüzlülüğü olmasına rağmen yapışamayan olayı açıklamaz. (Bkz. Şekil 3.3)



Şekil 3.3. Mekanik tutunma teorisi (Yang, Gu, & Gibson, 2001)

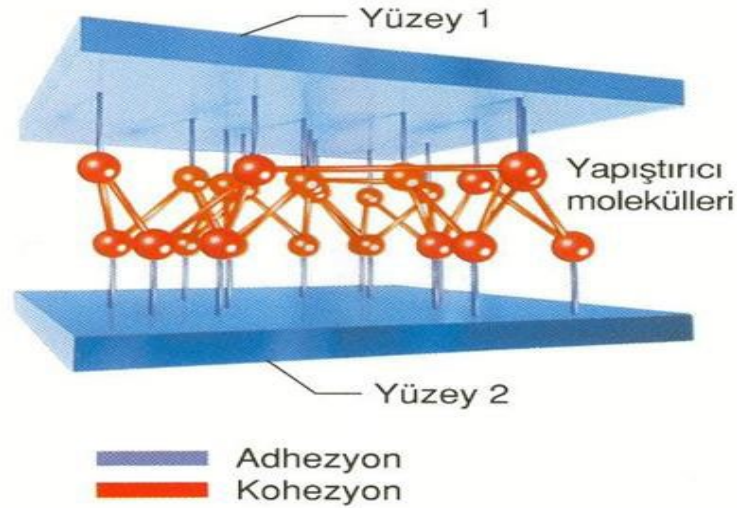
### 3.2.1.4.Elektrostatik teori

Bu teoride, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemelerin yüzeyleri arasında birbirlerine yakınlıklarında elektron transferinin oluştuğunu ve ara yüzeyde pozitif ve negatif yüklerin birbirlerini çekme kuvveti oluşturacağından yapışma sağlandığını açıklar (Çam, 2016). (Bkz. Şekil 3.4)



**Şekil 3.4.**Elektrostatik teori (Özenç, 2014)

Yapıştırma ek yerinde yapıştırıcı, iki malzemeyi birbirleriyle bağlantılı hale getiren bir köprü görevi görür. Bu olay iki kuvvetle ilişkilidir. Bunlar; adhezyon ve kohezyon. (Bkz. Şekil 3.5)



**Şekil 3.5.**Adhezyon ve kohezyon kuvvetleri (Çitil, 2012)

### **Adhezyon**

Adhezyon iki maddenin birbirlerini çekme kuvvetidir. ‘Van der waals kuvvetleri’ adhezyon olayının en önemli faktörüdür. Yapıştırıcı malzeme yüzeylerine temas etmesi durumunda bir çekim kuvveti oluşur. Bu nedenle iyi bir yapışma için yapıştırıcının yüzeye iyi temas etmesi ve malzemeyi iyi derecede ıslatması gerekir. Bu sebeple yapışmanın kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve yapıştırıcının viskozitesiyle doğrudan ilişkilidir. Yapıştırıcı ile malzeme arasında oluşacak gerilmeler yüzeyin iyice temizlenmesiyle de alakalı olduğundan, yapıştırma işleminden önce yüzey temizliği yapılmalıdır.

## Kohezyon

Adhezyon iki malzemenin birbirleriyle tutunmasını ele alır, kohezyon ise malzemelerin kendi içerisindeki tutunma kuvvetlerini ele alır. Yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının sağlam bir köprü görevi görmesi için kohezyon kuvvetlerinin de yüksek olması gerekir (Çitil, 2012).

İyi bir yapıştırma için Adhezyon ve Kohezyon kuvvetlerinin birbirlerine yakın hatta eşit olması gerekir. Çünkü bir bağlantı işleminde zayıf nokta bulunmamalıdır.

### 3.2.1.5.Yapışma ek yerinde kopma ve hasar türleri

Yapıştırma ek yerinde kopma ve hasar oluşmasının nedenleri; hatalı parça, hatalı geometri, hatalı yapışma, hatalı yapıştırma vb. gibi hatalardan kaynaklanabilir. Aşağıdaki şekilde kopma ve hasar türleri verilmiştir. (Bkz. Tablo 3.1 Tablo 3.2 Şekil 3.6)

**Tablo 3.1.Kopma türleri (Cowdrey et al., 1998)**

| <b><u>Kopma Türü</u></b> | <b><u>Kuvveti Artırma Yöntemleri</u></b>                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <u>Adhezyon Kopması</u>  | Yapışmanın zayıf noktası, yapıştırılan parça ile yapıştırıcı arasında temas yüzeyidir. Ya malzeme yapıştırmaya uygun değil ya da yapıştırma yüzeyi kirlidir. Her iki durumda da kuvvet, yüzeye uygun ön işlem yapılmasıyla artırılabilir. |
| <u>Kohezyon Kopması</u>  | Yapıştırıcı dış etkiler nedeniyle aşırı gerilime maruz kalmıştır. (ör.Gerilme tepeleri, sıcaklık, yaşlanma vs.). Çözüm: Parçaların şeklinde değişiklik yapmak ve/veya daha uygun yapıştırıcı seçmek.                                      |

**Tablo 3.2.** Kopmanın sebepleri (Cowdrey et al., 1998)

| <b><u>Muhtemel Sebepler</u></b>                                                             | <b><u>Çözümler</u></b>                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hatalı Parçalar</b>                                                                      | Toleranslar, boşluk ve malzemelerin kontrolü. Daha dikkatli takip edilmesi.                                                                                        |
| <b>Kirli Parçalar</b>                                                                       | Ön işlem uygunluğunu kontrol edin ve gerekli şekilde değiştirilmesi.                                                                                               |
| <b>Hatalı Yapıştırma</b>                                                                    | Tüm proses parametrelerini, yapıştırma işlemini kontrol edin ve birleştirme şekli ve süresini iyileştirilmesi.                                                     |
| <b>Yapıştırıcının Yetersiz Kürleşmesi</b>                                                   | Kürleşme ön şartlarını kontrol edin. (Boşluk, havasızlık, nem vs.) Yapıştırıcının raf ömrünün dolmadığından emin olunması.                                         |
| <b>Mekanik aşırı gerilme veya istenmeyen gerilmeler (soyulma)</b>                           | Yapışma yüzeyini genişletin ve/veya kuvvet tatbik edilen ek yeri geometrisini değiştirin. Yapıştırıcının gerilme türüne uygunluğunu kontrol edin.(çekme,kesme vs.) |
| <b>Termal Aşırı Gerilim</b>                                                                 | Yüksek sıcaklığa daha dayanıklı yapıştırıcı seçin.                                                                                                                 |
| <b>Sıvı veya Gaz Halindeki Ortamdan Korozyon Oluşması veya Yapıştırıcının Tahrip olması</b> | Parçalar arasındaki boşluğun ortam ile temasını uygun bir kaplama ile veya yapıştırılan parçaların geometrik şeklini değiştirerek engelleyin.                      |

|                                               | Hasar Tipleri                                                                                                                                           |  |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                               | <br>Yapıştırılan malzemelerin birinde veya ikisinde de hasarın olması |  |
| Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar | <br>Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı                               |  |
|                                               | <br>Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar                               |  |
|                                               |                                                                                                                                                         |  |
| Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar          | <br>Kohezyon hasarı                                                   |  |
|                                               | <br>Özel kohezyon hasarı                                              |  |
|                                               | <br>Adhezyon hasarı                                                   |  |
|                                               | <br>Adhezyon hasarı                                                  |  |

Şekil 3.6.Temel hasar türleri (Özenç, 2014)

### 3.2.2. Yapıştırma bağlantı tipleri

Kohezyon ve adhezyon kuvvetlerinin iyi olması, o yapıştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ilgilidir. Bu kuvvetlerin oluşturduğu bağlantının da mukavemet yönünden dayanıklı olabilmesi yine yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Fakat uygun yapıştırıcının seçilmesinde, yapıştırılacak malzemenin de özellikleri (sertlik, young modülü vb.) çok önemli bir yere sahiptir. Yapıştırma bağlantısının çalıştığı ortam, bağlantıyı etkileyen bir faktördür. Yapıştırıcının bulunduğu, iki malzemenin arasında kalan ara bölge (ek yeri) tasarım açısından önemlidir. Bağlantının kullanılacağı yere ve yüklere karşı tasarlanmalı ve oluşacak gerilmeler engellenebildiği kadar engellenmeli; homojen bir gerilme yayılımı elde edilmelidir.

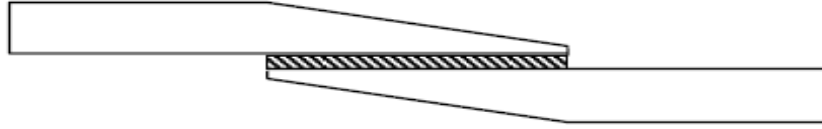
Yukarıda bahsettiğimiz gibi iyi bir yapıştırma bağlantısı için dikkat edilmesi gereken parametreleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Yapıştırıcı
- Yapıştırılacak malzeme
- Çalışma Ortamı
- Ek Yeri Tasarımı
- Yük

Mühendislikte sıklıkla ele alınan yapıştırıcılar; farklı yapıştırma bağlantı tipleri uygulanarak kullanılmışlardır. (Bkz. Şekil 3.7 – Şekil 3.14) Bu yapıştırma bağlantı tiplerinin en sık kullanılanları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir (Adams, 1989).



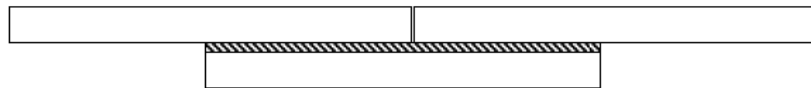
**Şekil 3.7.** Tek taraflı bindirme bağlantısı



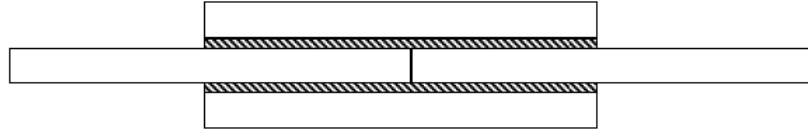
**Şekil 3.8.** Pahlı bindirme bağlantısı



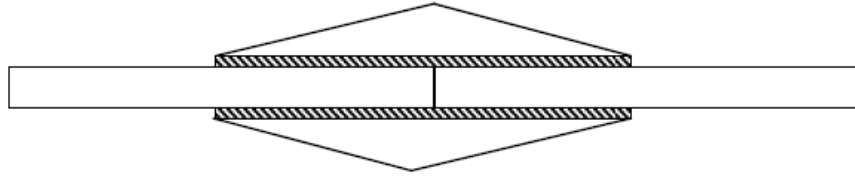
**Şekil 3.9.** Alın bağlantısı



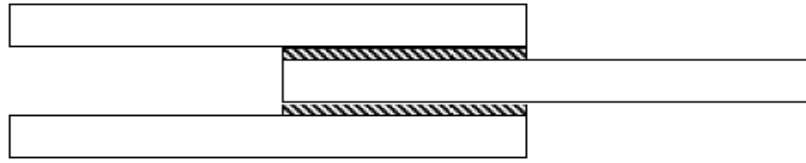
**Şekil 3.10.** Tek destek elemanlı bağlantı



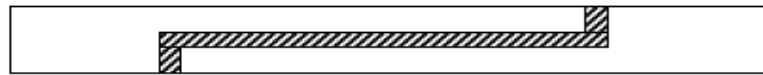
**Şekil 3.11.** Çift destek elemanlı bağlantı



**Şekil 3.12.** Eğimli çift destek elemanlı bağlantı



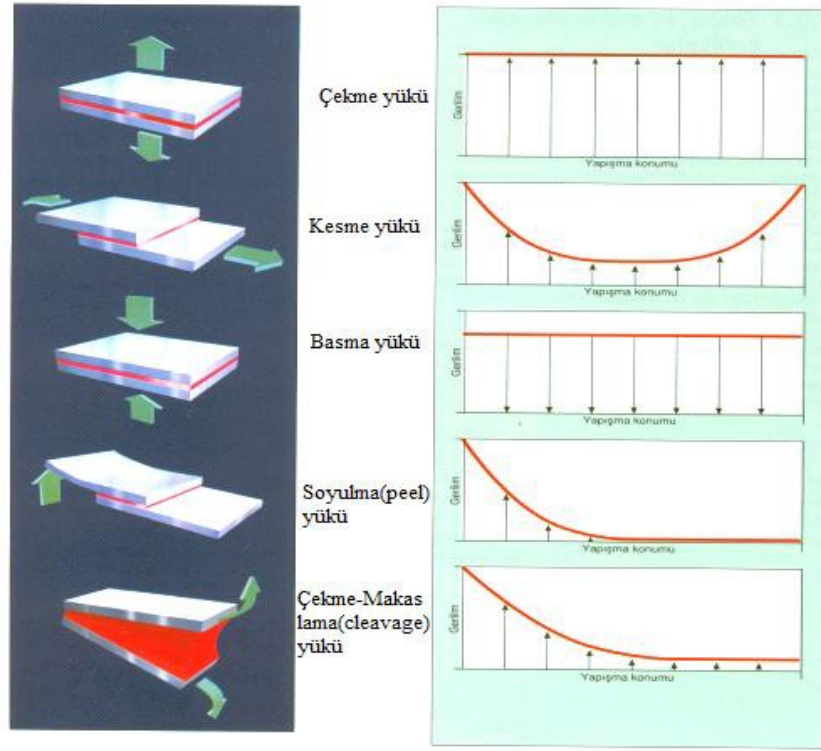
**Şekil 3.13.** Çift tesirli bindirme bağlantısı



**Şekil 3.14.** Basamaklı bindirme bağlantısı

### 3.2.3. Yapıştırma bağlantılarında gerilme çeşitleri

Yapıştırma bağlantılarında etkili olan 4 önemli gerilme çeşidi vardır. Bu gerilme türleri; Çekme gerilmesi, Kayma gerilmesi, Soyulma gerilmesi ve Çekme-Makaslama gerilmesidir. Yapıştırma bağlantısının içinde bulunacağı bir tasarım yapılacağı zaman, mukavemet yönünden zayıflık oluşmaması için bu dört gerilme tipi göz önünde bulundurulmalıdır. (Bkz. Şekil 3.15)



Şekil 3.15. Gerilme çeşitleri (Cowdrey et al., 1998)

#### 3.2.4. Yapıştırıcı çeşitleri

Son zamanlarda kullanılan yapıştırıcılar iki ana gruba ayrılabilir. Bunlar; Kimyasal tipleri ve formları açısından yapıştırıcılar.

##### a-) Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar

##### 1. Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar

Yapısal yapıştırıcılar da denir. En güçlü yapıştırıcılardır. Bunlar;

- Anaerobikler
- Siyanoakrilatlar
- Sertleştirilmiş Akrilikler
- Poliüretanlar
- Modifiye Edilmiş Fenolikler
- Epoksiler

#### Anaerobikler

Akrilik adı verilen reçine ana malzemesidir. Genellikle sızdırmazlık amaçlı kullanılır. Hava ile teması kesildiğinde sertleşir.

#### Siyanoakrilatlar

Yapıştırma işlemi için yapıştırılacak yüzeyin nemini kullanırlar. Nem ile reaksiyona girerek hızlı bir kuruma gerçekleştirirler. Genellikle plastik malzemelerde kullanılırlar.

#### Sertleştirilmiş Akrilikler

Yapıştırılacak yüzeylerin birine reçine, diğer yüzeye ise katalizör uygulanarak yapıştırma işlemi uygulanır. Hızlı sertleşirler ve sertliğin istendiği yerlerde kullanılırlar.

#### Poliüretanlar

Darbe dayanımları yüksektir, iki parçalı ve hızlı sertleşebilen yapıştırıcılar olup, cam esaslı kumaşlar için kullanılırlar.

#### Modifiye Edilmiş Fenolikler

Yapıştırılma işlemleri için ısı ve basınca ihtiyaç duyarlar. Yüksek mukavemet gerektiren yerlerde uygun yapıştırıcılardır.

#### Epoksiler

Epoksi reçinesi; vizkoz sıvı ya da kırılğan katı bulunur. Epoksi reçineleri tek kullanılmazlar, formülasyon şeklinde diğer maddelerle polimerize olarak veya çapraz bağlanarak farklı yapıda, farklı özellikte termoset plastik madde oluştururlar. Metal, ahşap ve seramiğe kolay yapışırlar ve asidik seviyesinin çok yüksek olmadığı durumlarda kimyasallara karşı dayanıklıdırlar. Epoksi yapıştırıcılar yüksek penetrasyon, düşük vizkoziteli ve polar-apolar grupları barındırmasından dolayı uçak, otomobil, inşaat, gemi ve/veya elektrik endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Kohezyon kuvveti en yüksek yapıştırıcı türüdür.

#### Epoksi Karışımlarıyla Elde Edilen Yapıştırıcılar

- Epoksi-Polisülfat Yapıştırıcısı
- Epoksi-Fenolik Yapıştırıcısı
- Epoksi-Poliamid Yapıştırıcısı
- Epokis-Naylon Yapıştırıcısı

## **2.Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar**

Yapısal olmayan yapıştırıcılar da denir. Düşük mukavemete sahiptirler. Bu yapıştırıcı tipler;

- Sıcak Eriyikler
- Kauçuk Yapıştırıcılar
- PVA'lar (Polyvinyl Acetates)
- Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar

### **b-) Formları açısından yapıştırıcılar**

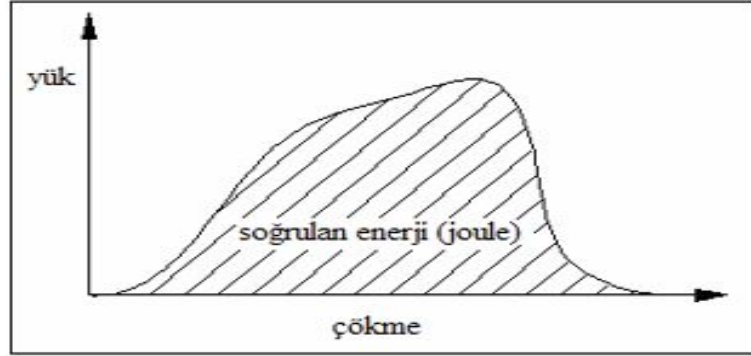
Yapıştırıcılar formlarına göre; film, macun, sıvı ve toz halinde bulunabilirler. Bu formlara göre de farklılık gösteren yapıştırıcı grupları aşağıdaki gibidir.

- Macun Tipi Yapıştırıcılar (*REDUX408,EA9309,EA9321,EC1838 B/A, EA 934NA,EA9330, ARALDİTE*)
- Film Tipi Yapıştırıcılar (*REDUX312.06, FM73.06,FM123-5.06,FM300K*)
- Düşük Vizkoziteli Yapıştırıcılar (*ARALDİTE AV134, ARALDİTE AY105İ EC2216 B/A, EA956, HYSOL EA 9309*)
- Düşük Yoęunluklu Yapıştırıcılar (*EC3524 B/A, EC3439 HT, EC3500 B/A, BOSTIC E5260*)
- Reçineler (*ARALDİTE LY564-1, EPİCOTE 816, RESİN EUROPROX 730*)
- Köpükler (*REDUX204, FM33, F41,HYSOL THERMO FOAM3050, AF3024*)  
(Kodakoğlu, 1996)

### **3.3. Darbe**

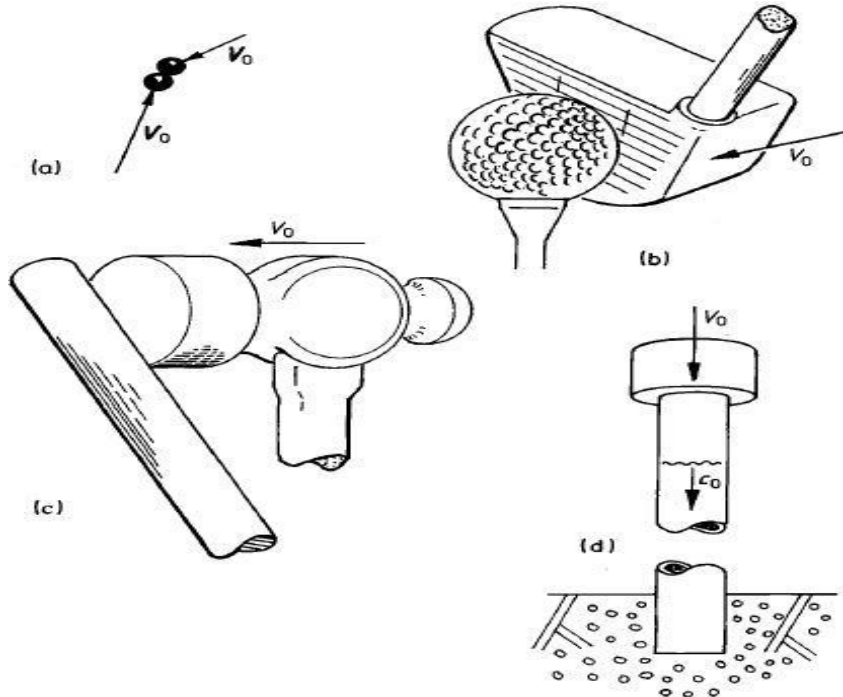
Darbe malzemeler üzerine düşük, orta veya yüksek hızlarda kuvvetlerin aniden uygulanması şeklinde tanımlanabilir. Mühendislikte genellikle darbe kuvvetlerine karşı malzemeler elastik ve/veya plastik deformasyon şeklinde tepki verirler. Kompozit malzemelerde ise darbe kuvvetine göre; malzemedede hasarlar meydana gelebilir. Darbe etkisi altında kalan malzemenin, darbe kaynaklı enerjiyi soğurabilmesi, malzemenin tokluğunun bir ölçüsüdür. Bu sebeple darbe deneylerinde soğrulan enerjinin miktarının bilinmesi, malzemenin güvenliği açısından en önemli parametredir. Malzemelerin darbe yüklerine karşı gösterdiği dirence darbe direnci denir. Bu yüzden malzemelerin darbe

direncinin bilinmesi mühendislikte malzemelerin çalışma ömrü açısından çok önemli bir yere sahiptir. Aşağıdaki şekilde eğri altındaki bölge soğurulan enerjiyi vermektir (Özenç, 2007). (Bkz. Şekil 3.16)



**Şekil 3.16.**Yük-çökme eğrisi

Darbe mekaniği, bir çarpışma olayında oluşan kuvvetlerin tespiti ve darbe kuvvetlerinin neden olduğu malzemedeki darbe direncinin incelenmesi ile ilgilidir. Çarpışma esnasında iki malzemenin yüzeyleri arasında meydana gelen basınç yükselerek, şekil değişimine neden olur. Darbe sırasında meydana gelen bu şekil değişimleri cisimlerin sertliğine ve çarpma hızına bağlıdır. Darbe problemleri için aşağıdaki gibi çeşitli analitik yaklaşımlar bulunmaktadır (Özenç, 2007). (Bkz. Şekil 3.17)



**Şekil 3.17.**Darbe problemleri için farklı analitik yaklaşımlar

- a) Parçacık darbesi
- b) Katı cisim darbesi
- c) Şekil değiştirebilen cismin düşey darbesi
- d) Şekil değiştirebilen cismin eksenel darbesi (Atahan, 2015)

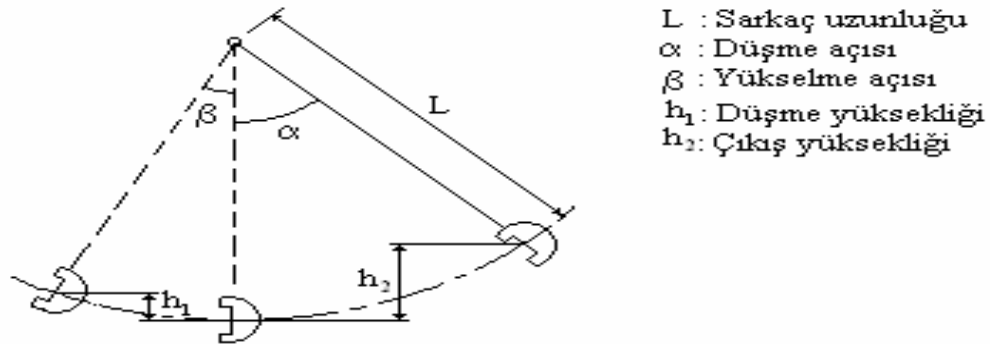
### 3.3.1. Darbe test yöntemleri

İki türde yapılır. Bunlar; Çentik darbe ve ağırlık düşürme şeklindedir. Çentik Darbe; Charpy ve İzod Darbe testleri, Ağırlık Düşürme; Düşük hızlı ve Yüksek hızlı darbe testleridir (Akın, 2008).

#### 3.3.1.1.Çentik darbe testleri

Bu deneylerde malzemelerde yapay bir çentik oluşturulup, dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnç tespit edilir. Darbe esnasında çentiğin tabanına dik bir gerilme oluşur ve kırılma bu gerilme ile başlar. Kırılma oluşabilmesi için gerilimin malzeme içerisinde kohezif kuvvetlerden büyük olması gerekir. Sünek ve gevrek kırılma olarak ikiye ayrılır. Malzeme elastik şekil değiştirme göstermeden kırılırsa gevrek, belli bir süre elastik şekil değiştirme gösterip plastik biçim değiştirmeden sonra kırılırsa sünek kırılma olur. Sünek kırılmalarda; kırılmadan sonra malzeme yüzeyinde girintili-çıkıntılı bir görünüş, gevrek kırılma da ise düz bir yüzey şeklide görünüş oluşur.

Bu deneylerde sarkaç tipi cihazlardan yararlanılır. (Bkz. Şekil 3.18) Malzemenin kırılması için gereken enerji tespit edilir. Bu değer; malzemenin darbe direncidir.



