

**TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA  
BAĞLANTILARININ TASARIM ve ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hüseyin DİNÇ**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN**

**MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**EYLÜL 2007**

**T.C.  
AFYONKARAHİSAR KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ  
TASARIM ve ANALİZİ**

**Hüseyin DİNÇ**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN**

**MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**EYLÜL 2007**

## ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN danışmanlığında,

Hüseyin DİNÇ tarafından hazırlanan

**“Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım ve Analizi”**

başlıklı bu çalışma lisansüstü eğitim ve öğretimin yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca

...../...../.....

tarihinde aşağıdaki jüri tarafından

Makine Eğitimi Anabilim Dalında

Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı, SOYADI

İmza

Başkan: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

Üye : Yrd. Doç.Dr. Yılmaz YALÇIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇOLAKOĞLU

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
...../...../.....tarih ve  
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç.Dr. Zehra BOZKURT  
Enstitü Müdürü

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
SİMGELER .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER .....	3
2.1 Metal Yapıştırma Bağlantıları .....	6
2.1.1 Yapıştırıcıların Sınıflandırılması.....	8
2.1.1.1 Yapıştırılacak Malzeme Türüne Göre Sınıflandırma.....	10
2.1.1.2 Fiziksel Özelliklerine Göre Sınıflandırma.....	10
2.1.1.3 Sertleşme Durumuna Göre Sınıflandırma .....	10
2.1.1.4 Yapıştırma Sıcaklığına Göre Sınıflandırma .....	11
2.1.1.5 Kimyasal Türüne Göre Sınıflandırma.....	11
2.1.2 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları.....	13
2.1.3 Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları.....	15
2.1.4 Yapıştırma İşlemi .....	16
2.1.4.1 Yapıştırma Yüzeyinin Hazırlanması .....	16
2.1.4.2 Ön Hazırlık Çalışmaları.....	18
2.1.4.3 Yapıştırma Bağlantılarına Etki Eden Kuvvetler .....	19
2.2 Gerilme Analizi Kriterleri .....	20
2.2.1 Koordinat Sistemindeki Gerilme İlişkileri.....	20
2.2.2 Gerilme Şekil Değiştirme İlişkileri.....	22
2.2.3 Eşdeğer Gerilme (Von Mises).....	23
3. MATERYAL VE METOD .....	25
3.1 Sonlu Elemanlar Metodu .....	25
3.2 Franc Programı.....	26
3.3 İki Boyutlu Problem .....	27
3.4 İzoparametrik Eleman .....	29

3.5 Eleman Rijitlik Matrisi .....	33
3.6 Yapıştırma Bağlantısının Geometrik Modeli.....	35
3.7 Yapıştırıcının ve Yapıştırılacak Malzemenin Özellikleri.....	37
3.8 Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Şartları.....	37
4. BULGULARve TARTIŞMA .....	39
4.1 Gerilme Analizleri.....	39
5. SONUÇ.....	57
6. KAYNAKLAR .....	54
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET  
TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ  
TASARIM ve ANALİZİ  
Hüseyin DİNÇ  
Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

Yapıştırma bağlantıları kullanımının kolay olması ve avantajlarından dolayı diğer bağlantı türlerine alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yapıştırma bağlantısında optimum şartlar sağlandığında güvenli bir bağlantı olmaktadır.

Bu çalışmada, farklı geometrik şekillerden malzemelerden imal edilmiş levhaların yapıştırıcılar ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilmeler sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Analizlerde, çelik malzeme kullanılmıştır. Ayrıca, analizlerde iki boyutlu Franc 2D programı kullanılıp, gerilme kriteri olarak eş değer (Von Mises) gerilme durumu göz önüne alınmıştır. Levhaların yapıştırıcı ile birleştirilmesinde farklı çentik tipli (yuvarlak ve V tipli) çentik sayılı (5 ve 10) levhalar, yapıştırıcı kalınlıkları (0.2, 0.3, 0.4, 0.5mm) ve yapıştırıcının elastisite modülü (20GPa, 50GPa 100GPa) kullanılmıştır.