Şekil 3.18. Çentik darbe deneyinin şematik çalışma prensibi

Enerji hesaplaması için formül ise;

$$\text{Kırılma Enerjisi} = G.(h-h_1) = G.L.(\cos\beta - \cos\alpha)$$

$G$  = Sarkacın ağırlığı (N)

$L$  = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m)

$h$  = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m)

$h_1$  = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m)

$\alpha$  = Düşme açısı (derece)

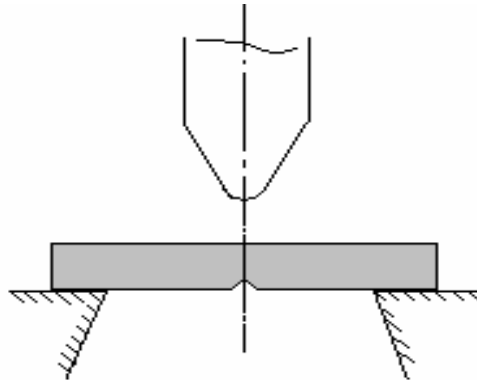
$\beta$  = Yükseliş açısı (derece)

Darbe direnci 'kg.m' veya 'kg.m/cm<sup>2</sup>' cinsinden ifade edilmektedir.

Deney sırasında sarkaç, daha önce tespit edilen potansiyel enerji seviyesine yükseltilir. Numune uygun biçimde yerleştirilir. Sarkaç düzgün bir şekilde bırakılıp, sonuçlar kadrandan okunur.

#### **a- Charpy darbe testi**

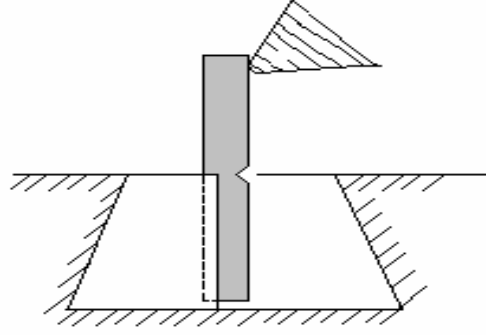
Çentikli numune yatay şekilde iki mesnete yaslanacak ve çentikli kısım aşağı bakacak şekilde yerleştirilir. Sarkaç yardımıyla darbe etkisi yapılır ve kırılma enerjisi tespit edilir. (Bkz. Şekil 3.19)



**Şekil 3.19.** Charpy darbe testi

### b- İzod darbe testi

Çentikli numune dikey bir kiriş şeklinde çentiğin sarkacın geleceği kısma dönük bir şekilde yerleştirilmesi ile yapılır. Sarkaç yardımıyla darbe etkisi oluşturulur. Kırılma enerjisi tespit edilir. (Bkz. Şekil 3.20)



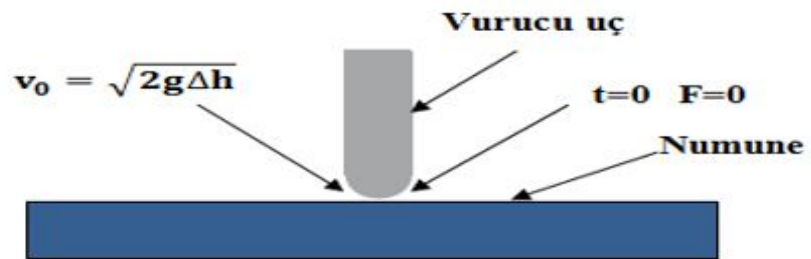
Şekil 3.20. İzod darbe testi

### 3.3.1.2. Ağırlık düşürme testleri

1 ile 10 m/s arasında değişen hızlarda düşük hızlı darbe, 10 m/s üzerindeki hızlarda yüksek hızlı darbe olarak ele alınır.

### a- Düşük hızlı darbe

Düşük hızlı darbe deneylerinde belli bir hızla numuneye çarpması sağlanan vurucu vardır. Vurucu belli bir potansiyel enerjiden sonra malzeme üzerine serbest düşmeye bırakılır. (Bkz. Şekil 3.21)



Şekil 3.21. Düşük hızlı darbe deney düzeneği

Temas kuvvetinin zamana bağılı değişimi sensörler yardımıyla elde edilir. (Bkz. Şekil 3.22) İvmenin zamana bağılı değişimi Newton'un II. Kanunundan Denk 3.1'den elde edilir;

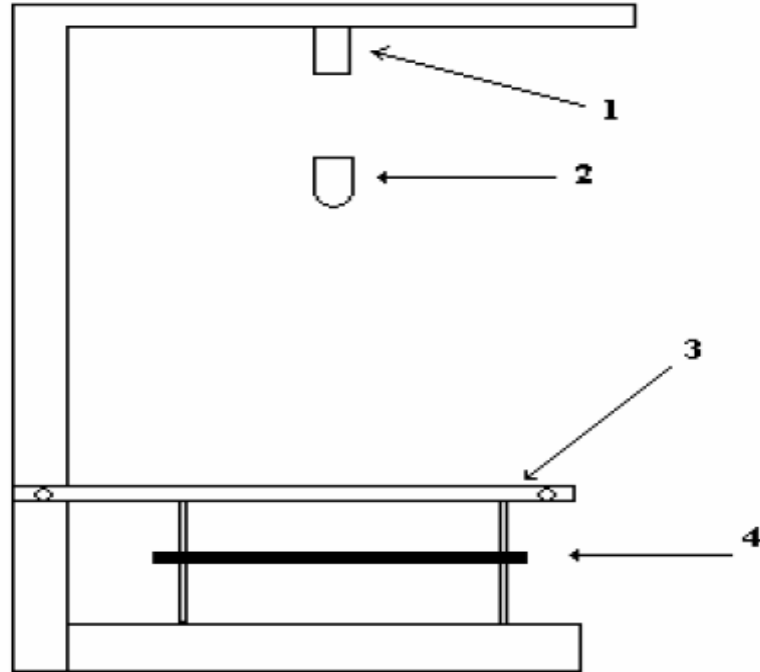
$$a_i = \frac{F_i}{m} \quad (3.1)$$

Burada m vurucu kütlesidir.  $a_i$  ve  $F_i$  ivme ve temas değerini gösterir. Serbest düşmede başlangıç hızı sıfırdır, potansiyel enerjiden kaynaklı darbe anındaki hız değeri ise Denk 3.2 ;

$$V = \sqrt{2g\Delta h} \quad (3.2)$$

Serbest düşmede hava direnci küçük olduğundan ihmal edilebilir. h yüksekliğindeki vurucu kütlesinin potansiyel enerjisi Denk 3.3;

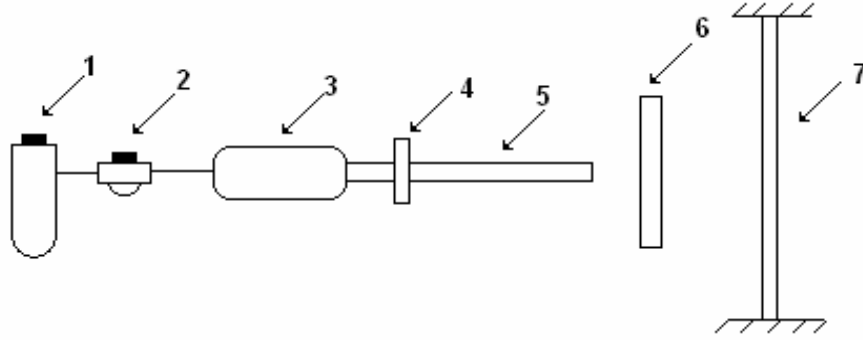
$$P_v = mgh \quad (3.3)$$



**Şekil 3.22.** Ağırlık düşürme testi düzeneği şematik gösterimi 1) magnet, 2) ağırlık ve vurucu uç, 3) numune tutucu, 4) numune (Akın, 2008)

### b- Yüksek hızlı darbe

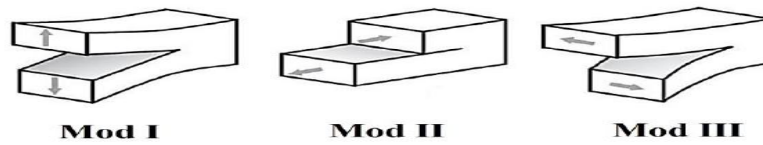
Genellikle balistik deneylerde mermi ile yapılır. Çelik yelekler ve zırhlı araç malzemelerinin testleri için uygundur. Bu deneyler gaz tabancası yardımıyla yapılır. (Bkz. Şekil 3.23)



**Şekil 3.23.** Gaz tabancası deney düzeneği şeması 1) hava filtresi, 2) basınç regülatörü, 3) hava tankı, 4) vana, 5) boru, 6) hız ölçüm cihazı, 7) örnek (Akın, 2008)

### 3.4. Kohezif Bölge Modeli

Kohezif Bölge Modeli (Cohesive Zone Modelling) modelleme tekniği iki yüzey arasındaki bağların hasar oluştuktan sonra bir anda kopması yerine, kademeli olarak mukavemetinin düşmesi temeline dayanır. CZM'nin uygulandığı bölgedeki gerilmeler normal ve kayma doğrultusunda gerçekleşir. CZM modeli üç temel kırılma moduna dayanır. (Bkz. Şekil 3.24) Bu kırılmalar çatlağın ilerlemesiyle oluşur (Korkut, 2017).



**Şekil 3.24.** Kırılma modları

#### **Mode-I; Çatlak Açılma Deformasyonu**

Gerilmenin normal bileşeni çatlak yüzeyine dik, Y eksenine doğrultusunda, çekme gerilmesidir.

### **Mode-II; Çatlak Kayma Deformasyonu**

Gerilmenin kayma bileşeni, çatlığa dik ve X eksenine doğrultusundadır.

### **Mode-III; Çatlak Yırtılma Deformasyonu**

Gerilmenin kayma bileşeni, Z eksenine doğrultusundadır. Dip kenarına paraleldir.

Karışık mod yüklemesi yukarıdaki üç modu da kombine eder. Karışık modda hasarın ilerleme kriteri için enerji yayılım hızları kullanılır. Enerji yayılım hızı sonrası oluşan hasar kriteri için genellikle; Üstel kanun (Power Law) (Bkz. Denk. 3.4) , Benzeggaghand and Kenane kriteri (BK) (Bkz. Denk. 3.5) ve Reeder Law kriterleri kullanılmaktadır.

Üstel Kanun;

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^m + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^n + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^p = 1 \quad (3.4)$$

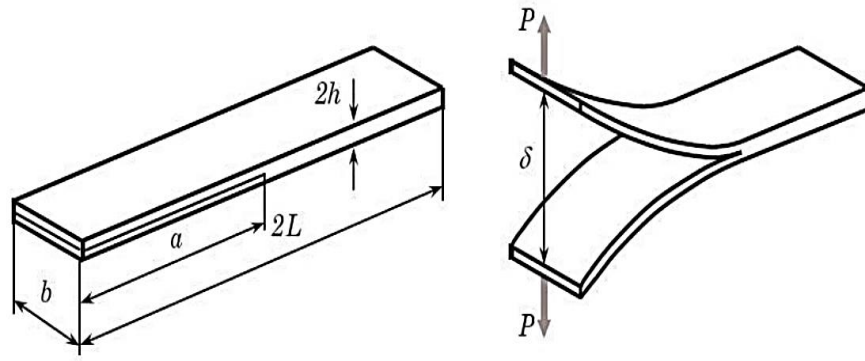
Benzeggaghand and Kenane;

$$\frac{G_I + G_{II} + G_{III}}{G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^\eta} = 1 \quad (3.5)$$

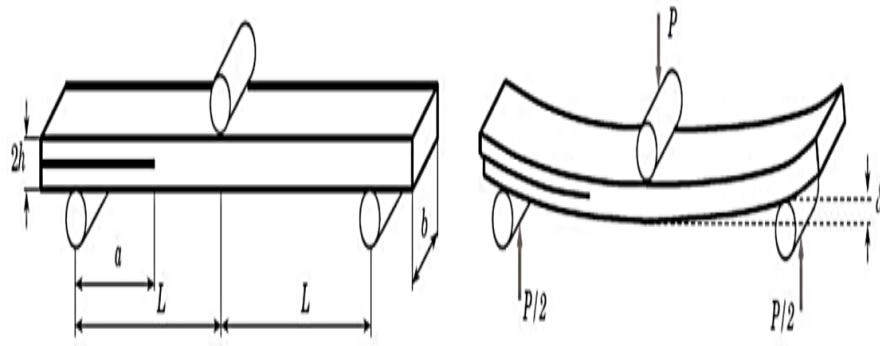
G enerji yayılım hızı, m, n, p,  $\eta$  değerleri deneysel yollarla bulunan parametrelerdir.

Kohezif bölgedeki malzemenin rijitliği kullanılarak gerilme ve yer değiştirme hesabı yapılır. Malzeme de bu değerler doğrultusunda hasar başlangıcı görülür ve kırılma tokluğuna ulaşıldığında kopma meydana gelir.

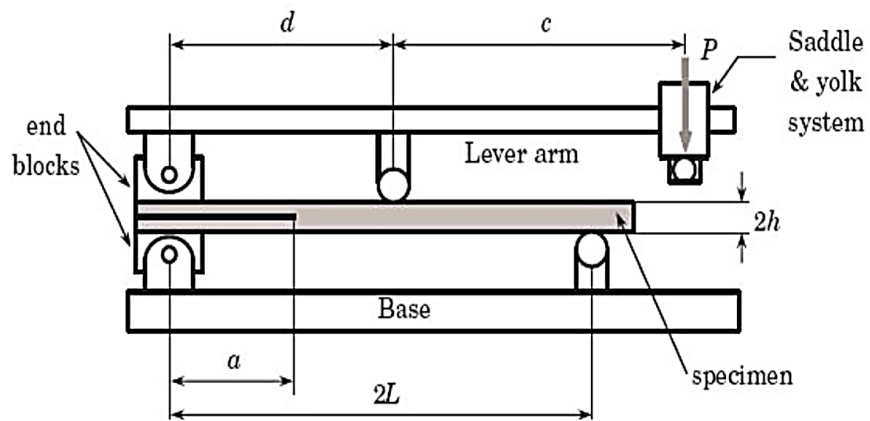
Kohezif alanda yer alan malzemeler (genellikle yapıştırıcılar) çekme-ayrılma kanuna göre (Traction-Separation Law) tanımlanmaktadır. İki malzeme yapıştırıldıktan sonra, ayrılması için belli bir enerji harcanmaktadır ve bu enerjinin harcandığı bölge kohezif bölgedir. Kohezif bölgedeki malzemelerin parametreleri belli testler ile elde edilir. Bu testlerden başlıcaları ; DCB (Double Cantilever Beam) testi (Bkz. Şekil 3.25), 3ENF (Three End Notched Flexure) testi (Bkz. Şekil 3.26) ve MMB (Mixed Mode Bending) testi (Bkz. Şekil 3.27)



Şekil 3.25. DCB (Double Cantilever Beam) testi (Ranaweera, 2010)



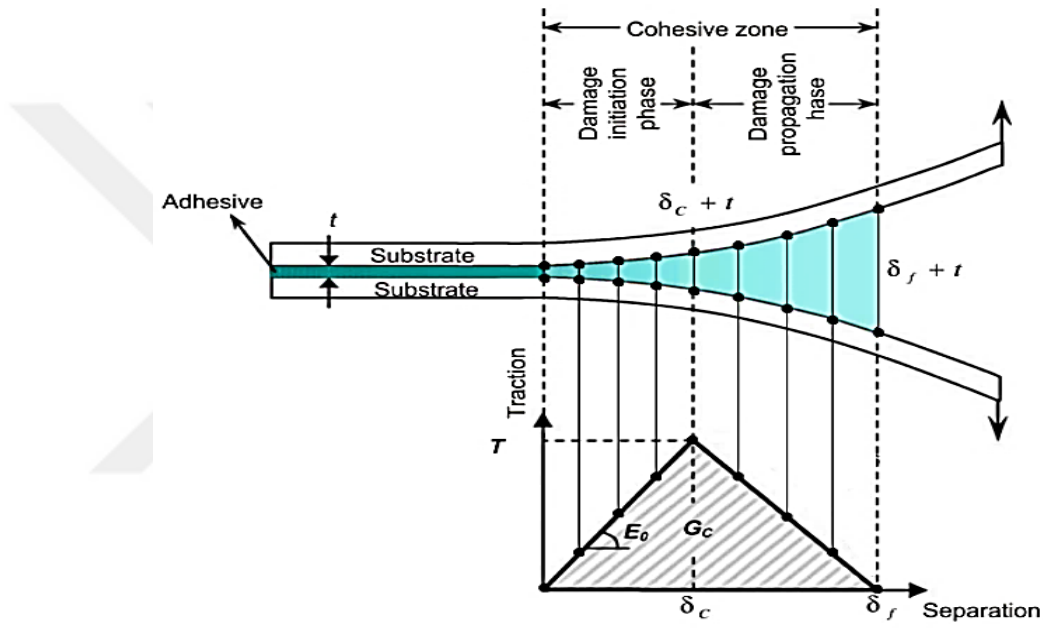
Şekil 3.26.3ENF (Three End Notched Flexure) testi (Ranaweera, 2010)



Şekil 3.27.MMB (Mixed Mode Bending) testi (Ranaweera, 2010)

### 3.4.1. Traction - separation law (Çekme - ayrılma kanunu)

Çekme ayrılma kanunu, mukavemet hesaplamalarındaki mühendislik gerilme-gerinim eğrisinin gerilme-yer değiştirme biçimine dönüştürülmüş şeklini baz alır. Çekme-Ayrılma kanunu iki bölüme ayrılabilir. Birinci bölüm başlangıç noktasından hasara kadar olan bölgedir. Bu aralık yapının rijitliğidir. Hasar bölgesi, hasar kriterleri ve malzemenin özellikleri ile bulunan  $T_{maks}$  (maksimum çekme) ya da bu andaki yer değiştirme  $\delta_c$  olarak açıklanabilir. (Bkz. Şekil 3.28)

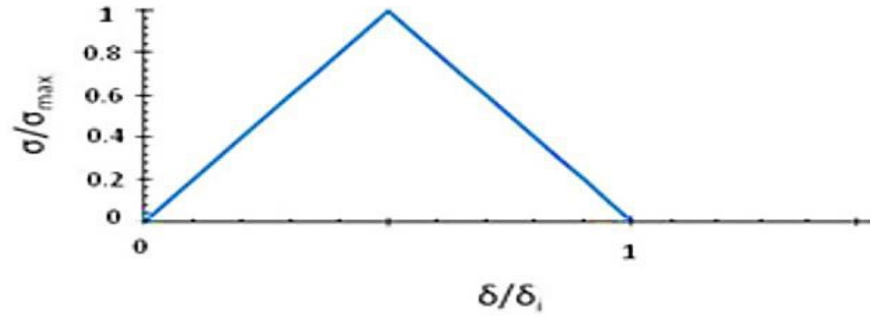


Şekil 3.28. Çekme-ayrılma kanunu gösterimi (Noorman, 2014)

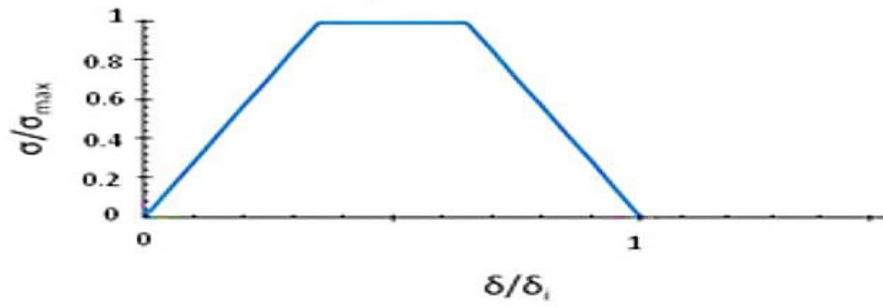
Hasar bölgesine ulaşıldıktan sonra yer değiştirme sürekli artmaya devam ettikçe elastik davranış (çekme) yerini ayrılmaya bırakır. İkinci bölge hasar başlangıcı ile kopma arasındaki bölge olarak tanımlanabilir. Bu bölgedeki hasar ilerleme kriterleri kullanılır. Enerji yayılım hızı;  $G$  hasar ilerleme kriteridir. Kohezif enerji olarak da adlandırılan enerji yayılım hızı; çekme-ayrılma kanununda eğrinin altında kalan alandır. Kritik enerji yayılım hızına yaklaştıkça çekme değeri sıfıra yaklaşır. Çekme değerinin sıfıra yaklaşması demek, malzemeleri bir arada tutan kuvvetin bulunmaması ve kohezif alanın yok olması demektir. Böylece çatlak ilerlemeye başlar (Korkut, 2017).

Çekme-Ayrılma Kanunu; geometri, malzeme ve deney tipine göre kullanılan alt kanunları vardır. Bunlar; Bilineer Kanun, Trapezoid Kanun ve Üstel Kanundur. Delaminasyon

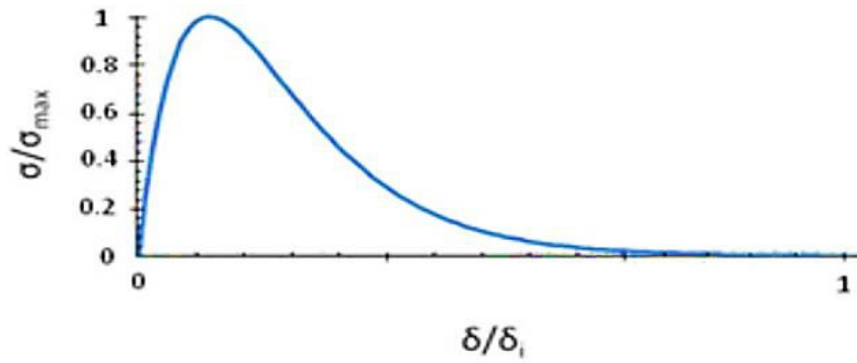
alışmalarında genellikle Bilineer kanun, sünek malzemelerde Trapezoid kanun ; DCB testlerinde de genellikle üstel kanun tercih edilir. (Bkz. Şekil 3.29 Şekil 3.30 Şekil 3.31)



Şekil 3.29. Bilineer çekme-ayrılma eğrisi(Korkut, 2017)



Şekil 3.30. Trapezoid çekme-ayrılma eğrisi(Korkut, 2017)



Şekil 3.31. Üstel çekme-ayrılma eğrisi(Korkut, 2017)

## **4. MATERYAL ve YÖNTEM**

### **4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi**

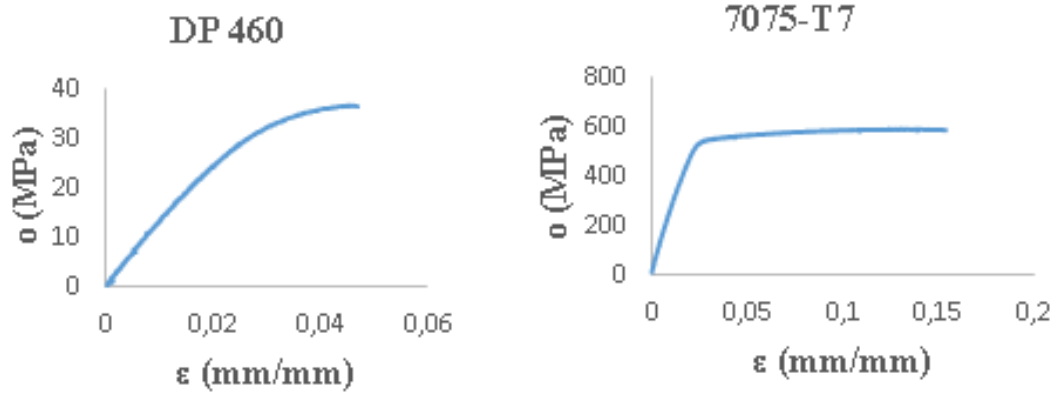
Sonlu Elemanlar Metot (SEM)'u mühendislikte karmaşık problemlerin hassas bir şekilde çözüme ulaşmasında en etkili yöntem olarak kullanılan bir sayısal çözümlemedir. İlk olarak uçak gövdelerinde gerilme analizi için kullanılmaya başlanmış olup daha sonrasında uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinde de kullanılabilir olduğu görülmüştür. Bu yöntemde dizayn edilen bir yapı ya da bir sistem matematiksel denklemlere dökülerek ifade edilir. Bu metotun asıl amacı karmaşık olan sistemleri basite indirgeyip tam sonuç almanın yerine yaklaşık değerler almayı hedeflemektir. Sistemin belli şartlar altında çalışmasını incelemeyi amaçlar. Bu metot ile yapılan analizler sonucunda gerekli iyileştirmeler yapılmaktadır.

Sonlu elemanlar analizinde model oluşturulduktan sonra gerekli sınır şartları tanımlanır. 2B ve 3B geometrik şekiller oluşturulabilir. Daha sonra oluşturulan modelin malzemesi belirlenir ve parçaya tanıtılır. Model küçük farklı geometrik yapılara sahip temel elemanlara ayrılır. Bu işlem ağ yapısı(mesh) işlemidir. Bu meshlerin köşelerinde düğümler(node) vardır. Hesaplamalar bu meshler üzerinde olur.

Sonlu Elemanlar Metodunu kullanarak çözüm yapan birçok bilgisayar destekli analiz programları mevcuttur. Bu tez çalışmasında sayısal analiz için ticari amaçlarla üretilmiş bir sonlu elemanlar analizi yazılımı olan ABAQUS CAE 2017 programdan yararlanılmıştır.

### **4.2. Analizde Kullanılacak Malzemelerin Mekanik Özellikleri**

Bu tez çalışmasında tek tesirli bindirme bağlantısında yapıştırıcı malzemenin darbe yükü altında davranışlarını incelemek amacıyla, ana malzeme olarak Al7075 alışı ve yapıştırıcı olarak DP460 yapıştırıcısı kullanılmıştır. Bu malzemelere ait mekanik özellikler aşağıda verilmiştir. (Bkz. Şekil 4.1 Tablo 4.1 Tablo 4.2)



**Şekil 4.1.** Al7075 ve DP460 gerilme-gerinim grafikleri (Çam, 2016).

**Tablo 4.1.** Al7075 malzemesinin mekanik özellikleri (Çam, 2016)

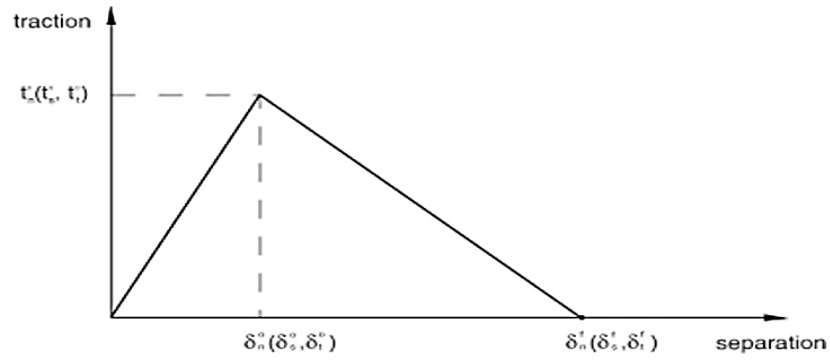
| Özellikler                      | Değerler |
|---------------------------------|----------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )   | 2,7      |
| Elastisite (Young) Modülü (MPa) | 73293    |
| Poisson Oranı                   | 0,33     |

**Tablo 4.2.** DP460 yapıştırıcısının mekanik özellikleri (Durmuş & Akpınar, 2020)

| Özellikler                      | Değerler |
|---------------------------------|----------|
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )   | 1,17     |
| Elastisite (Young) Modülü (MPa) | 2077     |
| Poisson Oranı                   | 0,38     |

#### 4.3. ABAQUS Programında CZM Uygulaması

ABAQUS yapıştırıcı malzemelerin hasar davranışını hasar başlangıcı ve hasar ilerlemesi şeklinde iki bölüme ayırarak incelemektedir. Yapıştırıcılar kohezif elemanlar olarak tanıtlır ve kohezif özellikleri tanımlanır. Kohezif elemanlar kabuk elemanı ya da solid eleman olarak atanabilmektedir. (Bkz. Şekil 4.2)



**Şekil 4.2.**Çekme ve ayrılma kanunu (Korkut, 2017)

#### 4.3.1.Hasar başlangıcı

Malzemenin zorlandıktan sonra mukavemetinin düşmeye başladığı anı; yani hasara uğramaya başladığı zamanı ifade etmektedir. ABAQUS'te 4 farklı hasar başlangıç kriteri kullanabilmekteyiz. (Bkz. Tablo 4.3)

**Tablo 4.3.**Hasar başlangıcı

| ABAQUS Hasar Başlangıcı Modelleri |                          |                                  |                                  |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1                                 | 2                        | 3                                | 4                                |
| Maksimum Nominal Gerilme          | Maksimum Nominal Gerinim | İkinci Dereceden Nominal Gerilme | İkinci Dereceden Nominal Gerinim |

$$\text{Maksimum Nominal Gerilme Kriteri; } \max\left\{\frac{T_I}{T_{m,1}}, \frac{T_{II}}{T_{m,II}}, \frac{T_{III}}{T_{m,III}}\right\}=1$$

$$\text{Maksimum Nominal Gerinim Kriteri; } \max\left\{\frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_{m,1}}, \frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_{m,II}}, \frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon_{m,III}}\right\}=1$$

$$\text{İkinci Dereceden Nominal Gerilme Kriteri; } \left\{\left(\frac{T_I}{T_{m,1}}\right)^2, \left(\frac{T_{II}}{T_{m,II}}\right)^2, \left(\frac{T_{III}}{T_{m,III}}\right)^2\right\}=1$$

$$\text{İkinci Dereceden Nominal Gerinim Kriteri; } \max\left\{\left(\frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_{m,1}}\right)^2, \left(\frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_{m,II}}\right)^2, \left(\frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon_{m,III}}\right)^2\right\}=1$$

Yukarıdaki kriterlerde belirtilen gerilme ve gerinim oranlarının 1'e eşit olması durumunda hasarın başladığı kabul edilir (Korkut, 2017).

#### 4.3.2.Hasar ilerlemesi

Hasarın başlaması ile yapıştırıcının kopması arasındaki bölümü ifade etmektedir. Hasar ilerlemesi malzeme mukavemetinin nasıl, ne şekilde azaltılacağını ifade eden kurallara dayanmaktadır. ABAQUS hasar ilerlemesini iki farklı kuralın altında incelemektedir. (Bkz. Tablo 4.4)

**Tablo 4.4.Hasar ilerlemesi**

| <b>ABAQUS Hasar İlerlemesi Modelleri</b> |                                      |
|------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>1-) Enerjiye Dayalı</b>               | <b>2-) Efektif Deplasmana Dayalı</b> |
| Üstel Kriter                             |                                      |
| Benzegagh-Kenane                         |                                      |

##### 4.3.2.1 Enerjiye dayalı hasar ilerlemesi

Kırılma enerjisi hasar esnasında harcanan enerjidir ve hasar ilerlemesinde kullanılan bir parametredir. Çekme-Ayrılma Eğrisinin altında kalan alan kırılma enerjisi olarak ifade edilir. Analizi uygulayacak kişi tarafından yapıştırıcıya ait olan kırılma enerjisi ABAQUS programına tanımlanır. ABAQUS enerjiye dayalı hasar hesaplaması yapabilmek için iki kriter seçeneği bizlere sunmaktadır. Bu kriterler; Üstel Kriter ve Benzegagh-Kenane Kriter'idir (Korkut, 2017).

##### Üstel kriter

Farklı modelardaki kırılma enerjilerinin karışık mode durumundaki etkilerini görmek için kullanılan üstel kriter aşağıdaki gibidir ve Denk. 3.6'da, 'a' değeri deneysel çalışmalarla bulunmaktadır.

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^a + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^a + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^a = 1 \quad (3.6)$$

#### **Benzeggagh-Kenane (BK) kriteri**

Üstel kriterden farklı olarak mode-II ve mode-III durumundaki kırılma enerjilerini eşit kabul eder.(Benzeggagh & Kenane, 1996) Malzemenin karışık mode durumun da kopacağı noktanın bulunmasındaki enerji hesabı Denk. 3.7 aşağıdaki gibidir;

$$G_I + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_S}{G_T}\right)^\eta = G^C \quad (3.7)$$

$$G_S = G_{II} + G_{III}$$

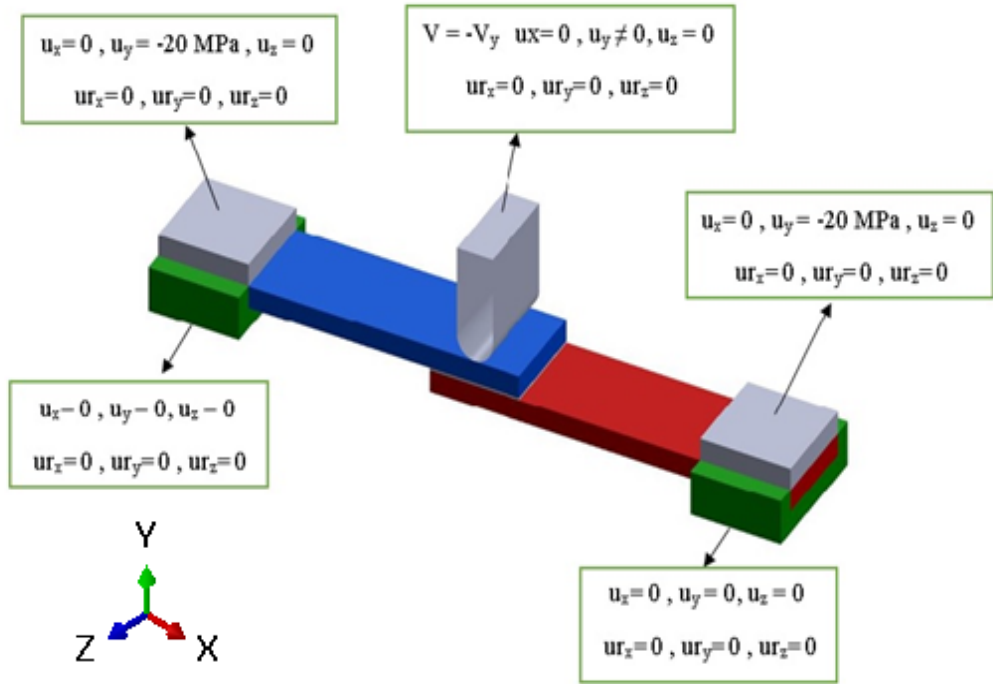
$$G_T = G_I + G_{II} + G_{III}$$

#### **4.3.2.2 Efektif deplasmana dayalı hasar ilerlemesi**

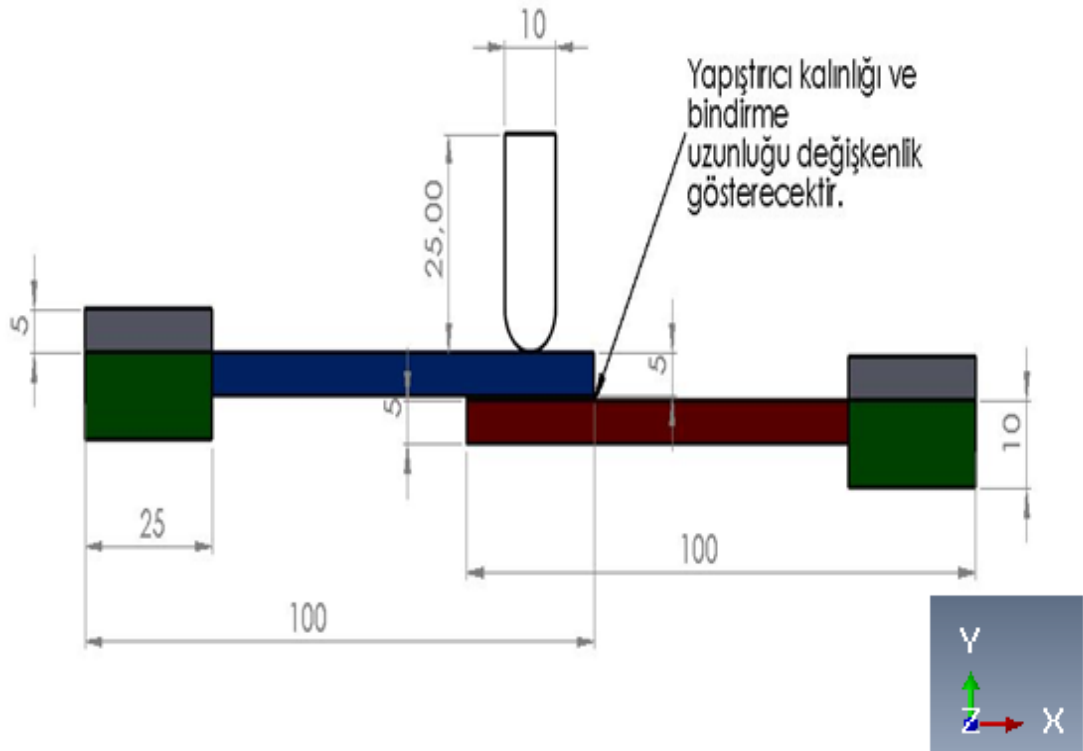
Malzemenin kopacağı ana kadar ki deplasman değeri analizi yapacak kişi tarafından girilir ve hasarın başlamasından girilen deplasman değerine kadar yapıştırıcının mukavemeti düşürülür. Yapıştırıcı için girilen maksimum deplasman değerine ulaşıldığına malzeme ortadan kaldırılır.

#### **4.4.ABAQUS Programında Analizin Uygulanması**

Yapıştırma bağlantılarında darbe davranışlarını incelemek için tek tesirli bindirme bağlantılarının sonlu elemanlar analizi üç boyutlu sonlu elemanlar modeli ile ABAQUS CAE 2017/ Explicit Dynamics sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe testine uygun olabilecek şekilde tek tesirli bindirme bağlantısı modellenmiş ve test standartlarına uygun tanımlanmıştır (ASTM 2019). (Bkz. Şekil 4.3) Yapıştırıcının bindirme uzunluğu ve kalınlığındaki değişiminin etkisini görmek amacıyla farklı bindirme bağlantısı uzunlukları ve farklı kalınlıklar seçilmiştir. (Bkz. Şekil 4.4)



Şekil 4.3. Darbe yükü altındaki tek tesirli bindirme bağlantısı



Şekil 4.4. Tek tesirli bindirme bağlantısı ölçüleri

Şekil 4.4.'de verilen modeldeki ölçülerin birimleri mm'dir. Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı ve Vurucu için genişlik ölçüsü eşit ve 25mm'dir.

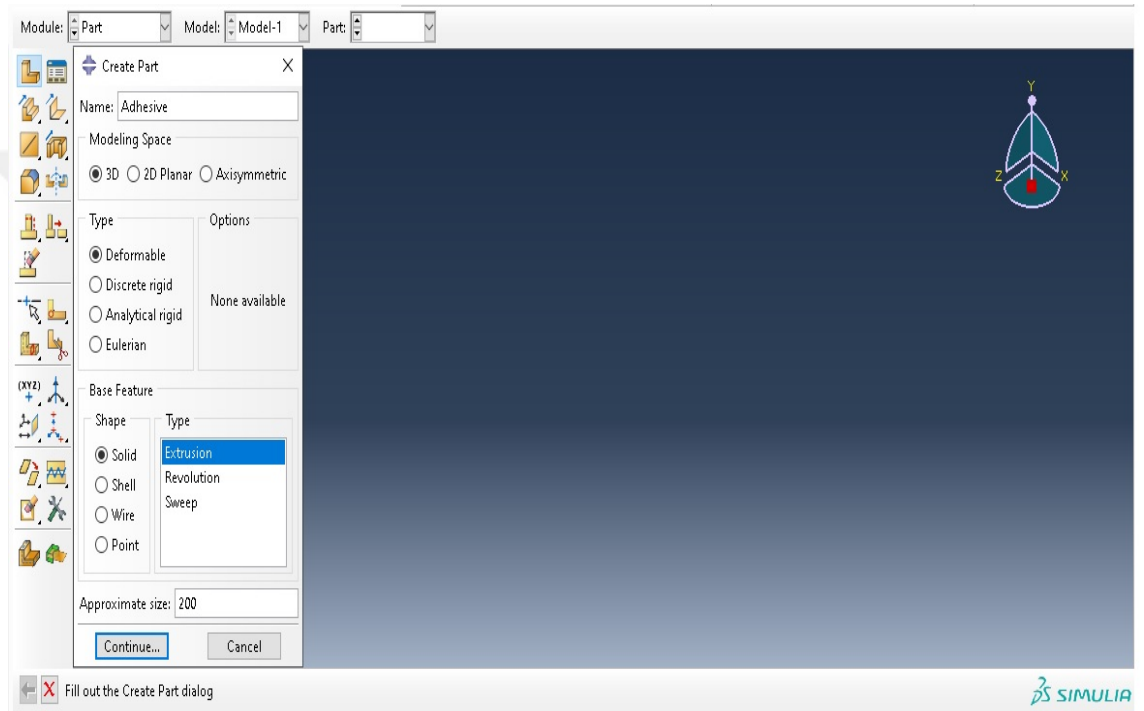
Darbe altındaki tek tesirli bindirme bağlantısını analiz etmek için uzunlukları aynı ve 100 mm olan iki Al7075 malzemeleri, kalınlık ve bindirme uzunlukları Tablo 4.5.'de gösterilen değerlerde olacak olan DP460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiştir. Bağlantıyı sabit tutmak amacıyla iki ucuna altlı üstlü çelik tutucular yerleştirilmiştir. Çelik tutucuların malzeme özellikler;  $E = 210 \text{ GPa}$  ve Poisson Oranı = 0,3 olarak tanımlanmıştır. Bu çelik tutuculardan alt taraftaki tutucunun x,y ve z yönündeki hareketleri ile bu yönlerdeki dönme hareketleri engellenmiştir. Üst tutucu bir sıkıştırma aparatı gibi 20 MPa'lık bir basınçla bindirme bağlantısını sıkıştırması sağlanmıştır. Tutucular ile bindirme bağlantısı arasında 0.5 değerinde bir sürtünme kuvveti uygulanmıştır. Vurucu yarı silindirik geometriye sahip olup  $r=5 \text{ mm}$  yarıçap ve 25 mm uzunluğa sahiptir. Ayrıca vurucu diğer malzemelerden daha rijit olması ve şekil değiştirmemesi gerektiği için sonlu elemanlar modelinde DISCRETE RIGID olarak tasarlanmıştır. Vurucu kütlesi gerçeğe yakın bir değer olarak yaklaşık 5 kg olarak belirlenmiştir. Vurucu rijit olarak modellendiğinden kütle, sınır şartlarının ve hız verilerinin girilebilmesi için merkez noktası referans noktası olarak belirlenmiş ve bu değerler bu nokta baz alınarak girilmiştir. Bu noktada hız yönü y doğrultusunda olduğu için rijit kütlenin x ve z yönündeki hareketleri engellenmiştir. Ayrıca dönme serbestliği her doğrultuda engellenmiştir.

**Tablo 4.5.Yapıştırıcı kalınlıkları ve bindirme uzunlukları**

| Yapıştırıcı Bindirme Uzunlukları (mm) | Yapıştırıcı Kalınlıkları (mm)           |
|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| 20                                    | 0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1,0 |
| 25                                    | 0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1,0 |
| 30                                    | 0,1-0,2-0,3-0,4-0,5-0,6-0,7-0,8-0,9-1,0 |

### Parçaların çizimi

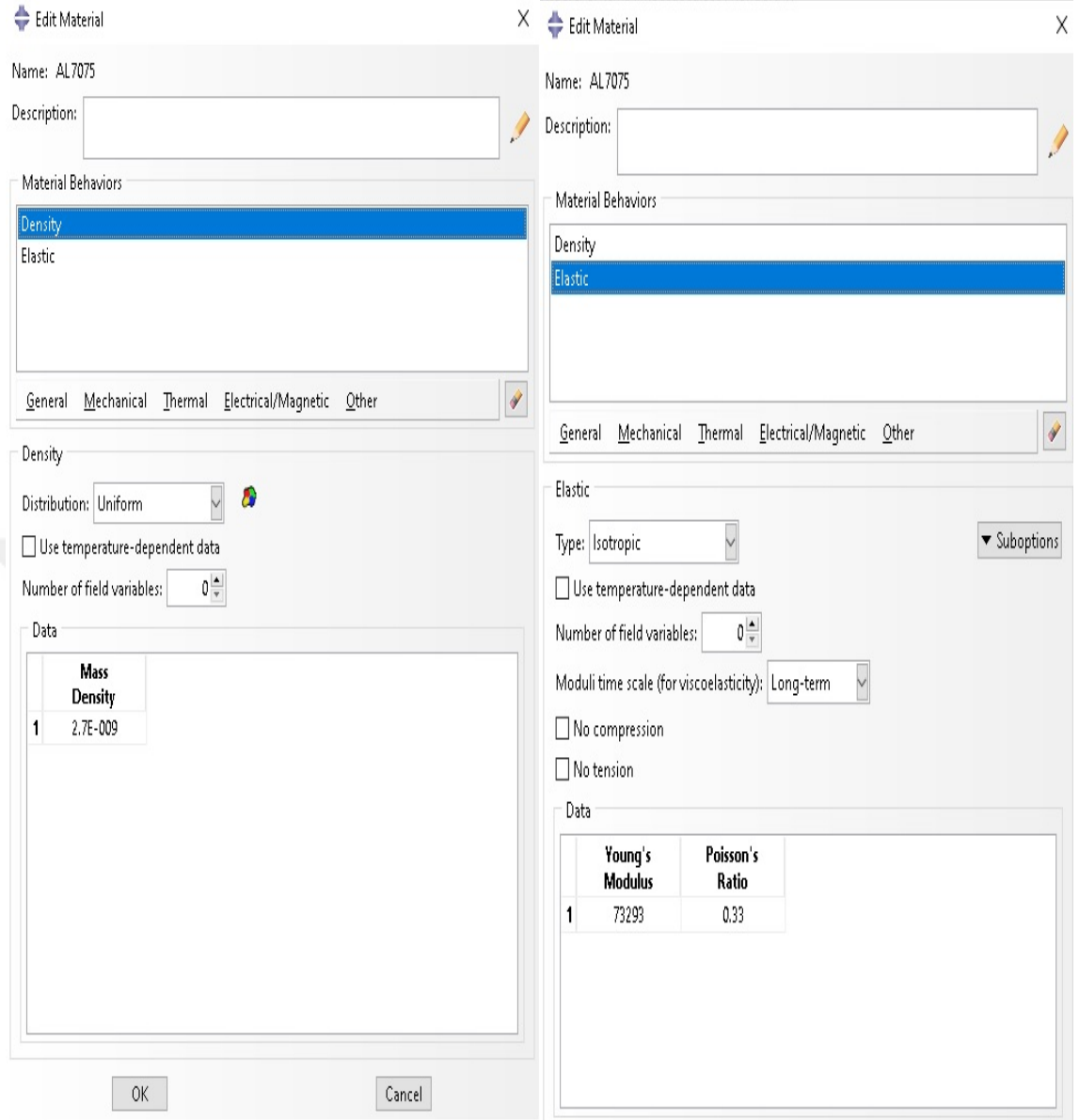
Tek tesirli bindirme bağlantısını analiz etmek için program başlatıldıktan sonra *Start session > Create Model Database > With Standard/Explicit Model* seçilir. Daha sonra *Part* sekmesinden *Create Part* başlığının altında parçaların tipleri, şekilleri ve boyutları tanımlandıktan sonra parçaların çizim işlemi yapılır. (Bkz. Şekil 4.5)



Şekil 4.5.Parçaları oluşturma

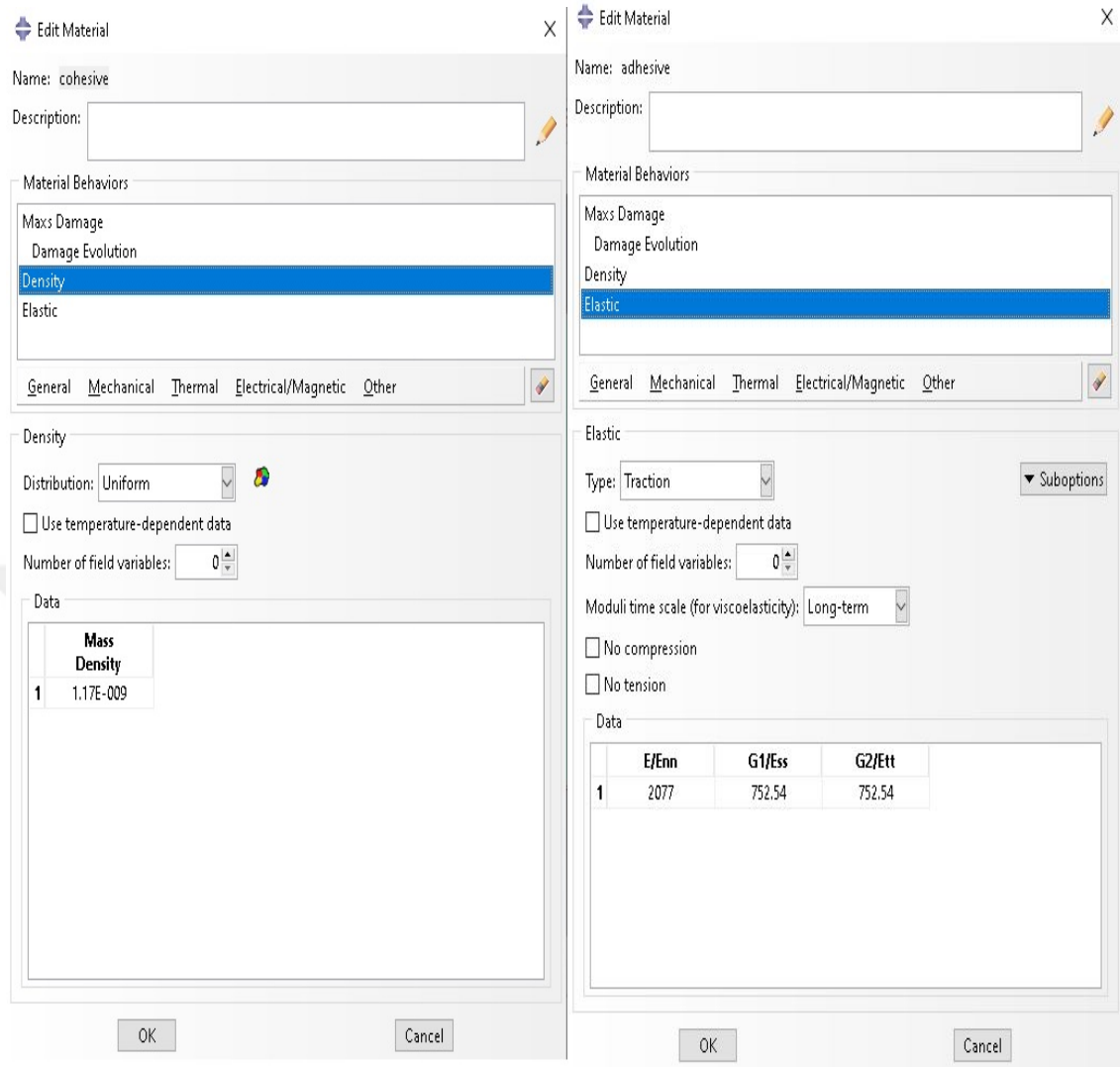
### Parçalara Malzeme Özelliklerinin Verilmesi