**2007, 57sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Yapıştırıcılar, Gerilme, Sonlu elemanlar metodu, Yapıştırma bağlantıları, Franc.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND ANALYSIS OF SINGLE LAP ADHESIVE BONDING**

Hüeyin DİNÇ

Afyonkarahisar Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Education

Advisor: Prof. Dr. Süleyman TASGETİREN

Adhesive joints appear as an alternative such as other adhesive types due to easy of using and advantage. Therefore, the using of adhesive joints increases every day. The adhesive joints to be a security joint with optimum condition.

In this study, the stresses occurring in joints with adhesives of plates manufactured from different geometry shapes are investigated by using finite element method. In the analysis, Franc 2D program is used and the equivalent stress (Von Mises) is considered as a stress criterion. The various notch types (Circular ve V type), the notch numbers (5 and 10) plates, the adhesive thickness (0.2, 0.3, 0.4, 0.5.) and the adhesive elasticity modulus ((20GPa, 50GPa, 100GPa) are used in joining with adhesives of the plates.

**2007, 57 pages.**

**Key words:** Adhesive substances, stres, nite elements, method, adhesive joints, Franc.

## TEŐEKKÖR

Bu tez alıőmasını hazırlanmasında her türlü desteğini ve ilgisini esirgemeyen baőta danışman hocam Prof. Dr. Sőleyman TAŞGETİREN'e, Arő. Gör. İsmail UCUN'a çok değerli arkadaőım Sinan TİN'e, maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen aileme ve emeği geçen herkese teőekkőr ederim.



## SİMGELER DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\partial$	Diferansiyel,
$\sigma$	Gerilme,
$\tau$	Kayma gerilmesi,
$F$	Kuvvet,
$\Sigma$	Toplam,
$\varepsilon$	Şekil değiştirme,
$\gamma$	Kayma-şekil değiştirme,
$E$	Elastisite modülü,
$u, v$	Deplasman değerleri,
$\sigma_e$	Eşdeğer gerilme,
$\sigma_{yp}$	Asal gerilme,
$\{u\}$	Yer değiştirme vektörü,
$\lambda_{yp}$	Eksenel yük faktörü,
$h$	Yapıştırıcı kalınlık,
$f$	Kütle kuvveti,
$T$	Yüzey kuvveti,
$V$	Hacim,
$A$	Alan,
$dV$	Diferansiyel hacim,
$[D]$	Elastisite matrisi,
$\{q\}$	Düğüm deplasman vektörü,
$N_i$	Langrange şekil fonksiyonu,
$c$	Katsayı,
$[N]$	Şekil değiştirme fonksiyonu (matrisi),
$j$	Jakobiyen matrisi,
$U$	Elastik enerji,
$[G]$	Şekil fonksiyonu matrisi,

$[k]$	Eleman rijitlik matrisi,
$L$	Levha uzunluğu,
$l$	Yapıştırma uzunluğu,
$R$	Levha kalınlığı,
$h$	Yapıştırıcı kalınlığı,
$\nu$	Poisson oranı.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1	Yapıştırma bağlantısında adhezyon ve kohezyon .....	7
Şekil 2.2	Perçin ve yapıştırma bağlantısındaki yük dağılımı .....	14
Şekil 2.3	Yüzey pürüz formları.....	16
Şekil 2.4	Yapıştırma bağlantılarında farklı kuvvet uygulamaları.....	19
Şekil 2.5	Kartezyen koordinatlarda gerilme elemanı.....	20
Şekil 2.6	İki boyutlu elemanda şekil değiştirme ilişkisi.....	21
Şekil 3.1	İki boyutlu problem .....	28
Şekil 3.2	Dört düğümlü dörtgen eleman .....	29
Şekil 3.3	Doğal koordinatlardaki temel eleman.....	30
Şekil 3.4	Yapıştırma bağlantısının geometrik modeli (çentik tipi V, çentik sayısı 5).37	
Şekil 3.5	Yapıştırma bağlantısının sonlu elemanlar modeli .....	38
Şekil 3.6	Yapıştırma bağlantısının yükleme koşulları ve sınır şartları .....	38
Şekil 4.1	İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 10, çentik tipi V).....	39
Şekil 4.2	İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 10, çentik tipi U).....	40
Şekil 4.3	İki bakır malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 10, çentik tipi U).....	41
Şekil 4.4	İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 10, çentik tipi V).....	42
Şekil 4.5	İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 5, çentik tipi U) .....	43
Şekil 4.6	İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 5, çentik tipi V) .....	43
Şekil 4.7	Çelik-bakır malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 5, çentik tipi V).....	44
Şekil 4.8	İki farklı çentik tipli malzemenin yapıştırma bağlantısı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (çentik sayısı 10).....	45
Şekil 4.9	Üç farklı malzemedan oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları (çentik sayısı 5, çentik tipi U) .....	46