Parçaların çizim işlemi bittikten sonra parçalara malzeme özelliklerinin girilmesi gerekir. Malzeme özellikleri *Property* sekmesinden verilmektedir. Malzeme özelliklerini parçalara tanıtmadan önce *Create Material* bölümünden malzemeleri oluşturmamız gerekir. Alüminyum ve çelik malzemeler için; *Create Material > General > Density* bölümünden yoğunluğu, *Create Material > Mechanical > Elastic* bölümünden elastik özellikler girilir. Deneysel çalışma olmadığından analizde plastik özellikler göz ardı edilmiştir. (Bkz. Şekil 4.6)



**Şekil 4.6.**Alüminyum malzeme özellikleri

Yapıştırıcı (DP460) için malzeme özellikleri CZM methoduna uygun girilmesi gerekmektedir. (Bkz. Tablo 4.6) Yoğunluk için; *Create Material > General > Density* bölümü kullanılır. Yapıştırıcı CZM methoduna göre çözümleneceğinden kohezif özelliklerin girilmesi gerekir. Bu sebeple; *Create Material > Mechanical > Elastic* bölümü altında *Isotropik* tipi yerine tip olarak *Traction* seçilir. (Bkz. Şekil 4.7)

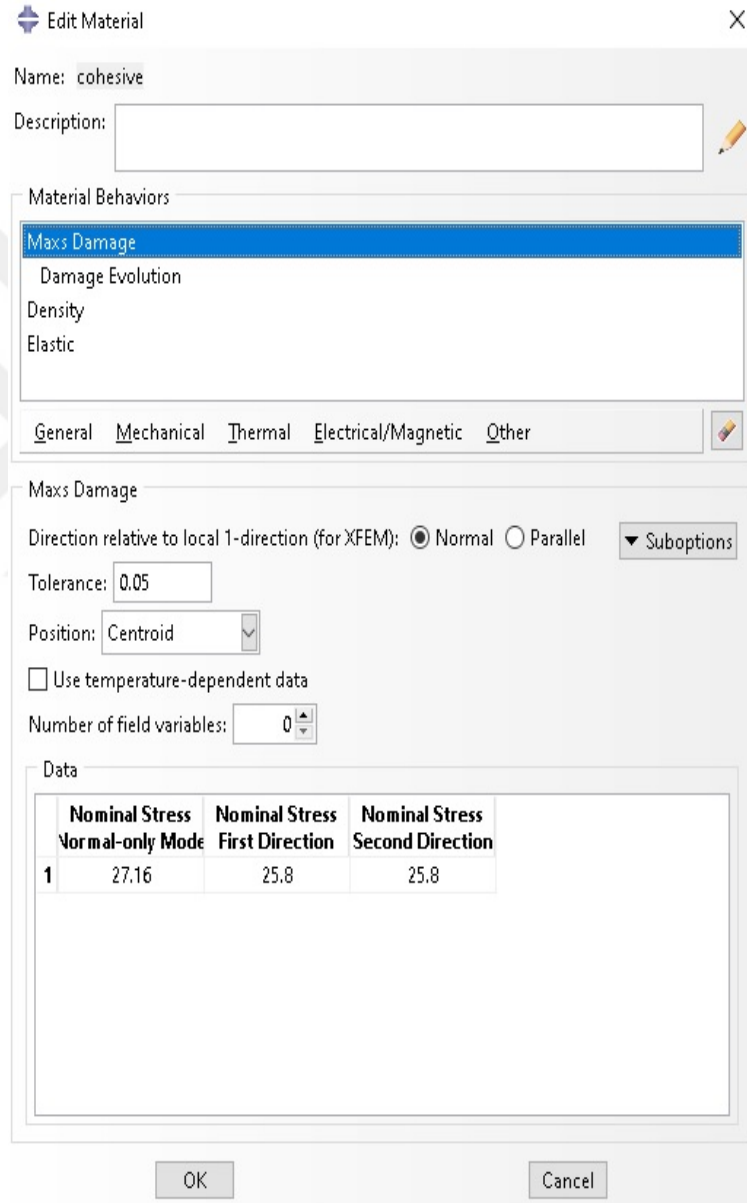


Şekil 4.7. Yapıştırıcı malzeme özellikleri

Tablo 4.6. DP 460 yapıştırıcısı CZM parametreleri (Akpınar & Özel, 2019)

| DP460                  |       |
|------------------------|-------|
| $\sigma_n^{max} (MPa)$ | 27,16 |
| $\tau_t^{max} (MPa)$   | 25,80 |
| $G_{IC} (N/mm)$        | 1,21  |
| $G_{IIC-IIIC} (N/mm)$  | 4,34  |

CZM methoduna göre hasar başlangıcı ve ilerlemesi için gereken parametrelerin girilmesi ve yapıştırıcıya tanıtılması gerekir. CZM methodu için gerekli parametreler Tablo 4.7.'de verilmiştir. Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.' da ABAQUS programına uygulaması gösterilmiştir. Hasar başlangıcı için Maksimum Hasar Gerilme kriteri (*MAXS DAMAGE*), hasar ilerlemesi için kayma ve yırtılma parametreleri eşit olduğundan BK (Benzeggagh ve Kenane) kriteri ile doğrusal hasar ilerleme kabul edilmiştir.



**Edit Material**

Name: cohesive

Description:

Material Behaviors

- Maxs Damage
- Damage Evolution
- Density
- Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Maxs Damage

Direction relative to local 1-direction (for XFEM): ☒ Normal ☐ Parallel Suboptions

Tolerance: 0.05

Position: Centroid

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

|   | Nominal Stress<br>Normal-only Mode | Nominal Stress<br>First Direction | Nominal Stress<br>Second Direction |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 27.16                              | 25.8                              | 25.8                               |

OK Cancel

Şekil 4.8. Hasar başlangıç değerleri

Suboption Editor

Damage Evolution

Type: Energy

Softening: Linear

Degradation: Maximum

Mixed mode behavior: BK

Mode mix ratio: Energy

☒ Power: 1.45

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

|   | Normal Mode<br>Fracture Energy | Shear Mode<br>Fracture Energy<br>First Direction | Shear Mode<br>Fracture Energy<br>Second Direction |
|---|--------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | 1.21                           | 4.34                                             | 4.34                                              |

OK Cancel

**Şekil 4.9.** Hasar ilerlemesi değerleri

Girilen malzeme özelliklerinden sonra bu malzeme özelliklerini parçalara tanıtmak için kesit oluşturma işlemi gerekmektedir. Kesit oluşturma işlemi; *Create Section* bölümünden yapılmaktadır. Alüminyum ve çelik parçalar için; *Create Section > Solid > Homogeneous* seçilir, Yapıştırıcı için; *Create Section > Other > Cohesive* seçilir. (Bkz. Şekil 4.10) Daha sonra *Assign Section* bölümünden oluşturulan kesitler parçalara aktarılır.

Edit Section

Name: adhesive

Type: Cohesive

Material: cohesive

Response: Traction Separation

Initial thickness: ☒ Use analysis default  
☐ Use nodal coordinates  
☐ Specify:

☐ Out-of-plane thickness:

OK Cancel

Edit Section

Name: alüminyum

Type: Solid, Homogeneous

Material: AL7075

☐ Plane stress/strain thickness:

OK Cancel

**Şekil 4.10.**Yapıştırıcı ve alüminyum için kesit oluşturma

Rijit parçalara için malzeme özellikleri girilmemektedir. Fakat vurucu dinamik bir yük uygulayacağından dinamik kanunlar gereğinden dolayı bir kütle girilmesi gerekmektedir. Bu kütle; *Part > Engineering Features > Inertia > Point mass/Inertia* bölümünden vurucuda belirlenen referans noktasına tanımlanır. Yukarıdaki basamaklar izlenerek malzemelere analiz için gerekli olan parametreler girilmiştir. (Bkz. Şekil 4.11)

Edit Inertia

Name: Inertia-1

Type: Point Mass/Inertia

Region: Set-2

Magnitude Damping

Mass

☒ Isotropic: 0.005

☐ Anisotropic:

M11: M22: M33:

Rotary Inertia

☐ Specify off-diagonal terms

I11: I22: I33:

CSYS: (Global)

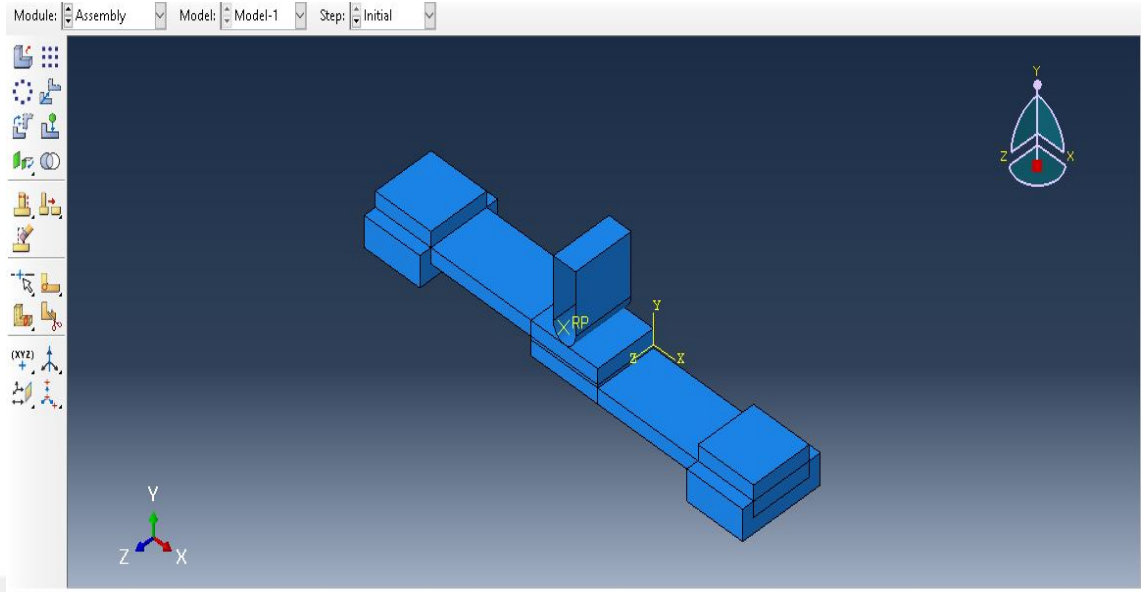
Note: Values will be applied per point.

OK Cancel

**Şekil 4.11.** Vurucu kütlesi belirlenmesi

### **Montaj oluşturulması**

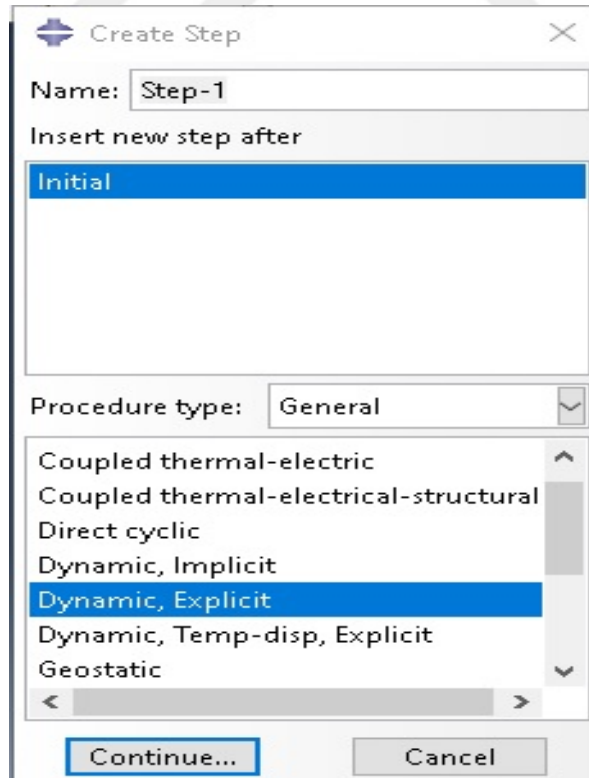
Parçaların çizim işlemi ve malzeme özelliklerinin atanmasından sonra parçaları birleştirmek için montaj işlemi yapılır. Montaj işlemi *Assembly* sekmesinden yapılır. Parçalar; *Assembly > Create Instance* bölümünden çağrılır ve konumları belirlenir. (Bkz. Şekil 4.12)



Şekil 4.12. Montaj oluşturma

### Analiz tipinin belirlenmesi

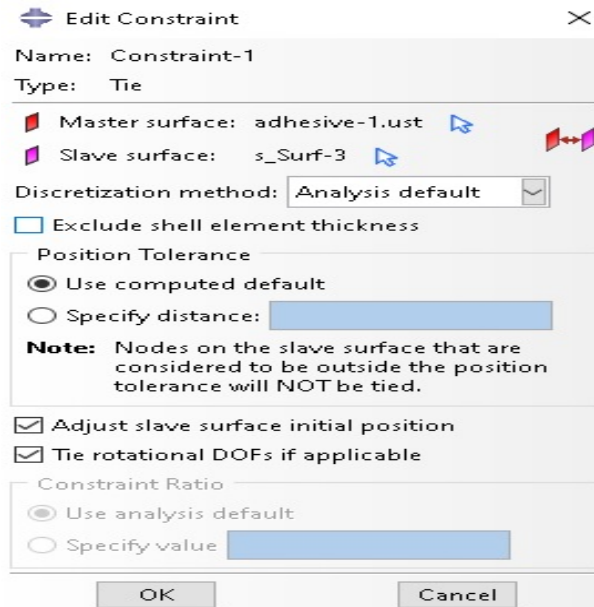
Analiz tipimiz Dinamik analizdir. Dinamik analizin belirlenmesi için; *Step > Create Step > Dynamic, Explicit* adımları izlenir. (Bkz. Şekil 4.13)



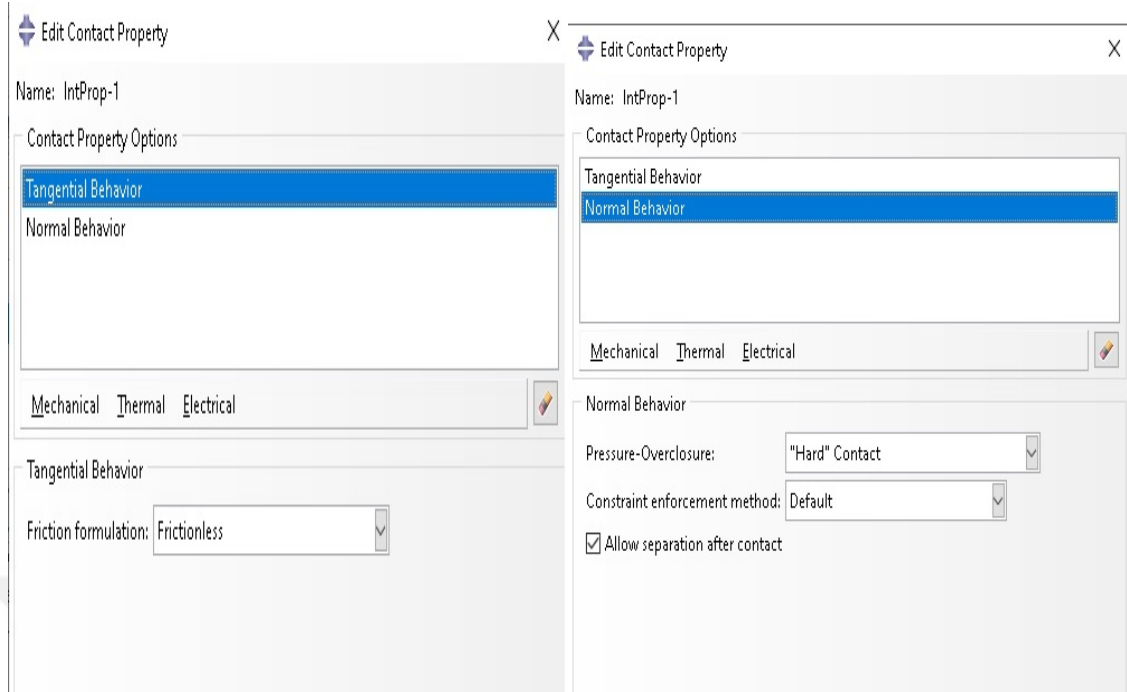
Şekil 4.13. Analiz tipi belirlenmesi

### Parça ilişkilerinin belirlenmesi

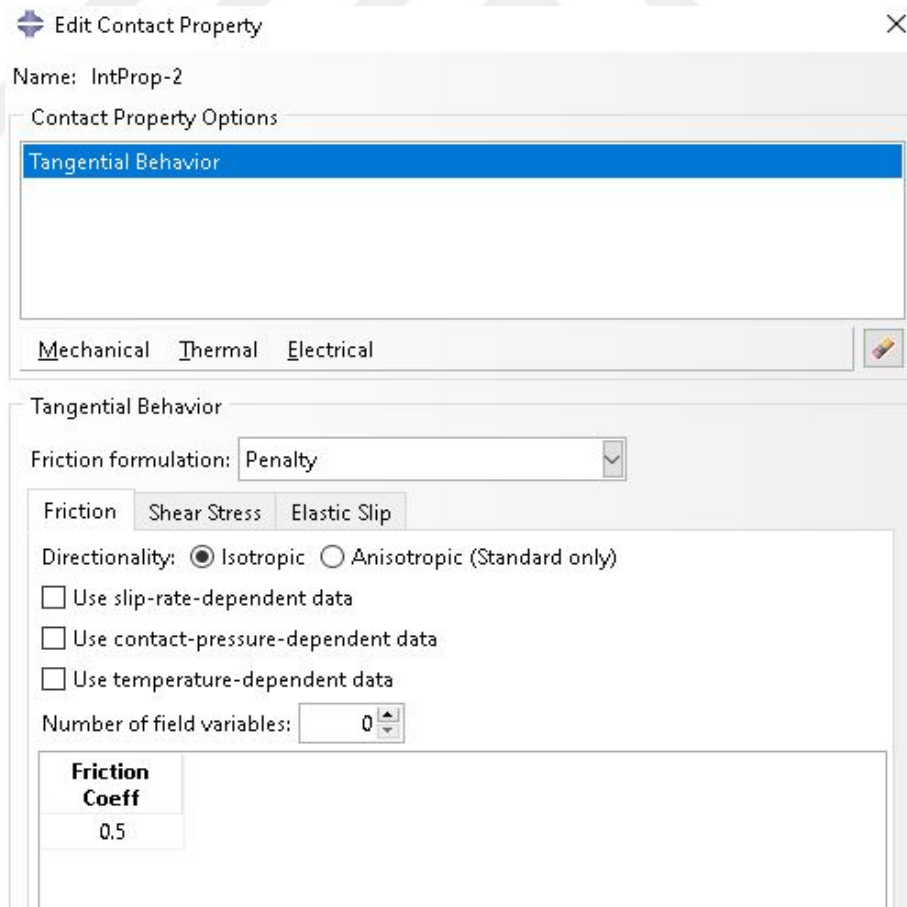
Parçaların birbiriyle olan ilişkileri için iki ilişki belirlememiz gerekmektedir. İlk olarak yapıştırıcı ile parçalar arasındaki ilişki, sonrasında da bütün parçaların birbiri ile olan ilişkileri programa tanıtılmalıdır. Yapıştırıcı ile alüminyum parçalar arasındaki ilişki *Interactions > Create Constraint > Tie* bölümünden yapılır. (Bkz. Şekil 4.14) *Tie* mükemmel yapışmayı belirtir. Analiz de parçaların yapıştırıcı malzemeye mükemmel bir şekilde yapıştığı kabul edilmiştir. Diğer parçaların birbiri ile ilişkisi; *Interactions > Create Interactions > General Contact (Explicit)>Create Interaction Property >Contact > Mechanical > Normal Behavior, Tangential Behavior* bölümünden yapılmıştır. Normal davranışta parçaların birbiriyle ilişkisi *Hard* olarak belirlenmiş, Teğetsel davranış ise *Frictionless* olarak kabul edilmiştir. (Bkz. Şekil 4.15) Bu ilişkiler deneysel çalışma olmadığından sürtünmesiz ve birbirlerine sıkı bir şekilde ilişkili olduğu kabul edilerek tanıtılmıştır. Yapıştırıcı malzeme için yüzey arasında *Cohesive Behaviour* ilişkisi tanımlanmıştır. Bindirme bağlantısının iki ucundaki tutucular için 0.5 değerinde sürtünme katsayısı tanımlanmıştır; *Interactions > Create Interactions > General Contact (Explicit)>Create Interaction Property >Contact > Mechanical > Tangential Behavior > Penalty* sekmesi ile 0.5 değeri girilmiştir. (Bkz. Şekil 4.16)



Şekil 4.14.Yapıştırıcı ve alüminyum parçaları arasındaki ilişkinin belirlenmesi



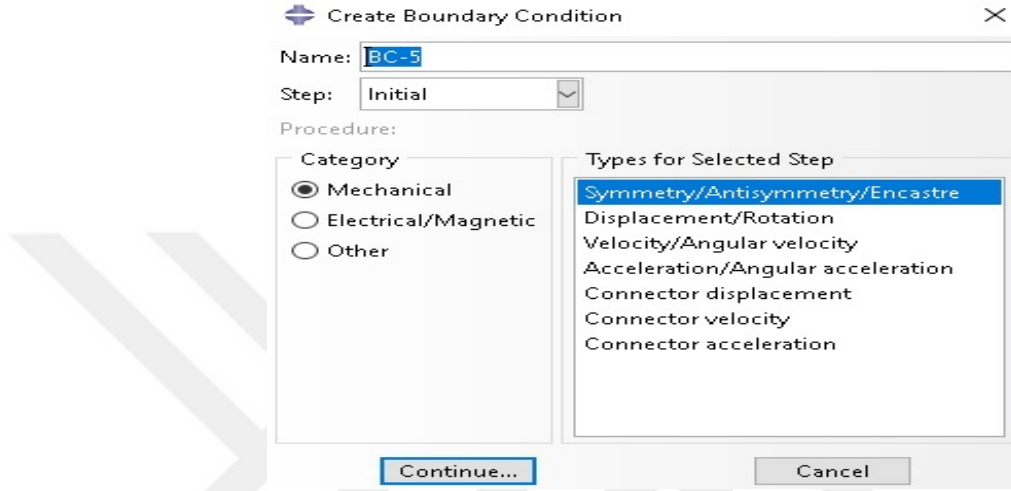
Şekil 4.15.Parçalar arası ilişkilerin belirlenmesi



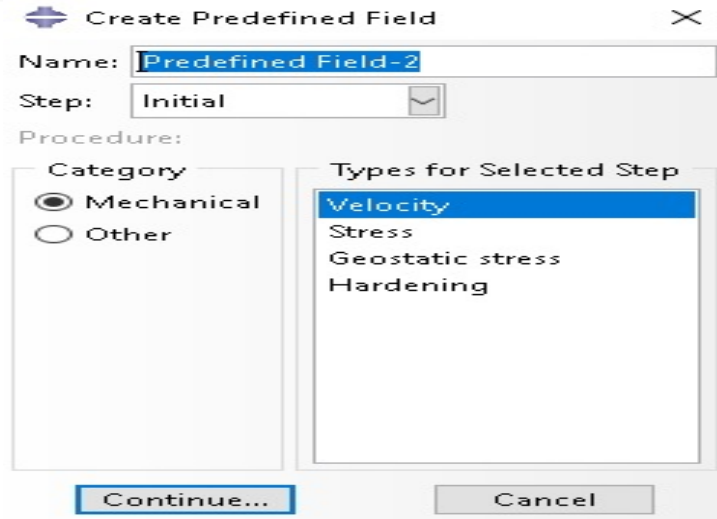
Şekil 4.16.Sürtünme katsayısının girilmesi

### Sınır şartlarının girilmesi

Parçaların birbirleri ile ilişkisinin tanıtılmasının ardından, model için gerekli sınır şartları ve vurucu hızı *Load* sekmesi altında girilir. Sınır Şartları için; *Load > Create Boundary Condition* bölümünden verilir. (Bkz. Şekil 4.17) Vurucu için uygulanacak hız; *Load > Create Predefined Field > Mechanical > Velocity* bölümünden verilir. (Bkz. Şekil 4.18)

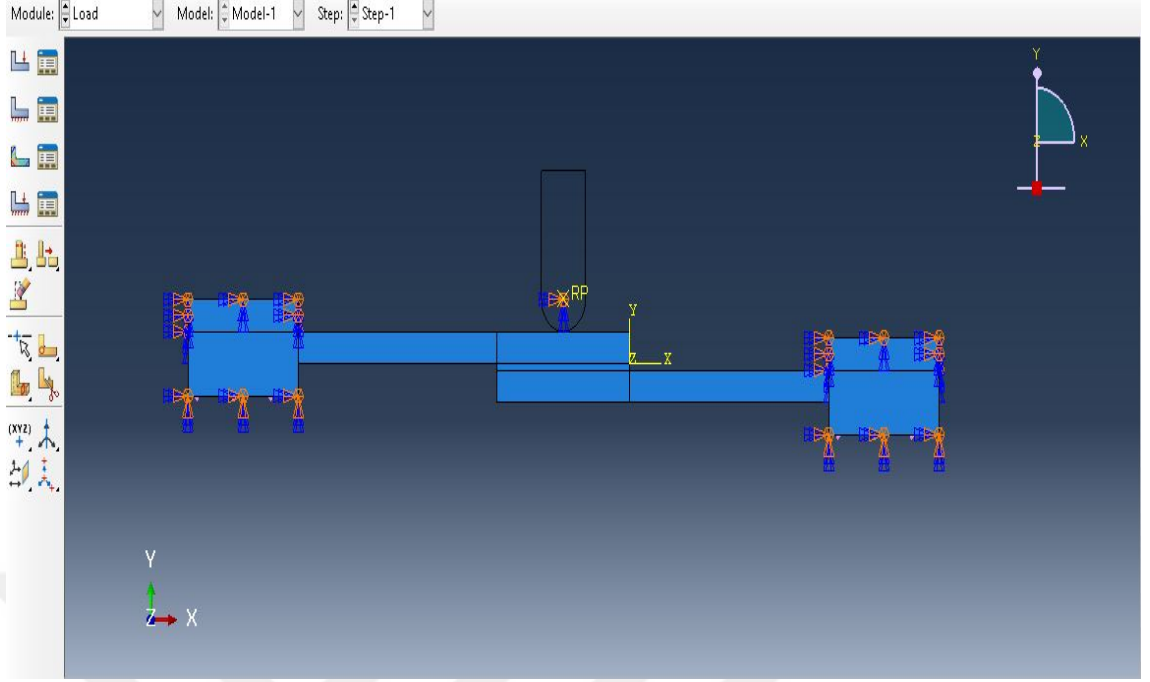


Şekil 4.17.Sınır şartları

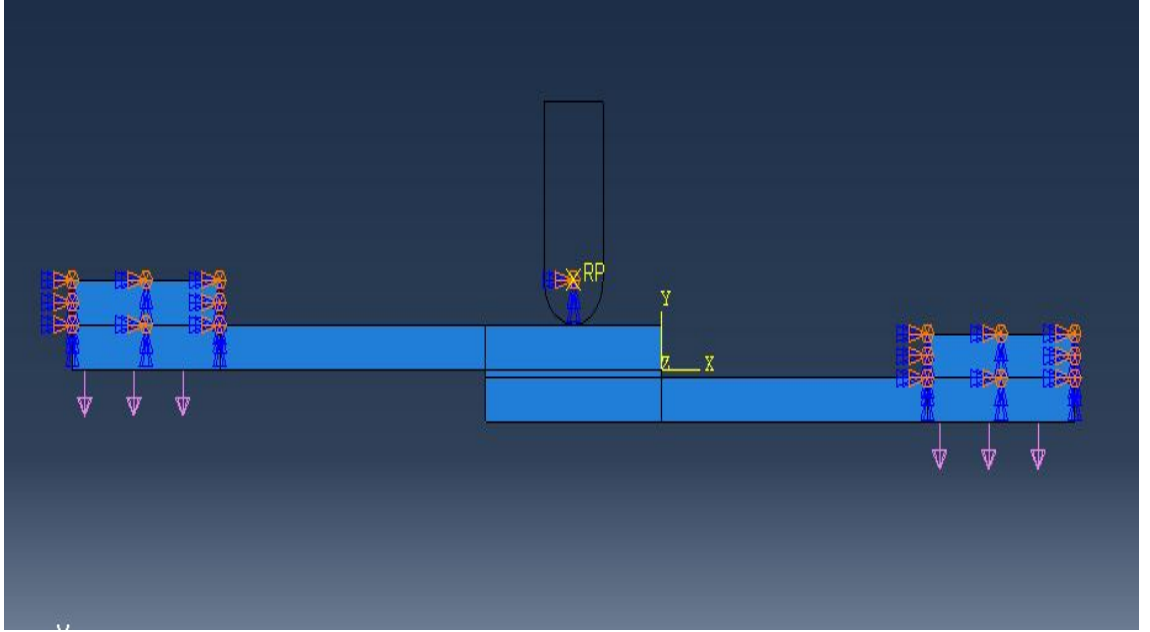


Şekil 4.18. Vurucu hızı belirlenmesi

Analiz için alüminyum parçaların üstüne bindirildiği alt destek ankastre olarak tanımlanmıştır. Sıkıştırma aparatı olarak kullanılan üst destekler ise x ve z yönünde hareketi engellenmiş olup -y yönünde 20 MPa'lık basınç uygulanmıştır. (Bkz. Şekil 4.19) Vurucunun y yönündeki hareketi serbest bırakılıp x ve z yönünde hareketi engellenmiştir. (Bkz. Şekil 4.20)



**Şekil 4.19.**Sınır şartları ve yükleme

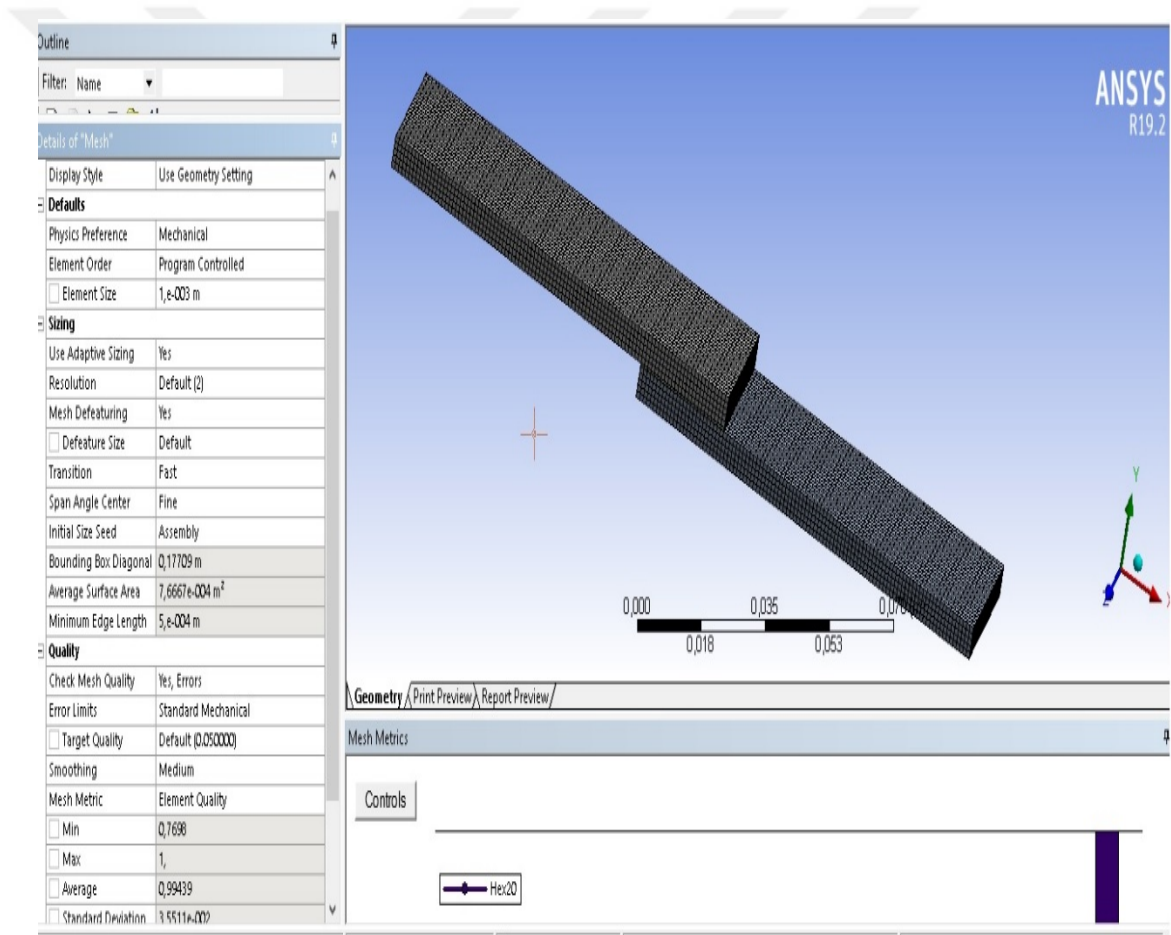


**Şekil 4.20.** Üst tutucuların sınır şartları gösterimi

### **Meshleme işlemi**

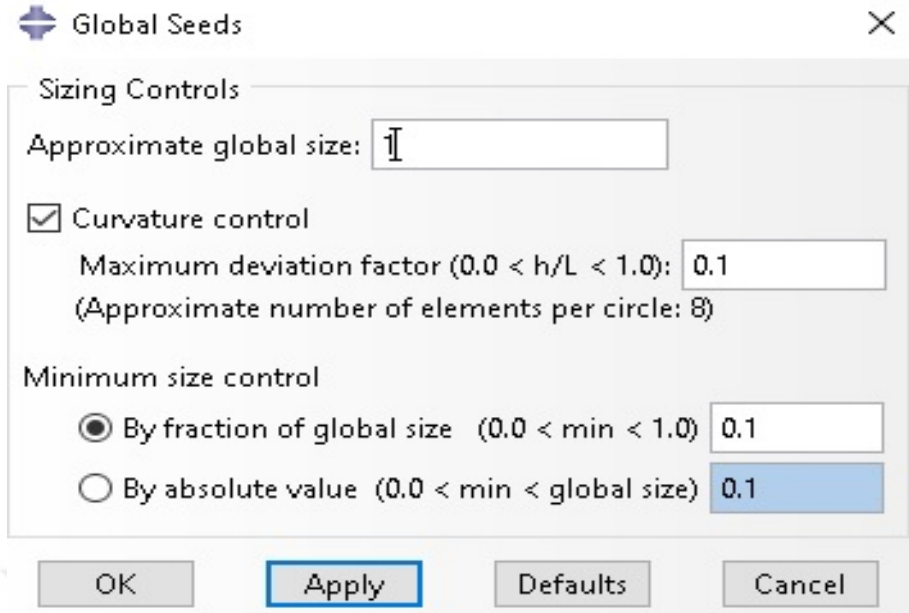
Sonlu elemanlar analizinde çözümleme için en önemli işlem; modeli çözüm için elemanlara ayırma işlemidir. Meshleme işlemi için parçaların bölündüğü meshlerin boyutları çözüm için çok önemlidir. Mesh boyutlarının rastgele seçilmesi analizin doğru sonuçlar vermesini etkilemektedir. Mesh boyutlarında modele göre en uygun mesh

boyutu seçilmelidir. Büyük olması hatalara, gereksiz yere çok küçük boyutlarda olması ise bizleri zaman açısından yavaşlatmaya sebep olacaktır. Optimum bir mesh seçilmesi için **ANSYS WORKBENCH 19.2** adlı programdan yararlanılmıştır. Şekil.4.21’de *Mesh* > *Quality* bölümünde *Avarege* değeri 0 ile 1 arasında değer alır ve bu değer 1’e yaklaştıkça meshin kaliteli bir mesh olduğu anlaşılmaktadır. Analizimizde kullanacağımız SLJ bağlantıda 1 mm mesh boyutu için *Avarege* değeri 0.99439 değerindedir ve mesh boyutu uygun bulunmuştur. Çözümün hızlanması için yapıştırma bağlantısının olduğu bölge ve diğer bölgeler farklı mesh boyutuyla meshlenmiştir. Yapıştırıcı bölgesi 1 mm, diğer bölgeler için 2 mm mesh boyutu seçilmiştir. Analizden önce yapılan ön analizlerde sonucun yakınsadığı görülmüştür.



**Şekil 4.21.**Mesh kalite

Modele meshleme işlemi uygulanması *Mesh* sekmesinden yapılır. İlk olarak *Mesh* > *Seed Part* > *Size* bölümünden eleman boyutu girilir. (Bkz. Şekil 4.22)

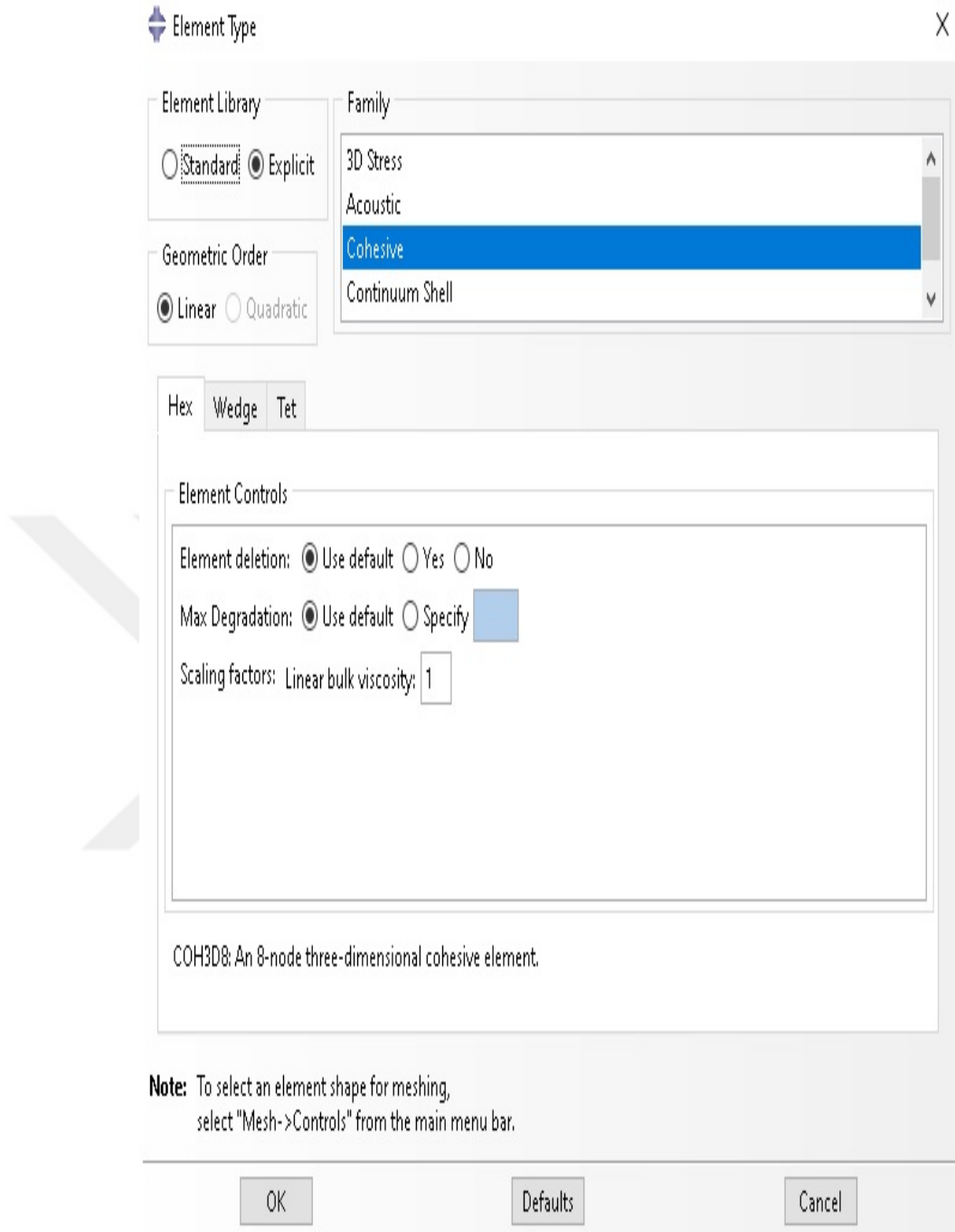


**Şekil 4.22.**Mesh boyutu

Daha sonra mesh için eleman tipinin belirlenmesi gerekir. Bu işlem içinde *Mesh > Assign Element Type* bölümü kullanılır ve parçalar için tek tek bu işlem uygulanır. Analizde alüminyum, çelik ve yapıştırıcı parçalar için 8 nodlu eleman tipi seçilmiştir. Alüminyum ve çelik tutucu parçalar için üç boyutlu eleman tipi, yapıştırıcı için ise kohesif eleman tipi seçilmiştir. (Bkz. Şekil 4.23) Rigid parçalar için 4 nodlu, Discrete Rigid Element seçilmiştir. (Bkz. Tablo 4.7)

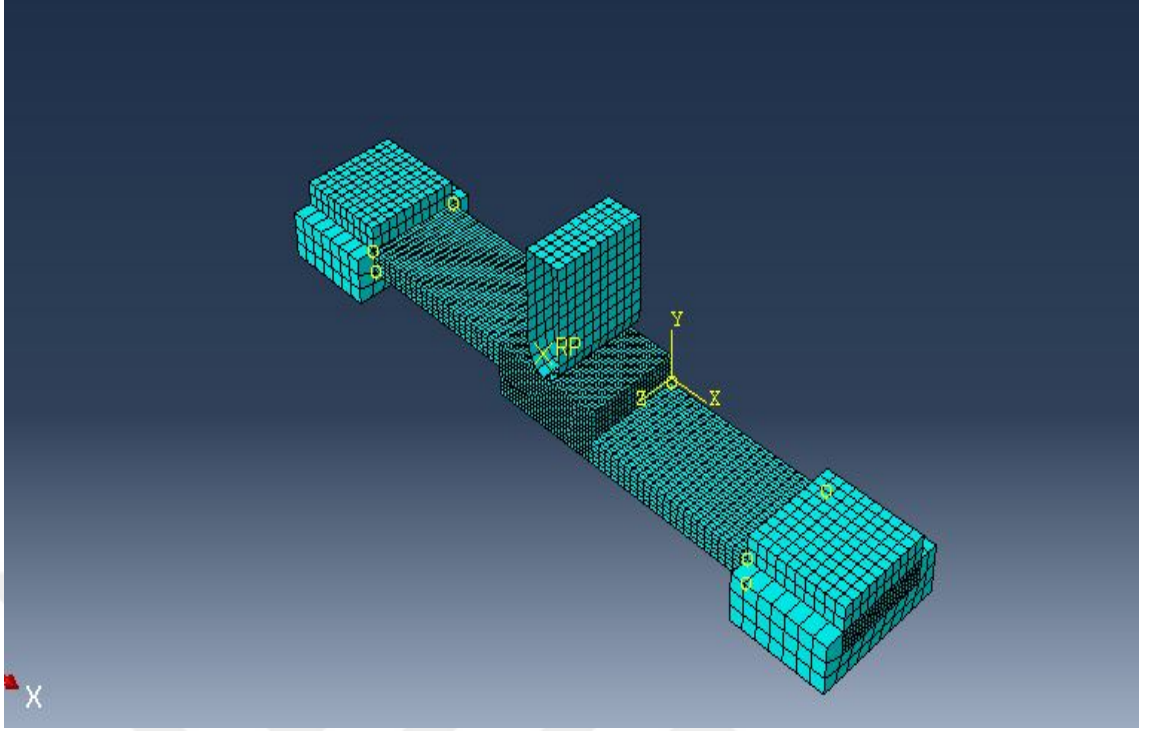
**Tablo 4.7.**Eleman tipleri

| Eleman Tipleri         |        |
|------------------------|--------|
| <b>Al7075</b>          | C3D8R  |
| <b>DP460</b>           | COH3D8 |
| <b>Çelik Tutucular</b> | C3D8R  |
| <b>Rijid Parçalar</b>  | R3D4   |



**Şekil 4.23.** Yapıştırıcı eleman tipi seçimi

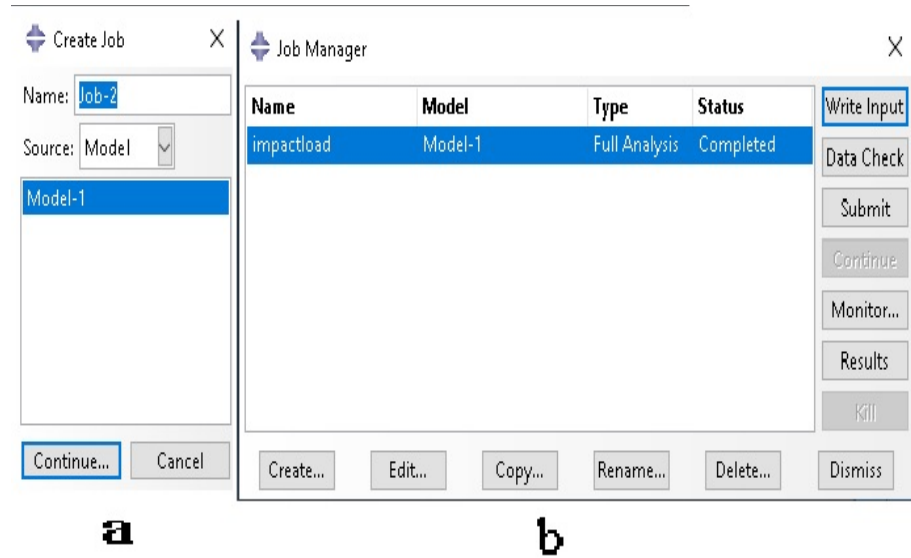
Mesh işlemi için eleman boyutu ve eleman tipi belirlendikten sonra modele uygulanması için *Mesh > Mesh Part* bölümünden parçalar seçilip mesh işlemi onaylanır. (Bkz. Şekil 4.24)



Şekil 4.24. Modeli elemanlara bölme işlemi

#### Analizin başlatılması

Analizin başlatılması kullanılan sonlu elemanlar programında *Job > Create Job* sekmesi kullanılır. İş oluşturulur ve *Submit* sekmesi ile çalıştırılır. Daha sonra sonuçlar aynı monitörün *Results* sekmesinden okunur. (Bkz. Şekil 4.25)



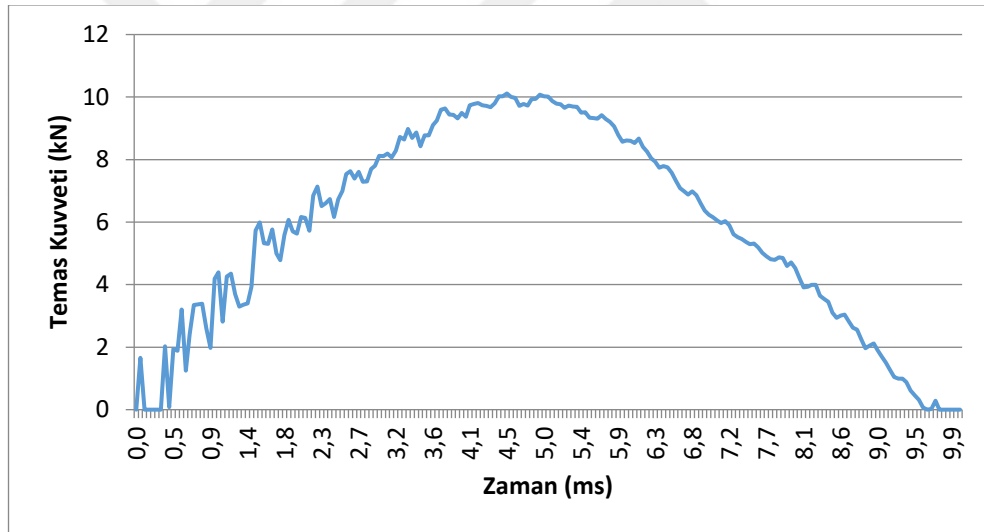
Şekil 4.25. a-) İş oluşturma b-) Çözüm monitörü

## 5. BULGULAR

Düşük hızlı darbe yükleri altında tek tesirli bindirme bağlantılarını farklı yapıştırıcı kalınlıkları ve farklı bindirme uzunlukları altında incelenmiştir. Bağlantıdaki yapıştırıcı elemanın bütün yapıştırıcı kalınlıkları ve bindirme uzunluklarında kopması sağlanmıştır. Bu kopmanın gerçekleşmesi için analizde; vurucu hızı **6 m/s**, darbe enerjisi **90 J** ve darbe süresi **10 ms** seçilmiştir. Bu değerler analizden önce yapılan ön analizler ile yapıştırıcının kopması sağlanana kadar denenmiştir. Yapıştırıcının kopması için gerekli kuvvet vurucunun temas yüzeyinden okunmuştur.