Şekil 4.10 Çentiksiz (düz) iki çelik malzemenin yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilme dağılımı .....	46
Şekil 4.11 Çentiksiz (düz) üç farklı malzemenin yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilme dağılımı .....	47
Şekil 4.12 Çentiksiz (düz) iki çelik malzemenin yapıştırma bağlantısında üç farklı elastisite modülü kullanılarak meydana gelen gerilme dağılımı.....	48
Şekil 4.13 Çentiksiz (düz) iki bakır malzemenin yapıştırma bağlantısında üç farklı elastisite modülü kullanılarak meydana gelen gerilme dağılımı.....	48

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 4.1	Çentik sayısı 10, çentik tipi V olan çelik levha bağlantısında meydana gelen gerilmeler (çetik sayısı 10, çentik tipi U ) (MPa).....	49
Çizelge 4.2	İki çelik levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler (çetik sayısı 10, çentik tipi U ) (MPa).....	49
Çizelge 4.3	İki çelik levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler (çetik sayısı 5, çentik tipi V ) (MPa).....	50
Çizelge 4.4	İki çelik levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler (çetik sayısı 5, çentik tipi U ) (MPa).....	50
Çizelge 4.5	Çentiksiz (düz) çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilmeler (MPa) .....	51

## TABLolar DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 2.1 Önemli yapıştırıcılar .....	8
Tablo 2.2 Bazı Yapıştırıcıların özellikleri .....	9
Tablo 3.1 Yapıştırıcı ve yapıştırılacak malzemelerin özellikleri .....	37

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, yapıştırıcıların kimyasal ve fiziksel özelliklerinde büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Bu ilerlemelere bağlı olarak, makine imalat sanayisinde kullanımları gün geçtikçe artmaktadır.

Yapıştırma bağlantıları endüstride hafif metal konstrüksiyonlar, sac levha takviyesi, mil ve göbek bağlantıları gibi yerlerde kullanılmaktadır. Uygun bir yapıştırıcı kullanıldığı takdirde farklı malzemeleri de iyi bir şekilde birleştirmek mümkündür. Örneğin son zamanlarda fren balataları, fren pabuçlarına perçinleme yerine yapıştırma yolu ile tespit edilmektedir. Kimyevi tesirlere dayanıklı olan bir çok plastik malzemenin birbirleri ile veya madeni bir parça ile birleştirilmesi ancak yapıştırma yolu ile mümkün olmaktadır.

Kağıt, odun, kösele, lastik ve seramik gibi malzemeler çok eski zamanlardan beri yapıştırma yoluyla birleştirilmektedir. Metal yapıştırma ise, İkinci dünya savaşı sırasında Amerika Birleşik devletlerinde uçak yapımında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Örneğin, uçak gövdesinin yapımında perçin ve kaynak yöntemleri yeterli statik mukavemete sahiptirler; ancak dinamik mukavemeti yeterli değildir. Yapıştırma bağlantıları, bağlantı bölgesinde düzgün gerilme sağlayarak, sürekli mukavemeti arttırmakla ve ayrıca kütle ekonomisi de sağlamaktadır.