### 0.1 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları

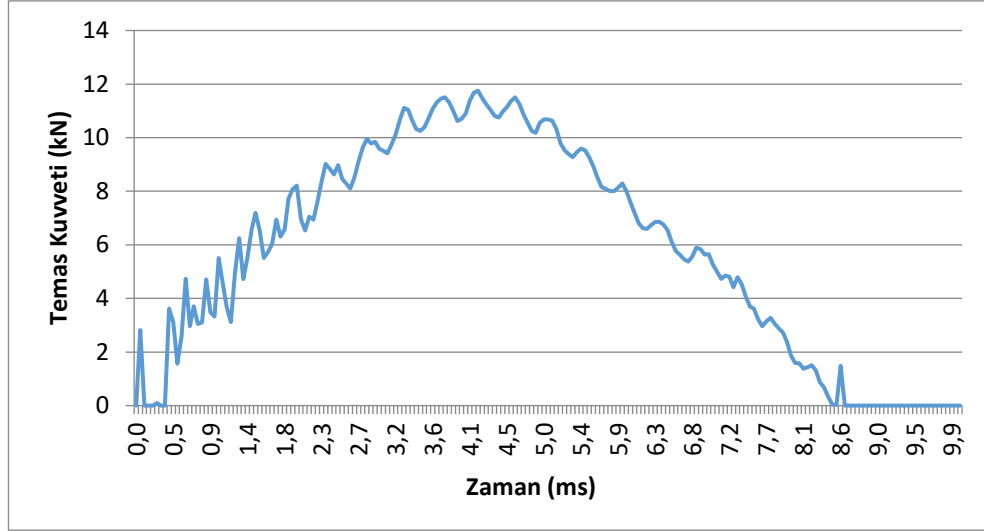
0.1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.1.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **10,1146 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.1. 0.1 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

### 0.1 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları

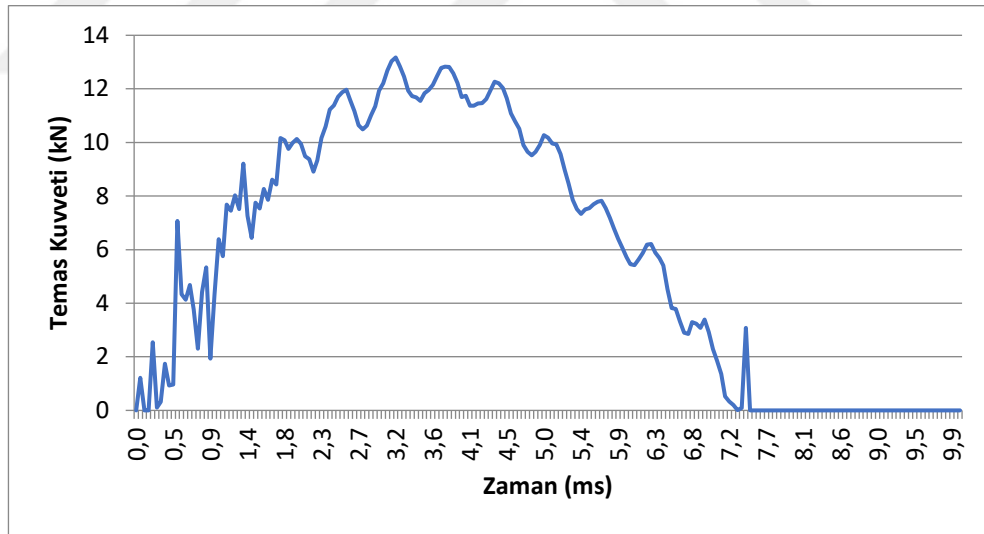
0.1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.2.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **11,7552 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.2.0.1 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.1 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

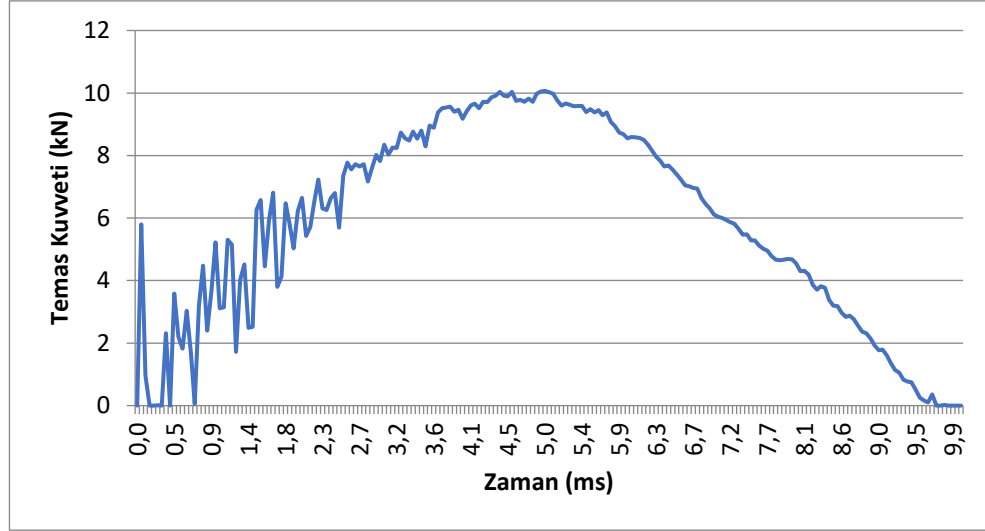
0.1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.3.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,1724 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.3.0.1 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.2 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

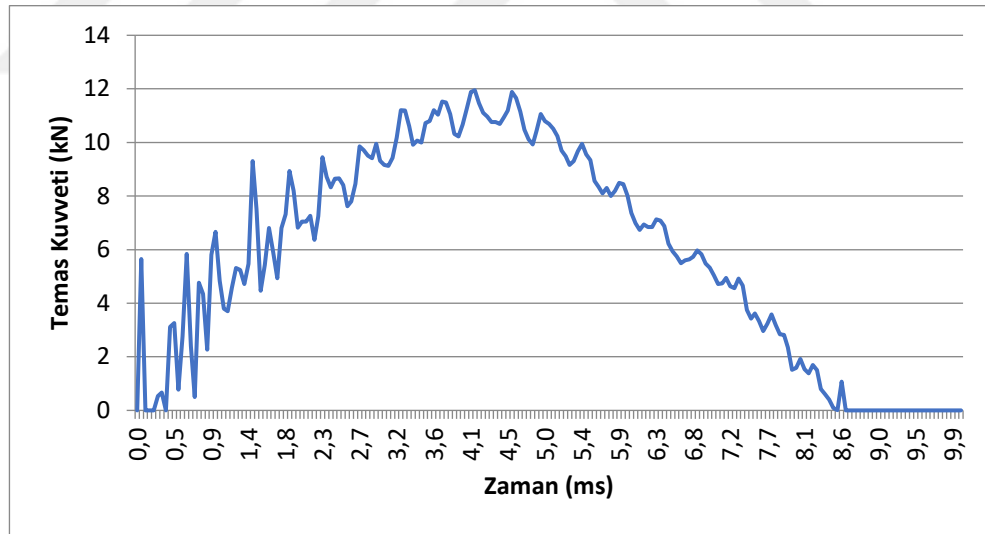
0.2 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.4.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **10,0688 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.4.0.2 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.2 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

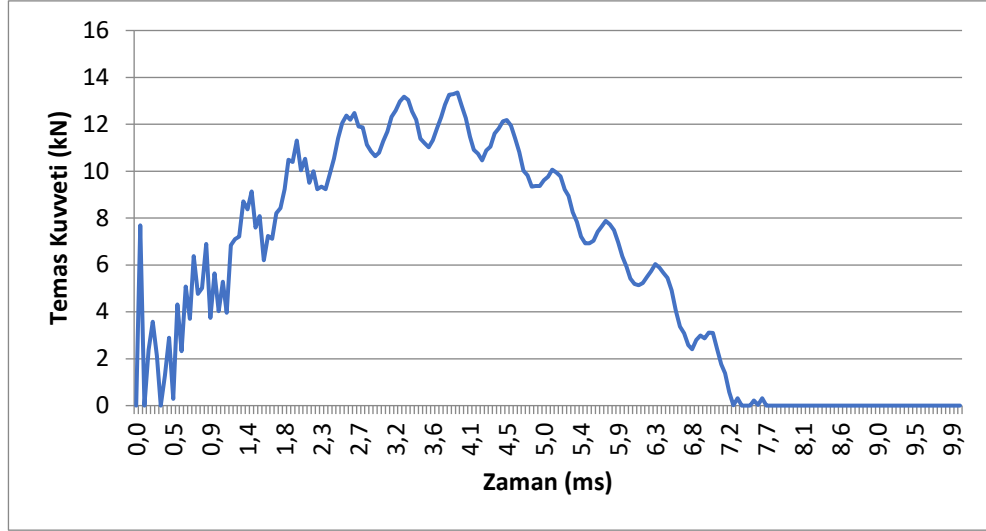
0.2 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.5.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **11,9502 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.5.0.2 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.2 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

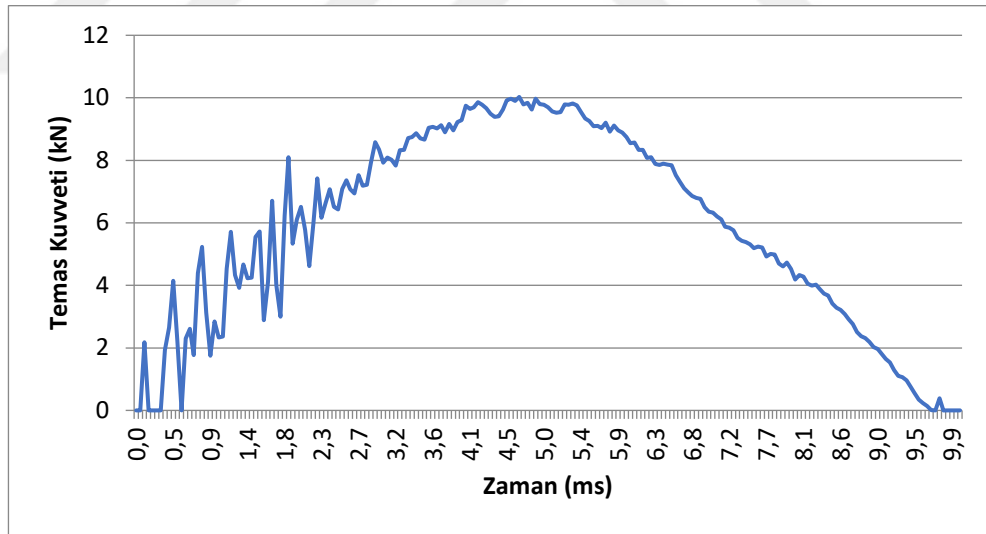
0.2 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.6.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,3556 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.6.0.2 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.3 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

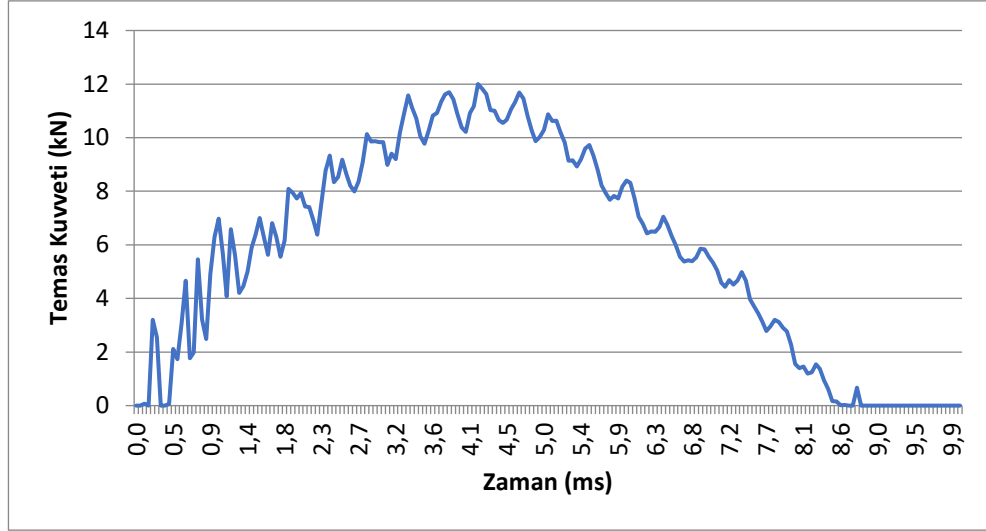
0.3 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.7.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **10,0277 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.7.0.3 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.3 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

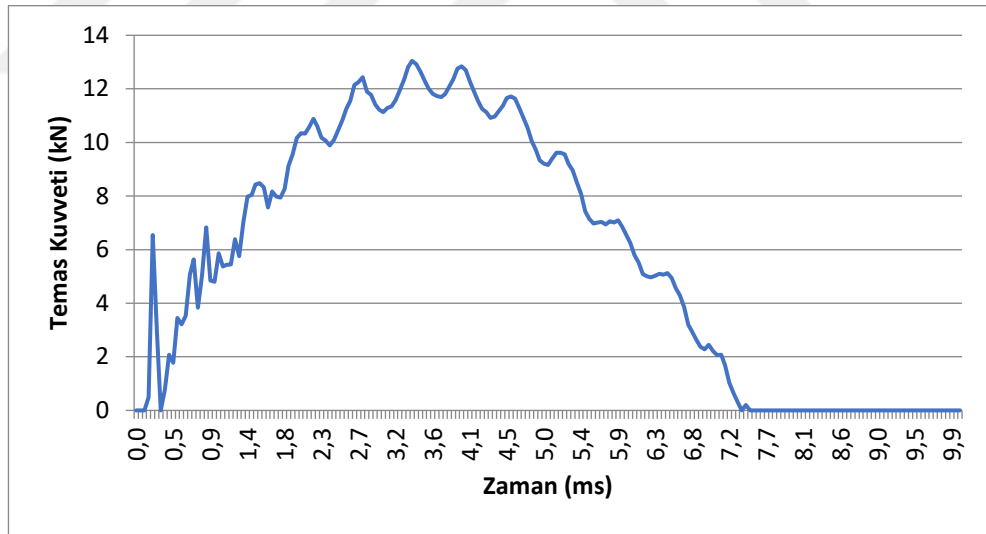
0.3 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.8.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **12,0022 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.8.0.3 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.3 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

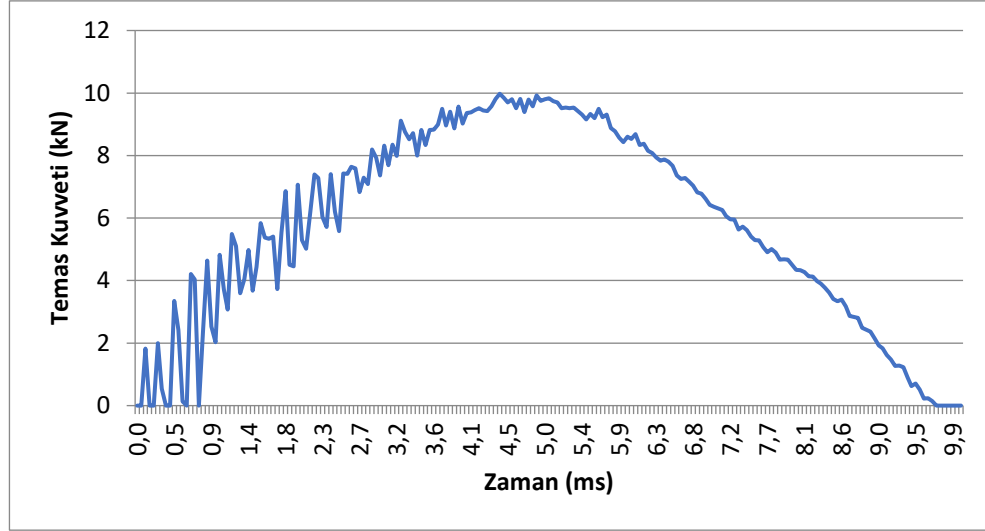
0.3 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.9.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,0457 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.9.0.3 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.4 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

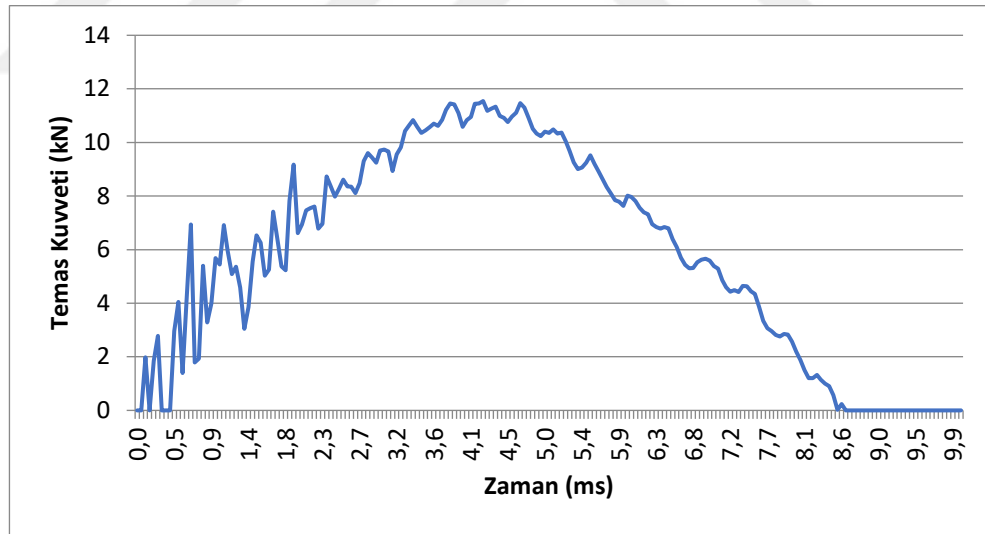
0.4 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.10.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,9766 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.10. 0.4 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.4 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

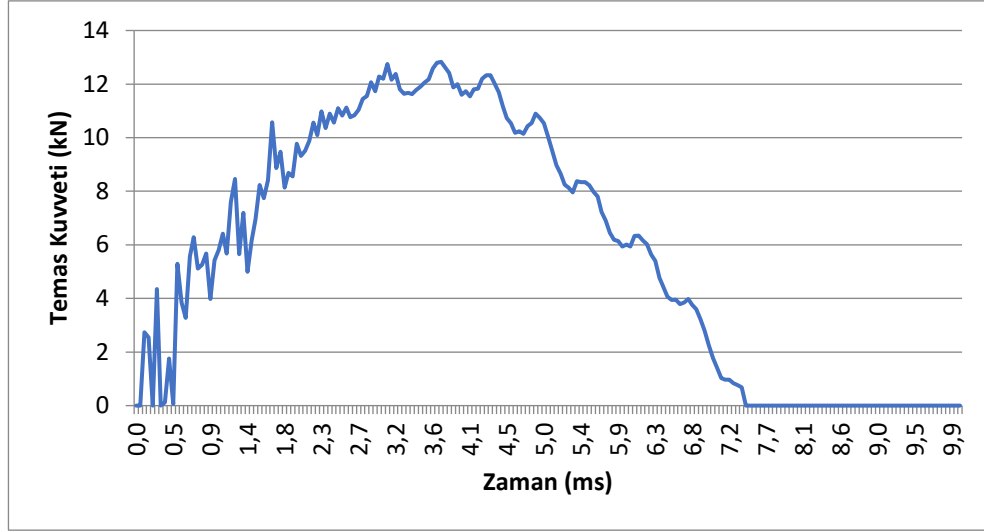
0.4 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.11.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **11,5451 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.11.0.4 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.4 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

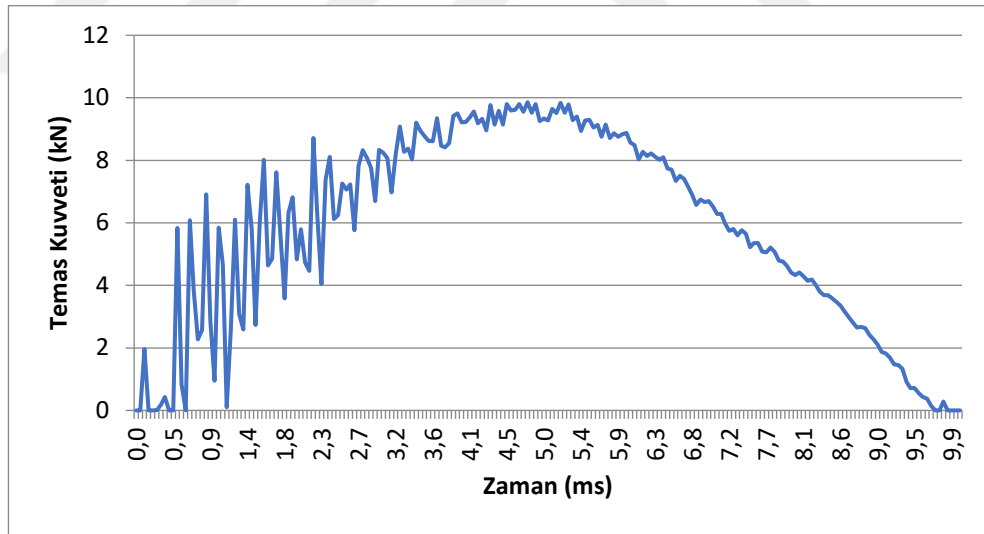
0.4 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.12.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **12,8298 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.12.0.4 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.5 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

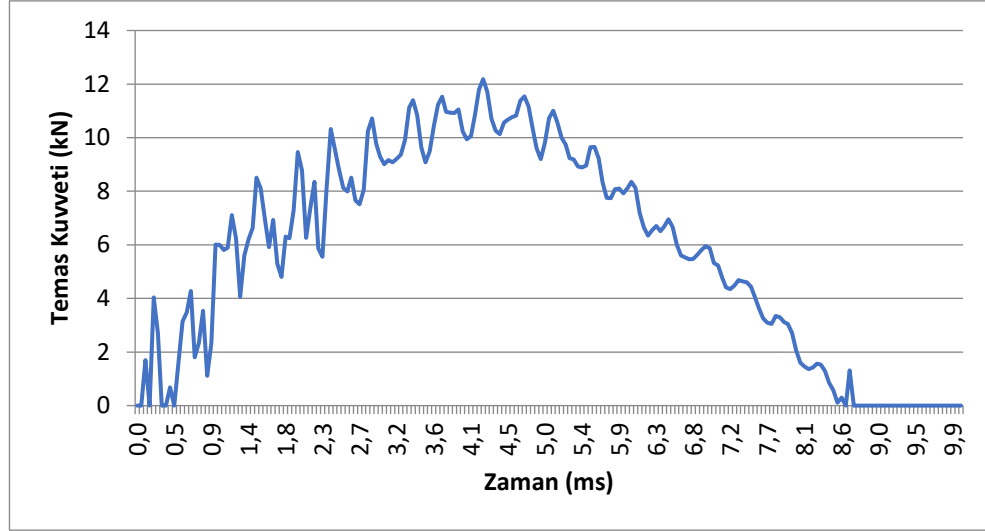
0.5 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.13.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,8601 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.13.0.5 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.5 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

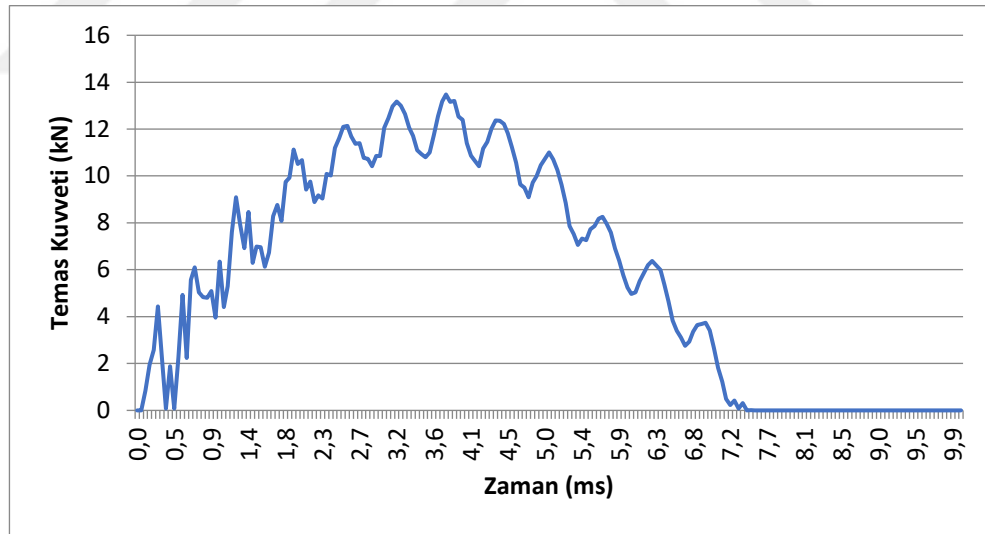
0.5 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.14.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **12,1837 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.14. 0.5 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.5 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

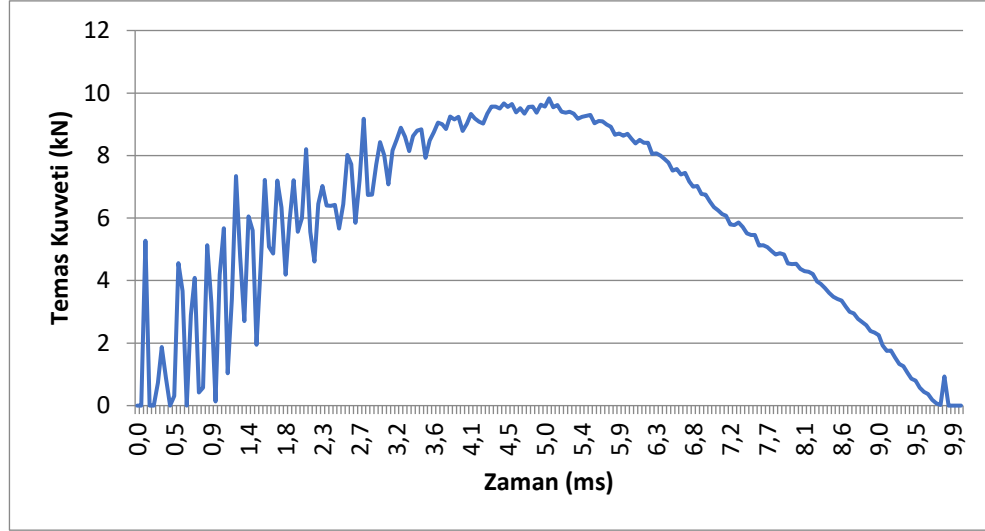
0.5 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.15.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,4755 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.15. 0.5 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.6 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

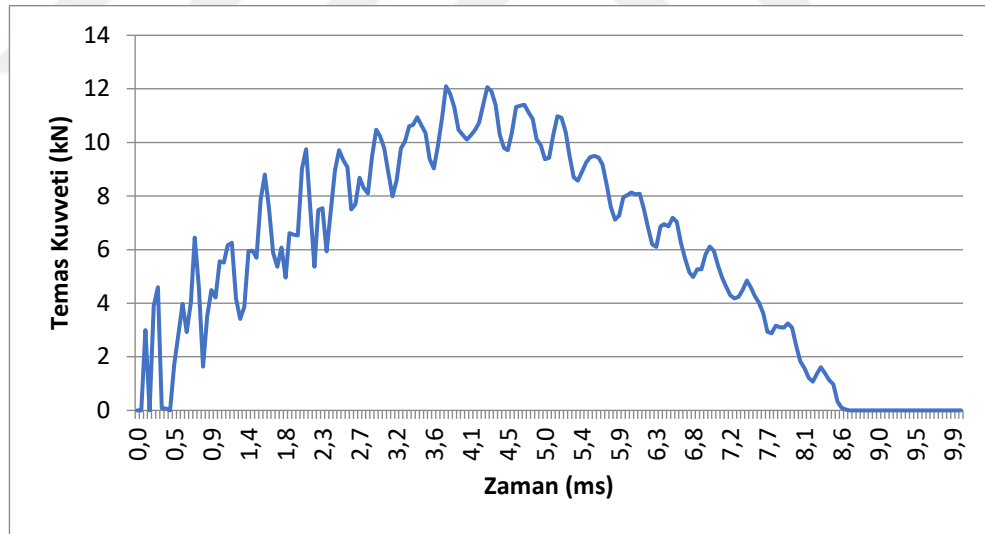
0.6 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.16.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,8290 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.16. 0.6 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.6 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

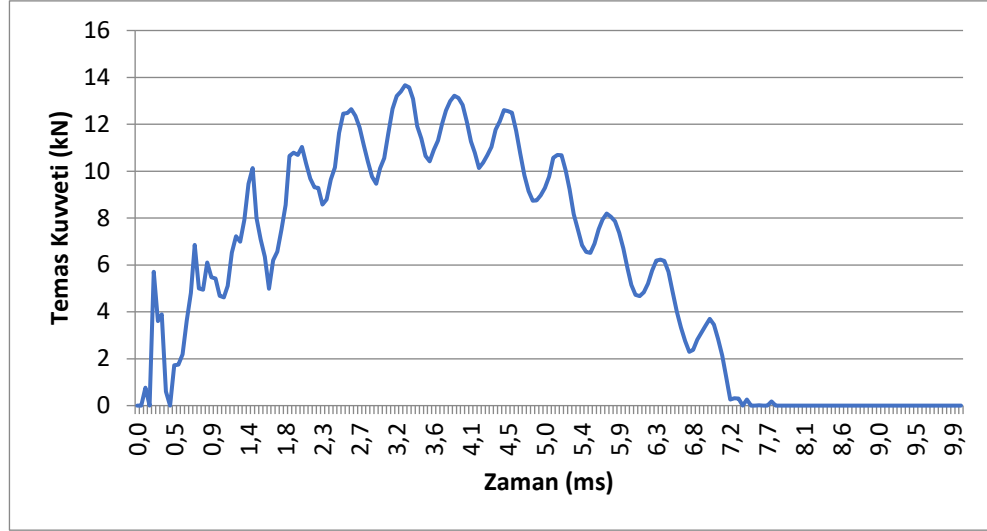
0.6 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.17.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **12,0961 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.17. 0.6 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.6 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

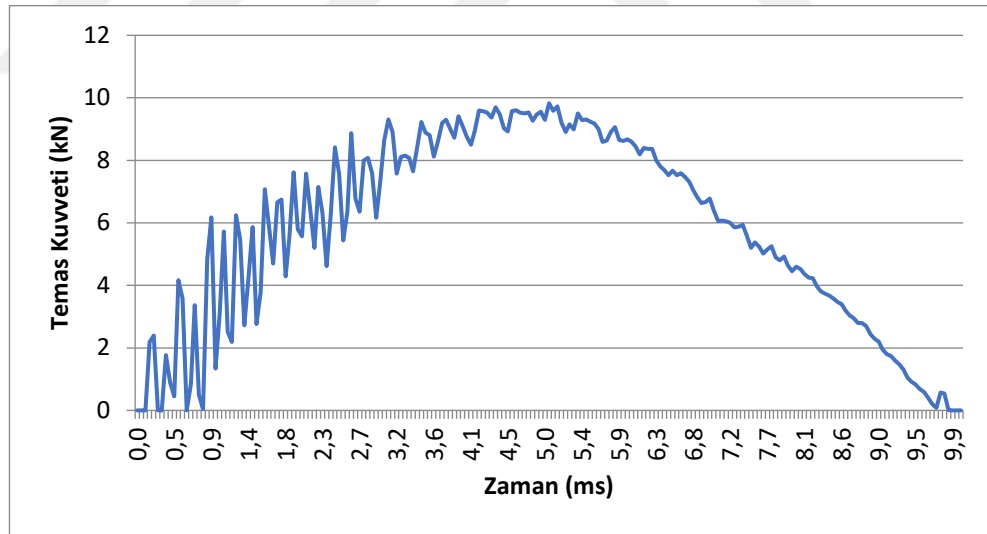
0.6 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.18.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,6661 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.18. 0.6 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.7 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

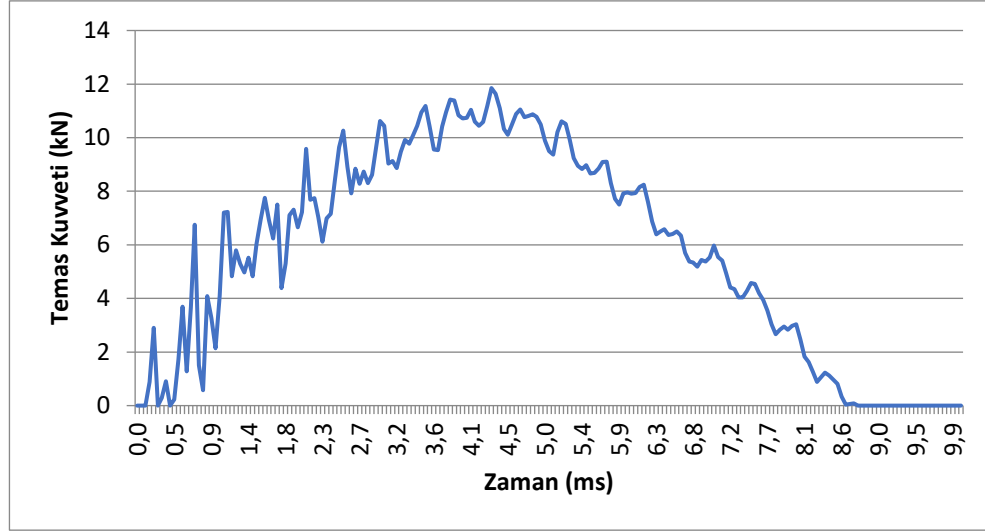
0.7 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.19.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,8260 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.19. 0.7 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.7 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

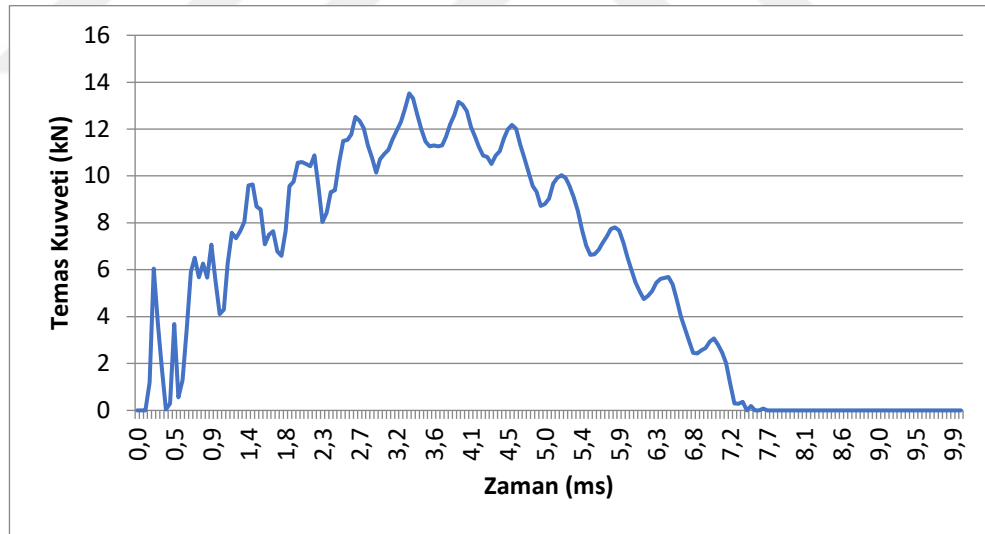
0.7 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.20.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **11,8511 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.20. 0.7 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.7 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

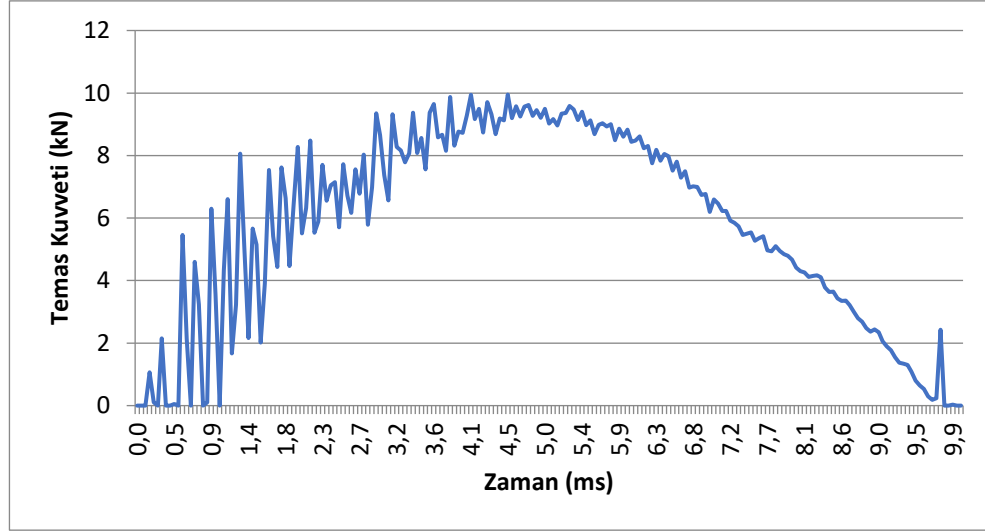
0.7 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.21.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,5194 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.21. 0.7 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.8 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

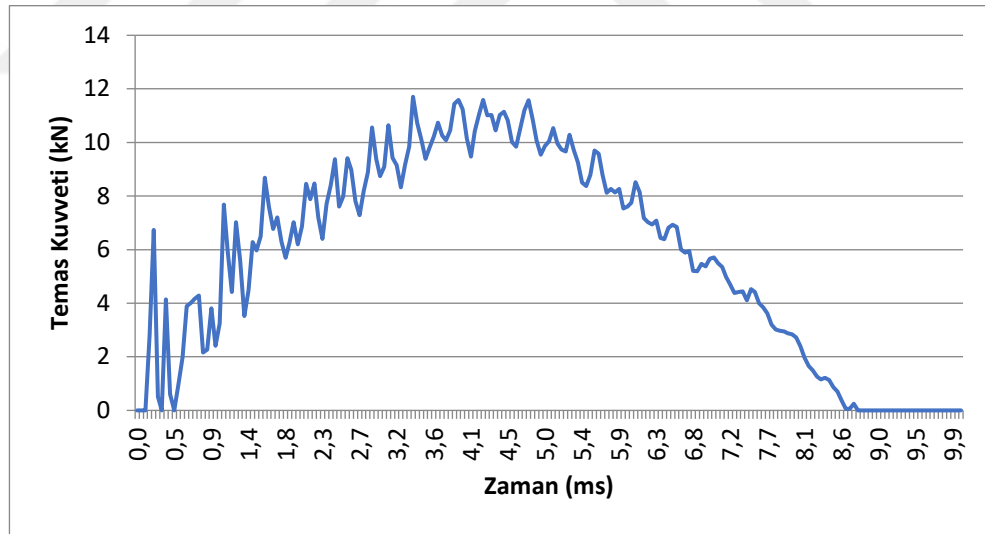
0.8 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.22.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,9505 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.22. 0.8 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.8 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

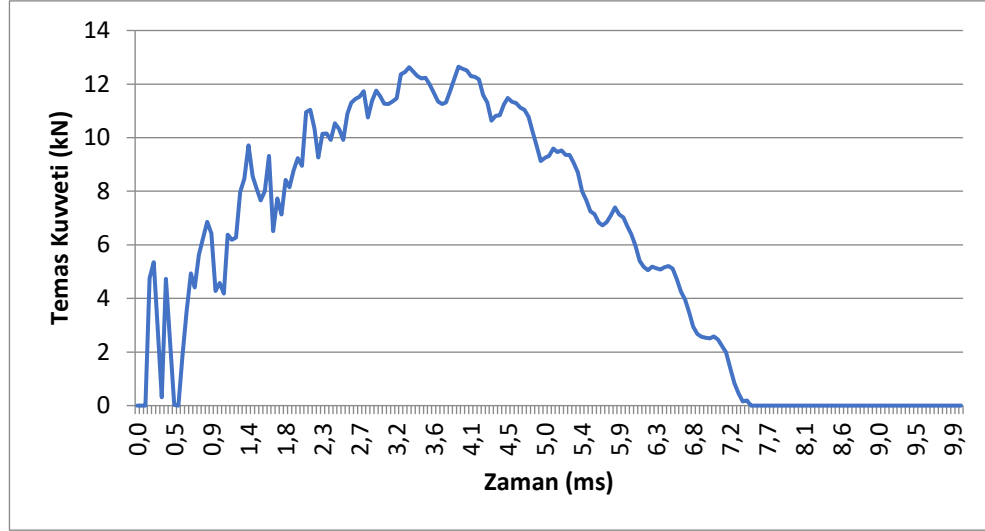
0.8 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.23.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **11,7046 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.23. 0.8 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.8 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

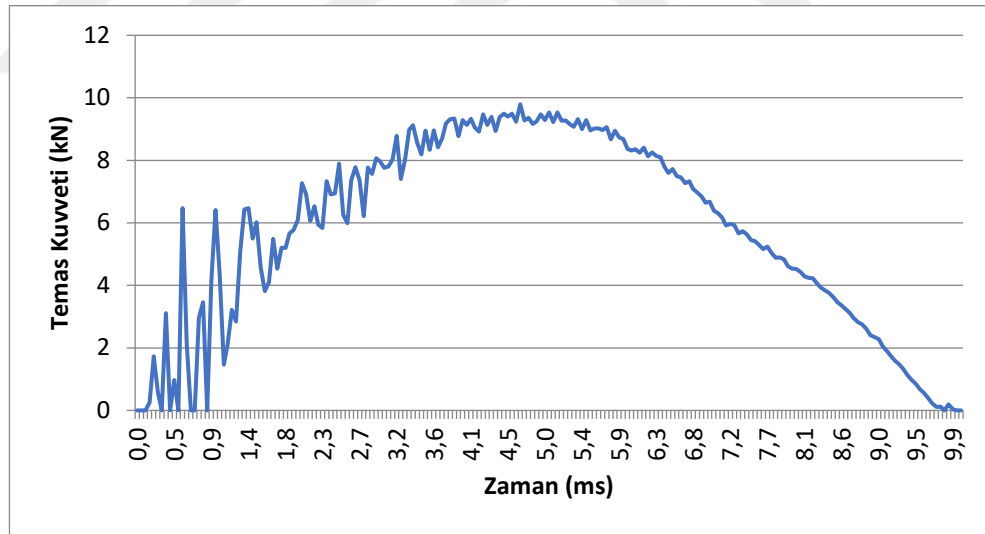
0.8 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.24.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **12,6497 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.24. 0.8 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.9 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

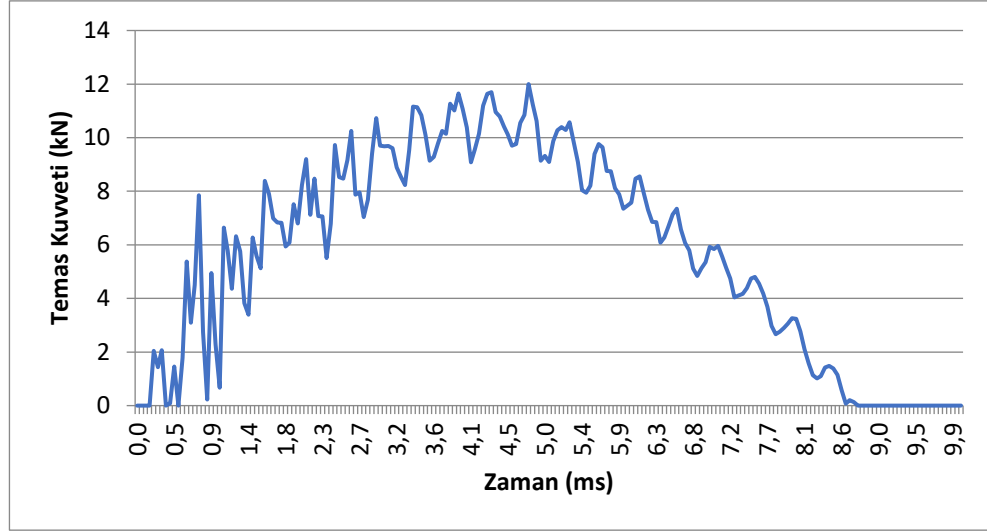
0.9 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.25.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,7918 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.25. 0.9 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.9 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

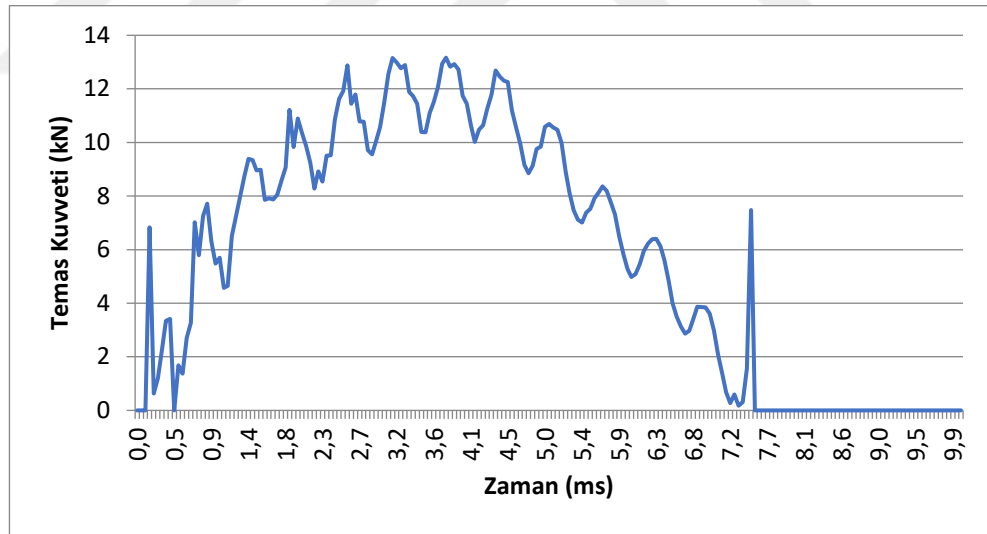
0.9 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.26.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **12,0004 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.26. 0.9 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**0.9 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

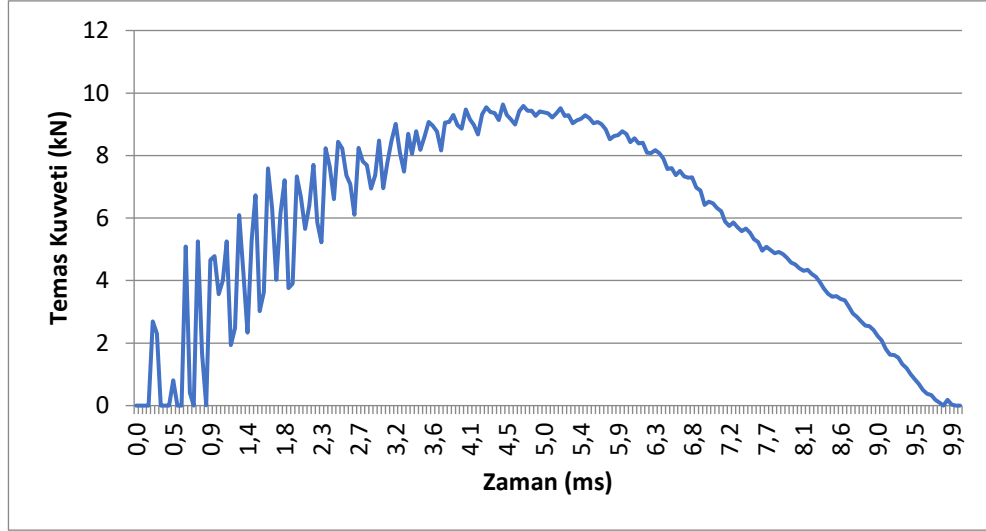
0.9 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.27.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,1637 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.27. 0.9 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**1 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 20 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

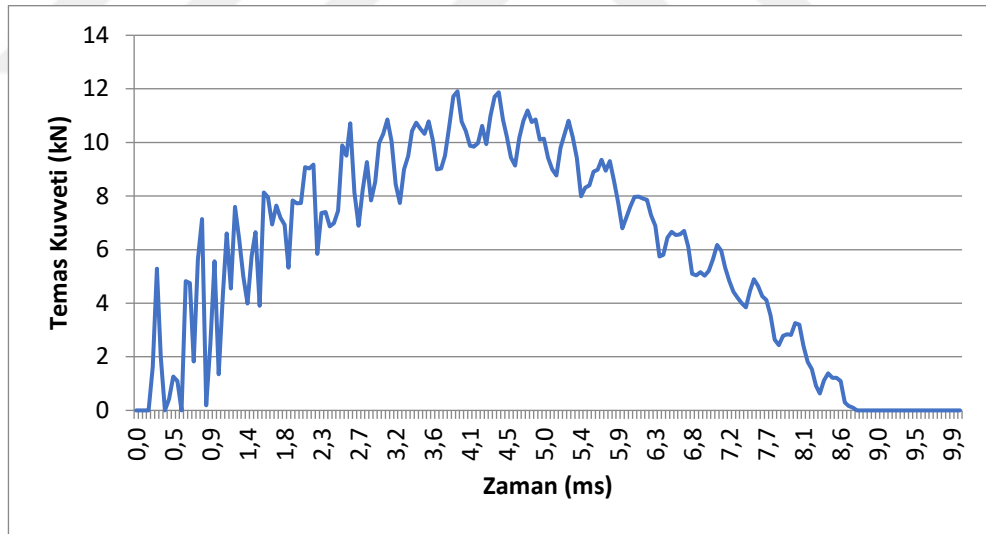
1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.28.'de gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **9,6343 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.28. 1 mm kalınlığı ve 20 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**1 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 25 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

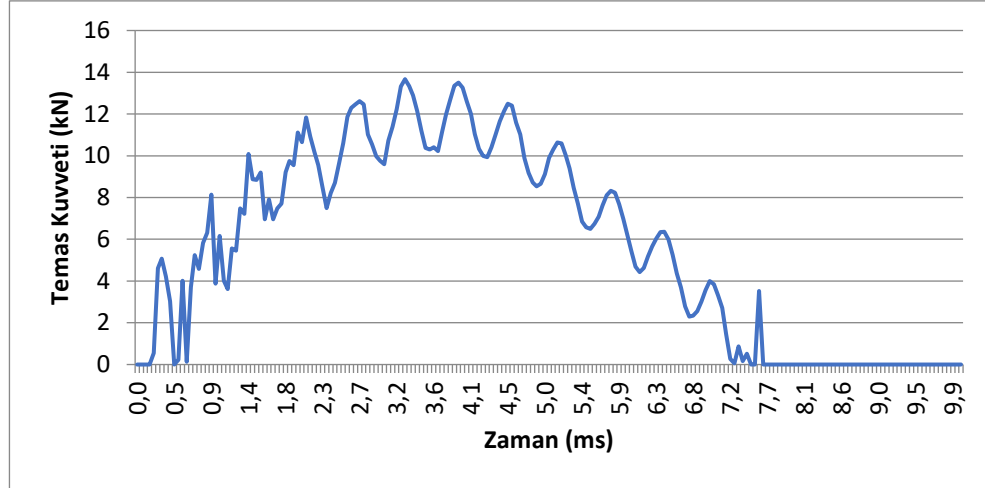
1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.29.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **11,9101 kN** olarak bulunmuştur.



Şekil 5.29. 1 mm kalınlığı ve 25 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

**1 mm Yapıştırıcı Kalınlığı ve 30 mm Bindirme Uzunluğu Sonuçları**

1 mm yapıştırıcı kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.30.'da gösterilen grafikte maksimum temas kuvveti **13,6684 kN** ve olarak bulunmuştur.