Endüstriyel yapıştırıcıların fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki gelişmelerden dolayı yapıştırıcı ile bağlama tekniği birçok mühendislik alanında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer geleneksel metotlara (kaynak perçin bağlantıları vs.) göre sahip olduğu avantajlardan dolayı, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar birçok araştırmacı tarafından nümerik olarak sonlu elemanlar metodu ve deneysel olarak incelenmiş olup, bu yöndeki araştırmalar devam etmektedir. Yapıştırma bağlantılarının dinamik davranışları ayrı olarak incelenmektedir. Özellikle uzay, uçak ve makine konstrüksiyonlarında dinamik yükler altında kullanılmaları önemlidir.

Metal yapıştırma bağlantısı, iki metalik parçanın, yapıştırma görevini yapan ve genellikle sentetik esaslı bir yapıştırıcı yardımıyla çözülemeyecek şekilde birleştirilmesi ile sağlanır. Yapıştırıcı kimyasal reaksiyonlar sonucu makro moleküllerin oluşumu ile

sertleşir ve gerek kendi iç mukavemeti gerekse parça yüzey yapışması sonucu (adhezyon ve kohezyon kuvvetleri) dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar.



## 2. GENEL BİLGİLER

Yapıştırma bağlantılarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ayrıca yapıştırıcılarla ilgili araştırmalar devam etmekte ve değişik şekillerde avantajlarından faydalanılmaktadır. Yapıştırma bağlantıları ile ilgili deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu yapıştırma bağlantılarının nümerik olarak modellenmesinde en çok kullanılan yöntemdir (Du et al. 2007, Fekirini et al. 2008, Lucas et al. 2007).

Suyun yapıştırıcı üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Yapıştırma yapılacak bölgenin nemli olmaması ve kuru olması gerekmektedir. Jarry ve Shenoı (2005) yaptıkları çalışmada, bir yapıştırıcıyı nemli ortamdaki dayanım davranışları incelenmiştir. Eğer yapıştırıcı bağlantısı su ortamında kullanılacaksa, iyi bir mukavemet için yapıştırıcı kalınlığının artırılması gerektiği düşünülmüştür.

Sargent (2005) yüksek sıcaklık reçineleri için ara yüzeyde meydana gelen ayrılma enerjisini incelemiştir. Kaftelen ve Baldan (2005) kompozit yamaları incelemişler ve kullanım yerine göre mükemmel performans sağladığı görülmüştür. Çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozitlerin yorulma ömürleri deneysel olarak incelenmiştir. Tabaka sayısının artması yorulma ömürlerini önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Ayrıca, ince tabakalı birleştirmelerde yapıştırıcı uzunluğunun artması yorulma ömrünü artırmaktadır.

Fitton ve Broughton (2004) bağlantı mukavemetini optimize etmek için değişken modüllü yapıştırıcı kullanmış ve sonuç olarak düşük modüllü yapıştırıcıların taşıma kapasitesini azalttığı ve büyük modüllü yapıştırıcıların ise kayma gerilmesine direnç gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Colombi ve Poggi (2005) yapıştırıcı ile takviye edilmiş bir cıvata bağlantısında oluşan hasarı nümerik olarak sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Yapıştırıcıların özelliklerine bağlı olarak iki tür yapıştırıcıdan birinin gevrek diğerinin ise, daha sünek olduğu görülmüştür.

Aydın vd. (2005) yaptıkları çalışmada tek etkili bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri incelenmiştir. Bağlantının uç bölgelerinde çekme ve orta bölgelerinde ise kayma gerilmeleri olduğu görülmüştür. Eğer yapıştırıcı kalınlığı arttırılırsa, kayma gerilmeleri büyüme ve malzeme kalınlığındaki artış ile eşdeğer gerilmelerin uç bölgeden orta bölgeye doğru artan şekilde dağıldığı görülmüştür.

Underhill ve DuQesnay'ın (2005) yaptıkları çalışmada nemli epoksi reçine için kayma gerilmeleri ve yorulma ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nemli ve kuru sistemlerdeki yorulma ömürleri araştırılmış ve nemli ortamda daha az yorulma ömrüne sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, yorulmanın uç bölgelerde başladığı ve hasarın birleştirmeden ve çekme gerilmelerden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Gonçalves et al. (2002) çalışmalarında yapıştırıcı bağlantılarının üç boyutlu sonlu eleman analizi için yeni ve sağlam bir model ortaya koymaya çalışmışlardır. Ara yüzeyde meydana gelen hataların genel olarak komşu yapılara da yayılıp bütün bağlantı alanını etkileyip hasara neden olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yapıştırma bağlantıları ile desteklenmiş yapıların esnekliği üzerine yapılan çalışmada aşırı yüklenmeler karşısında esnek olduğu ve hasara uğratan kritik yükün % 14 olarak arttığı görülmüştür (Keller ve Castro, 2005).

Yapıştırıcının mekanik özellikleri yapıştırma bağlantısının önemli ölçüde etkilemektedir. Yapıştırma bağlantısının sert olması ve uygulanan kuvvete bağlı olarak önemli gerilme konsantrasyonları oluşturmaktadır. Bu gerilme konsantrasyonları ile yapıştırma bölgesinde çatlak oluşmaktadır. Xie et al. (2005) çalışmalarında sert bir yapıya sahip yapıştırma bağlantısında çatlak ilerleme davranışı ve hasar durumu sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Çatlak ilerleme davranışı iyi bir biçimde incelenip, gerilme şiddet faktörü J integrali ile açıklanabilmektedir (Kanchanimai et al. 2004).

Deng ve Lee (2005) yaptıkları çalışmada yapıştırma bağlantısında kuvvetlerin etkisi ile oluşan gerilme konsantrasyonları ile çatlağın başlaması ve ilerlemesini incelemişlerdir. Gerilme konsantrasyonları belli bir sınırı aştıktan sonra çatlak başlamış, Mod 1 ve Mod 2 kırılma davranışı gözlemlenmiştir. Burada gerilmelerin artışı çatlak ilerleme hızının artışında önemli rol oynamaktadır.

Quaresimin ve Ricotta (2005) tek tabakalı kompozit malzemelerin yapıştırıcılar ile birleştirilmesini sonlu elemanlar metodu ile incelemişler ve geniş deneyler sonucunda en uygun model tespit edilmiştir.

Nemes et al. (2005) basit bir model üzerinde yapmış olduğu çalışmada gerilme dağılımlarının tahmin edilerek bağlantı durumlarının geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Gerçek uygulama sırasında uygulanan potansiyel enerji ile gerilmelerin nerelerde oluştuğu ve yapıştırıcı kalınlığı artırıldığında gerilme değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Yapıştırma bağlantılarında suyun önemli bir etkisi bulunmaktadır. Su, bağlantıyı fiziksel ve mekaniksel olarak etkilemektedir. Suyun olumsuz etkisini yok etmek için yapıştırıcının modülünü ve bağ kuvvetlerinin artırılması gerekmektedir. Çevresel faktörlerin ve su ile birleşmesi ile yapışkan ara yüzeyinde bağlantı yönünden zayıflamalar görülmektedir. Bu yüzden yapıştırıcı şartları iyileştirilmeli ve çevresel faktörler unutulmamalıdır (Frigione et al. 2005).

Yapıştırılmış kompozit bağlantıların çalışma koşullarında ısıya dayanıklılıkları 300, 450 ve 550 °C de dayanım gösterdikleri, 750 °C sıcaklıkta yapıştırılan inorganik silikatın 900 °C' ye kadar herhangi bir değişiklik göstermediği görülmüştür. Bu özelliğin malzemedeki oksijen ve silikonun dağılımı ile ilgili olduğu, ancak destek noktasının aşılmasından sonra bozulmaların ortaya çıktığı görülmüştür (Wang et al. 2005).