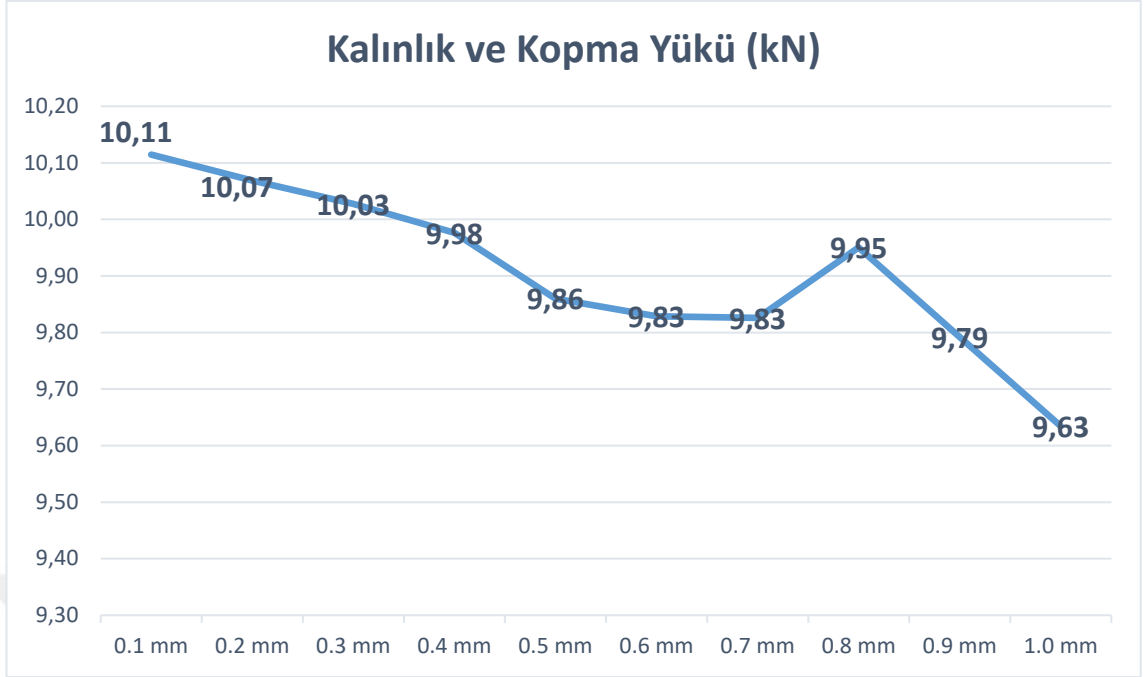


**Şekil 5.30.** 1 mm kalınlığı ve 30 mm bindirme uzunluğu için temas kuvveti

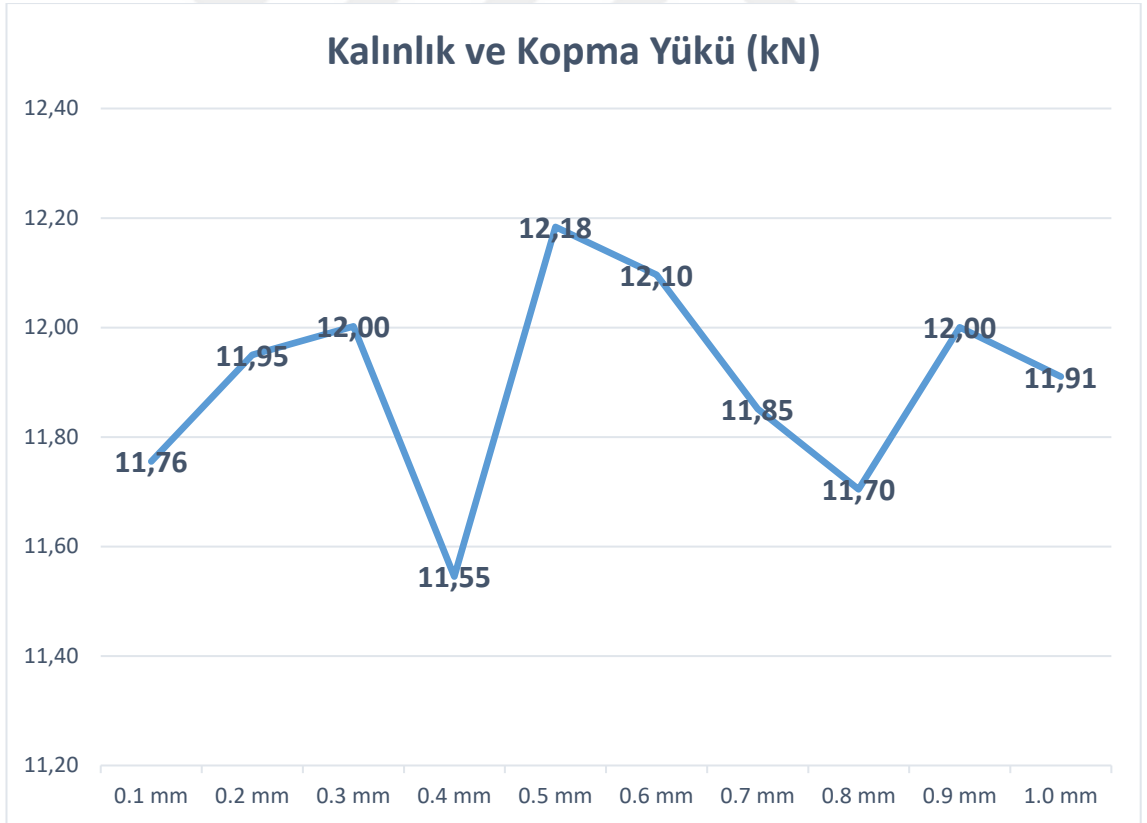
Yapıştırıcı kalınlığının ve bindirme uzunluğunun değişmesiyle temas kuvvetindeki değişmeyi görebileceğimiz sonuçlar Tablo 5.1’de verilmiştir. Yapıştırıcı bindirme uzunluklarının sırasıyla 20,25 ve 30 mm de, her kalınlık da temas kuvvetine nasıl etki ettiği grafiksel olarak sırasıyla Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33’ de verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Analiz sonuçları (Temas kuvveti)

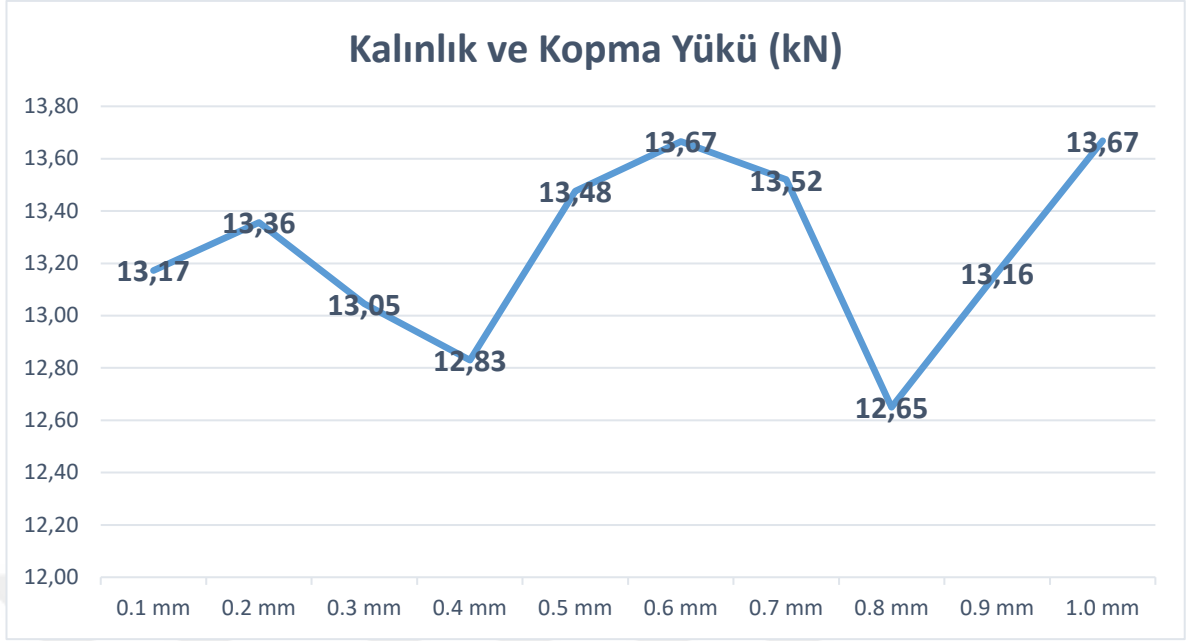
| <u>Yapıştırıcı</u><br><u>kalınlığı(mm)</u>                                                     | <u>Yapıştırıcı Bindirme Uzunluğu (mm)</u> |            |            | <u>En yüksek değer ile</u><br><u>en düşük değer</u><br><u>arasındaki değişim</u><br><u>(%)</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                | 20                                        | 25         | 30         |                                                                                                |
| 0.1                                                                                            | 10,1146 kN                                | 11,7552 kN | 13,1724 kN | 23.2                                                                                           |
| 0.2                                                                                            | 10,0688 kN                                | 11,9502 kN | 13,3556 kN | 24.6                                                                                           |
| 0.3                                                                                            | 10,0277 kN                                | 12,0022 kN | 13,0457 kN | 23.1                                                                                           |
| 0.4                                                                                            | 9,9766 kN                                 | 11,5451 kN | 12,8298 kN | 22.2                                                                                           |
| 0.5                                                                                            | 9,8601 kN                                 | 12,1837 kN | 13,4755 kN | 26.8                                                                                           |
| 0.6                                                                                            | 9,8290 kN                                 | 12,0961 kN | 13,6661 kN | 28.1                                                                                           |
| 0.7                                                                                            | 9,8260 kN                                 | 11,8511 kN | 13,5194 kN | 27.3                                                                                           |
| 0.8                                                                                            | 9,9505 kN                                 | 11,7046 kN | 12,6497 kN | 21.3                                                                                           |
| 0.9                                                                                            | 9,7918 kN                                 | 12,0004 kN | 13,1637 kN | 25.6                                                                                           |
| 1.0                                                                                            | 9,6343 kN                                 | 11,9101 kN | 13,6684 kN | 29.5                                                                                           |
| <u>En yüksek değer ile</u><br><u>en düşük değer</u><br><u>arasındaki değişim</u><br><u>(%)</u> | 4.75                                      | 5.24       | 7.45       |                                                                                                |



Şekil 5.31. 20 mm bindirme uzunluğu için değerler

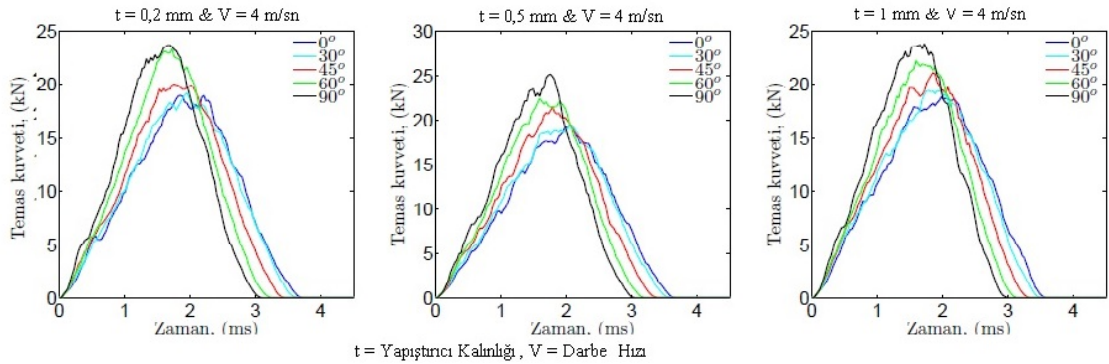


Şekil 5.32.25 mm bindirme uzunluğu için değerler

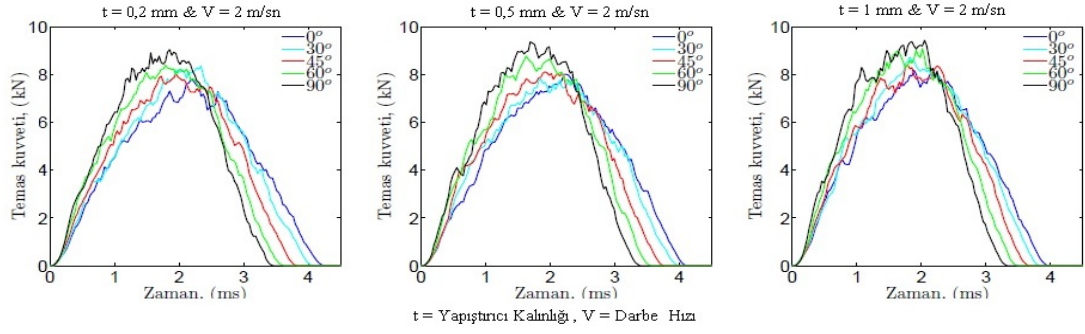


**Şekil 5.33.** 30 mm bindirme uzunluğu için değerler

Aşağıda Şekil 5.34. ve Şekil 5.35’ de, 2011 yılında yazılmış olan bir doktora tezinde darbe yükleri altındaki yapıştırma bağlantılarının yapıştırıcı kalınlığının sırasıyla 0,2 ,0,5 ve 1 mm olacak şekilde artmasıyla göstermiş olduğu temas kuvvetlerinin grafikleri gösterilmiştir (Yıldırım, 2011). Grafiklerde en yüksek temas kuvvetinin 0,5 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Tezimizdeki sonuçlarda da yapıştırıcı kalınlığının 0,4 ile 0,8 mm aralığında temas kuvvetinde artış olduğunu görmekteyiz. Yıldırım’ın yaptığı tez çalışmasında da yapıştırıcı kalınlığının optimum bir değeri olduğu belirtilmiştir.



**Şekil 5.34.** 4 m/sn’lik hızın temas kuvvetine etkisi



**Şekil 5.35.2 m/sn’lik hızın temas kuvvetine etkisi**

Tek tesirli bindirme bağlantısının 6 m/s’lik hıza sahip bir vurucu ile darbe yüküne maruz bırakılması sağlanmıştır. Bağlantıda yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcının bindirme uzunluğu değişkenlik göstermiştir. Yukarıda Tablo 5.1.’de yapıştırıcının kopma yükünün yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı bindirme uzunluğu ilişkisi ile ilgili sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 5.1.’de en yüksek değer; 1 mm kalınlığında ve 30 mm bindirme uzunluğundaki **13,6684 kN** olarak bulunmuştur.

- Darbe yükleri altındaki tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırma bindirme uzunluğunun artması, yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcı arasındaki temas yüzeyinin artmasına sebep olur. Bu sebeple daha fazla temasın elde edilmesi bağlantının darbe altındaki kopma yükünün artmasına sebebiyet verecektir.
- 20 mm bindirme uzunluğunda Şekil 5.31.’de görüldüğü üzere yapıştırıcı kalınlığının artması kopma yükünde düşmeye sebep olmuştur. Şekil 5.32. ve Şekil 5.33.’de ise yapıştırıcı kalınlığının artması ile belli kalınlıklara kadar kopma yükünde düşüş daha sonra tekrardan artışlar görülmüştür. 25 mm ve 30 mm bindirme uzunluklarında 0.4 mm ve 0.8 mm yapıştırıcı kalınlıkları grafiklerde dönüm noktaları olarak görülmektedir.
- Tek tesirli bindirme bağlantılarında genellikle hasar mod-I ve mod-II şeklinde görülür. Darbe yükünün uygulandığı yük yönü ve bağlantının mesnetlenme koşullarından dolayı yapıştırıcının hacminin yanında ataleti de çok önemlidir. Hem atalet açısından hem de daha fazla temas yüzeyinin oluşması bakımından bindirme uzunluğunun etkisi, kalınlığın etkisine göre daha yüksek olmuştur.
- Yapıştırıcıları diğer bağlantı tekniklerinin yerine tercih etmemizin en önemli sebebi, oluşan gerilmeleri yaymalarıdır. Yapıştırıcı kalınlığının yerine bindirme uzunluğunun artması bu gerilmeleri daha fazla yüzeye yayacağı için kopma yükünü arttırmıştır.

## 6. SONUÇLAR

Son yıllarda otomotiv ve havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan yapıştırma bağlantıları araştırma ve geliştirme açısından birçok tez ve makalenin konusu olmuştur. Bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının darbe yükü altındaki davranışları incelenmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantısının kullanıldığı, 6m/s'lik hız ile 90J'lük enerji kullanılan bu çalışma sonlu elemanlar programı ile incelenmiş olup sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Darbe yüküne maruz bırakılan tek tesirli yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı kalınlığının kopma yüküne etkisi her kalınlık da değişkenlik göstermektedir. Bununla birlikte çok fazla etki etmediği görülmüştür. Yapıştırıcı kalınlığının düzenli olarak artması, kopma yükü değerini de düzenli bir şekilde arttırmadığı gözlemlenmiştir.
- Darbe yüküne maruz bırakılan tek tesirli yapıştırma bağlantısında yapıştırıcının bindirme uzunluğundaki artışın kopma yüküne önemli derecede etki gösterdiği görülmüştür. Bindirme uzunluğunun artması her kalınlık da kopma yükünü arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Yapıştırıcı kalınlığının değiştirilmesi sonuçlarda maksimum % 7,45 değerinde etki ettiği görülürken, bindirme uzunluğunun değiştirilmesinin sonuçlara etkisinin maksimum % 29,5 olduğu gözlemlenmiştir. Buradan çıkarılacak en önemli sonuç kullanılan yapıştırıcı miktarının fazlalığı değil doğru şekilde kullanılmasıdır.
- Sonlu Elemanlar Metodu ile yapılan bu çalışmada Kohezif Bölge Modelinin uygulanması, literatürdeki diğer çalışmalar ile kıyaslandığında yapıştırıcının kopma yükünün hemen hemen aynı değerlerde olduğu görülmüş ve sonlu elemanlar metodunda kohezif bölge modelinin uygulanmasının doğru sonuçlara yakın olduğu gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar metodunun doğru sonuçlar vermesi bizlere malzeme, zaman ve fiziki yorgunluk yönünde çok önemli katkılar sağlamaktadır.

## 7. ÖNERİLER

- Bu çalışmada; tek tesirli bindirme bağlantısı darbe yükü altında teorik olarak sonlu elemanlar metodu ile incelemiştir. Bu çalışma deneysel çalışmalarla desteklenebilir.
- Bu çalışmada yalnızca bir bağlantı tipi, bir darbe yükü ve sınırlı sayıda analizler yapılmıştır. Darbe yükü altındaki yapıştırıcılar farklı bağlantı tipleri ve darbe yükleri altında incelenebilir.
- Yapıştırıcıların genellikle statik yükler altında incelenmesinin yetersiz olduğu bilinmektedir. Çünkü yapıştırıcıların son yıllarda otomotiv ve havacılık sektöründe kullanılması dinamik yükler altında da yaygın kullanıldığını göstermektedir. Bu sebeple araştırmacıların yapıştırıcıları dinamik yükler altında da incelemeleri, bu tez ile birlikte literatürde geniş bir araştırma konusu olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Adams, R. D. (1989). Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherends. A Review. *The Journal of Adhesion*, 30(1-4), 219-242.
- Adamvalli, M., & Parameswaran, V. (2008). Dynamic strength of adhesive single lap joints at high temperature. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(6), 321-327.
- Aga, Z. A., & Woldeesenbet, E. (2007). Bond thickness effect on impact response and damage of adhesively-bonded graphite/epoxy composites. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 21, 21-34.
- Akın, C. (2008). Epoxy Cam Elyaf Kompozit Levhanın Darbe Etkisinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), *Dumlupınar Üniversitesi*.
- Akpınar, S., & Özel, A. (2019). Experimental and numerical determination of the thermal cycle performance of joints obtained with nanostructure-doped nanocomposite adhesives. *Composites Part B: Engineering*, 174.
- Andruet, R. H. (1998). Special 2-D and 3-D Geometrically Nonlinear Finite Elements for Analysis of Adhesively Bonded Joints. (Doktora Tezi), *Virginia Polytechnic Institute and State University*.
- Asgharifar, M., Kong, F., Carlson, B., & Kovacevic, R. (2014). Dynamic analysis of adhesively bonded joint under solid projectile impact. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 50, 17-31.
- ASTM D1002 - 10, , “Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)”, (2019).
- Atahan, M. G. (2015). Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Bindirme Bağlantıların Eğik Darbe Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), *Erciyes Üniversitesi*.
- Aydın, M. D. (2003). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. (Doktora Tezi), *Atatürk Üniversitesi*
- Batra, R. C., Gopinath, G., & Zheng, J. Q. (2012). Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates. *Composite Structures*, 94(2), 540-547.
- Benzeggagh, M. L., & Kenane, M. (1996). Measurement Of Mixed-Mode Delamination Fracture Toughness Of Unidirectional Glass/Epoxy Composites With Mixed-Mode Bending Apparatus. *Composites Science and Technology*, 56, 439-449.
- Bezemer, A. A., Guyt, C. B., & Vlot, A. (1998). New impact specimen for adhesives: optimization of high-speed-loaded adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 18, 255-260.

- Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Taylor, A. C., & Wang, Y. (2000). The impact wedge-peel performance of structural adhesives. *Journal Of Materials Science*, 35, 1867–1884.
- Boukhili, R., Taib, A. A., Said, A., Sebastien, G., & Hychem, B. (2006). Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 226-236.
- Caputo, F., De Luca, A., Lamanna, G., Borrelli, R., & Mercurio, U. (2014). Numerical study for the structural analysis of composite laminates subjected to low velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 67, 296-302.
- Cowdrey, S., Ferguson, C., Lennox, A. F., Mauro, P., Neummayer, R., Orme, & B., M. (1998). *Loctite Worldwide Design Handbook*. Germany: Loctite Corporation.
- Çam, S. (2016). Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Yığılmalarının Azaltılması. (Yüksek Lisans Tezi), *Erzincan Üniversitesi*
- Çitil, Ş. (2012). Ortası Boş Ve Ara Elemanlı Çift Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. (Doktora Tezi), *Atatürk Üniversitesi*
- Da Silva, L. F. M., Das Neves, P. J. C., Adams, R. D., & Spelt, J. K. (2009). Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 319–330.
- Da Silva, L. F. M., Rodrigues, T. N. S. S., Figueiredo, M. A. V., De Moura, M. F. S. F., & Chousal, J. A. G. (2006). Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. *The Journal of Adhesion*, 82(11), 1091-1115.
- Durmuş, M., & Akpınar, S. (2020). The experimental and numerical analysis of the adhesively bonded three- step-lap joints with different step lengths. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 105.
- Galliot, C., Rousseau, J., & Verchery, G. (2012). Drop weight tensile impact testing of adhesively bonded carbon/epoxy laminate joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 35, 68-75.
- Ghasemnejad, H., Argentiero, Y., Tez, T. A., & Barrington, P. E. (2013). Impact damage response of natural stitched single lap-joint in composite structures. *Materials & Design*, 51, 552-560.
- Gleich, D. M., Van Tooren, M. J. L., & Beukers, A. (2001). Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 15, 1091-1101.
- Goglio, L., & Rossetto, M. (2008). Impact rupture of structural adhesive joints under different stress combinations. *International Journal of Impact Engineering*, 35(7), 635-643.

- Higuchi, I., Sawa, T., & Suga, H. (2002). Three-dimensional finite element analysis of single-lap adhesive joints subjected to impact bending moments. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 16(10), 1327-1342.
- Israr, H. A., Rivallant, S., Bouvet, C., & Barrau, J. J. (2014). Finite element simulation of 0°/90° CFRP laminated plates subjected to crushing using a free-face-crushing concept. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 62, 16-25.
- İzumi, H., Toshiyuki, S., Hirohisa, O., & Shinya, K. (2003). Three-dimensional finite element analysis of stress response in adhesive butt joints subjected to impact bending moments. *The Journal of Adhesion*, 79, 1017–1039.
- Kanar, B., Akpınar, S., Akpınar, I. A., Akbulut, H., & Özel, A. (2018). The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cyclic conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 120-130.
- Kinloch, A. J. (Ed.) (1997). *Adhesives in Engineering*. London.
- Kodakoğlu, L. (1996). Yapıştırıcıların Genel Özellikleri ve Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), *İstanbul Teknik Üniversitesi*
- Korkut, S. (2017). Statik Ve Dinamik Yükler Altında Kompozit Plakaların Hasar Durumlarına Karşı Davranışlarının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), *İstanbul Teknik Üniversitesi*
- Lopes, C. S., Camanho, P. P., & González, C. (2014). Advanced Simulation of Low-Velocity Impact on Fibre Reinforced Laminates. *Paper presented at the 4th International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures*, Cape Town, South Africa.
- Mazumdar, S. K., & Mallick, P. K. (1998). Static and Fatigue Behavior of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites. *Polymer Composites*, 19, 139-146.
- Mortensen, F., & Thomsen, O. T. (2002). Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach. *Composites Science and Technology*, 62, 1011–1031.
- Noorman, N. C. (2014). Cohesive Zone Modelling In Adhesively Bonded Joints; Analysis On Crack Propagation In Adhesives And Adherends. (Master Thesis), *Delft University of Technology, Netherlands*.
- Ojalvo, I. U., & Eidinoff, H. L. (1978). Bond Thickness Effects Upon Stresses in Single-Lap Adhesive Joints. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 16, 204-211.
- Özel, A., Aydin, M. D., & Temiz, Ş. (2004). The effects of overlap length and adherend thickness on the strength of adhesively bonded joints subjected to bending moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(3), 313-325.

- Özel, A., Kadioglu, F., Şen, S., & Sadeler, R. (2003). Finite element analysis of adhesive joints in four-point bending load. *The Journal of Adhesion*, 79, 683-697.
- Özel, A., Temiz, Ş., Aydın, M. D., & Şen, S. (2005). Stress analysis of shrink-fitted joints for various fit forms via finite element method. *Materials and Design*, 26, 281-289.
- Özel, A., Yazici, B., Akpınar, S., Aydın, M. D., & Temiz, Ş. (2014). A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Composites Part B: Engineering*, 62, 167-174.
- Özenç, M. (2007). Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), *Pamukkale Üniversitesi*
- Özenç, M. (2014). Perçin Ve Yapıştırma Hibrit Bağlantılarının Deneysel Ve Sayısal Analizi. (Doktora Tezi), *Pamukkale Üniversitesi*
- Ranaweera, R. K. P. S. (2010). Prediction of Delamination in Composite Laminates under Quasi-Static and Fatigue Loadings with Local/Non-local Damage Evolution. (Master thesis), *University of Moratuwa*
- Sawa, T., Nakano, K., & Toratani, H. (1997). A two-dimensional stress analysis of single-lap adhesive joints subjected to tensile loads. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11(8), 1039-1056.
- Sawa, T., Suzuki, Y., & Kido, S. (2002). FEM stress analysis and strength of adhesive butt joints of similar hollow cylinders under static and impact tensile loadings. *Journal of Adhesion Science & Technology*, 16, 1449-1468.
- Sawa, T., & Uchida, H. (1997). A two-dimensional stress analysis and strength evaluation of band adhesive butt joints subjected to tensile loads. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 11, 811-833.
- Sayman, O., Arikan, V., Dogan, A., Soykok, I. F., & Dogan, T. (2013). Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 54, 409-414.
- Tezcan, Ş. (2001). Yapıştırma Bağlantılarının Dinamik Yükler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. (Doktora Tezi), *Pamukkale Üniversitesi*
- Tın, S. (2006). Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım Ve Analizi. (Yüksek Lisans Tezi), *Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi*
- Tsai, M. Y., & Morton, J. (1995). The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints. *Composite Structures*, 32, 123-131. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29077254>.
- Yang, S., Gu, L., & Gibson, R. F. (2001). Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures. *Composite Structures*, 51, 63-71.
- Yıldırım, M. (2011). Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışları. (Doktora Tezi), *Erciyes Üniversitesi*