Underhill ve DuQuesnay (2005) alüminyum yapıştırma bağlantısında meydana gelen hata durumu silan esaslı bir yüzey hazırlık yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Meydana gelen sonuçlar en azından bazı durumlarda bağlantılarda hataya neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuçta bir aşınma gerçekleşmekle birlikte, bu hata sistem için ana sorunu teşkil etmemekte olduğunu savunmuşlardır.

Moura et al. (2005) yaptıkları çalışmada epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerini incelemiş ve gerilme dağılımları sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, yapıştırma uzunluğundan kaynaklanan eşit olmayan gerilme yığılmaları oluştuğu görülmektedir. Fitton ve Broughton'un (2004) yaptıkları çalışmada farklı

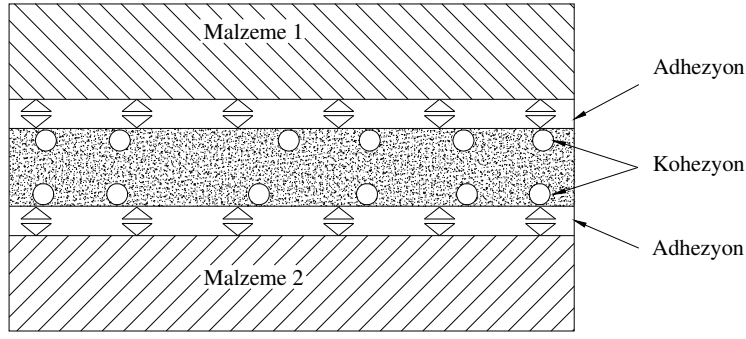
yapıştırıcılar kullanılarak bağlantı performansını analitik yöntem ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

## **2.1 Metal Yapıştırma Bağlantıları**

Metal yapıştırma tekniği; özellikle hafif metal konstrüksiyonları, sac levhaların takviyesi, boru, mil ve göbekli bağlantıların sağlanmasında kullanılmaktadır. İyi izolasyon özellikleri dolayısıyla da elektronik endüstrisinde kullanılmaları yaygınlaşmıştır. Hassas cihaz tekniği ve optik aletlerin üretimi de metal yapıştırmanın ağırlık kazandığı uygulama alanlarıdır. Metal-organik gibi farklı malzeme çiftini uygun bir yapıştırıcı ile en iyi bir şekilde birleştirmek mümkündür. Buna pratik bir örnek olarak fren balatalarının pabuçlarına tespiti gösterilebilir (Anık 1989).

Kaynak ve lehim; ısının yardımıyla yapılan ve genellikle metalik parçalara uygulanan çözülemeyen bağlama yöntemleridir. Isı önemli şekil değiştirmeler meydana getirmektedir; bu husus özellikle boyutları küçük olan hassas cihazlarda istenilmeyen bir olaydır. Modern teknikte metal olmayan malzemeler gittikçe daha çok kullanılmaktadır. Malzemeler için yapıştırma, macunlama ve gömme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler özellikle yapıştırma metalik parçalar için de kullanılmaktadır (Akkurt 1997)

Bağlantının mukavemeti iki ana olaya bağlıdır. Birincisi, yapıştırıcı maddenin molekülleriyle birbirine bağlanan parçaların yüzeyleri arasında meydana gelen ve fiziksel ve kimyasal bir nitelik taşıyan “adhezyon” olayı yanında yapıştırıcının iç mukavemetini tayin eden yapıştırıcı moleküllerinin kendi aralarındaki bağımlılık durumu “kohezyon” denilen olaya dayanır. Şekil 2.1’de yapıştırma bağlantısında adhezyon ve kohezyon olaylar gösterilmiştir (Rende 2000).



Şekil 2.1 Yapıştırma bağlantısında “adhezyon” ve “kohezyon” (Rende 2000).

Yapıştırma bağlantısı, iki parçanın, yapıştırma görevini yapan ve genellikle sentetik esaslı bir yapıştırıcı yardımıyla çözülemeyecek şekilde birleştirilmesi ile sağlanır. Yapıştırıcı kimyasal reaksiyonlar sonucu makro moleküllerin oluşumu ile sertleşir ve gerek kendi iç mukavemeti gerekse parça yüzeylerine yapışması sonucu (adhezyon ve kohezyon kuvvetleri) dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar (Tin 2006).

Ayrıca kaynak, perçin ve cıvata ile yapıştırma kombine edildiğinde, sızdırmaz ve korozyon tehlikesi olmayan, mukavemet özellikleri iyileştirilmiş bağlantılar elde edilir. Özellikle otomotiv endüstrisinde yapıştırma-nokta kaynağı kombinezonu büyük bir önem taşır (Anık vd., 1997).

Yapıştırma bağlantıları, kaynak, perçin ve benzeri diğer bağlantı şekillerinde olduğu gibi ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe sebep olmadığı, gerilme yığılmaları meydana getirmediği ve yapışma genellikle birleştirilen parçaların ergime sıcaklıklarının da çok altında yapılabildiği için kendisine uygun bir gelişme alanı bulmuştur. Bundan başka ağırlık ve masraf bakımından önemli tasarruf sağlanabilmekte, daha düzgün ve temiz yüzeyler elde edilebilmektedir (Gediktaş 1995).

### 2.1.1 Yapıştırıcıların Sınıflandırılması

Tek bileşenli tutkallarda yapışma ve sertleşme görevi yapan maddeler bir arada (karışmış olarak) bulunur. Bu tür yapıştırıcılar genelde basınç veya sıcaklık altında sertleşirler. Her hangi bir yapıştırıcı kullanılmadan önce özellikleri öğrenilmeli ve yapımçı firmaların tavsiyelerine uyulmalıdır. Çeşitli maksatlar için kullanılan yapıştırıcıların esasını genel olarak “Suni reçineler” teşkil eder. Bunların içinde kimyevi bakımdan fenol, epoksit, akril reçineleri en fazla kullanılır. Bunlar piyasada, imalatçı firmaların koydukları özel isimlerle tanınırlar. Tablo 2.1 ve 2.2’de bazı önemli yapıştırıcılar ve kullanma alanları verilmiştir. Yapıştırıcılar toz, pasta, sıvı veya katı halde olurlar. Yapışma normal oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta olabilir.

Reçinenin sertleşmesi sırasında parçaları birbirine bastırmak ta gerekebilir. Bu özelliklere göre yapıştırıcıları aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz (Gediktaş 1995).

Tablo 2.1 Önemli Yapıştırıcılar ( Gediktaş 1995).

Kimyasal Yapı	Ticari Ad	Genel Özellikler ve Kullanıldığı Yerler
Epoksit Reçinesi	Epilox, Araldit, Epoxy	İki bileşenli, uzun sertleşme süresi. Madenlerin, duroplastların, keramaiklerin yapıştırılması için.
Poliester Reçinesi	Akemi, Mökodur, Vestopal	İki bileşenli, uzun sertleşme süresi. Madenlerin, duroplastların, keramaiklerin yapıştırılması için.
Fenol Reçinesi	Redux, Plastaphenal	Bir veya iki bileşenli, tatbiki zor. Madenlerin yapıştırılması için.
Akril Reçinesi	Agomet	Çabuk sertleşir, kullanılması kolay. Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için.
Polisosiyyamat	Desmadur, Desmocol	İki bileşenli. Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için.
Siyonokrilat, Monomer	Eastman 910, Tiox K 1	Tek bileşen, çabuk sertleşir. Madenlerin, plastiklerin ve elastomerlerin yapıştırılması için.
Epoksit + Thiokol	Polisulfid-Likit-polimer	İki bileşenli. Çeşitli malzemelerin yapıştırılması ve sızdırmazlık için.
Epoksit + Poliamid	Versamid, Lefia-Met	İki bileşenli. Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için.
Keramik Karışımları	Ceramic UJ 1067	Yüksek uygulama sıcaklığı. Madenlerin yapıştırılması için.

Genel olarak yapıştırma malzemeleri oda sıcaklığında katılaştıran Soğuk yapıştırıcılar ve 80°-200°C arasında katılaştıran sıcak yapıştırıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Sıcak zamklar ile yapılan yapıştırmalar basınçlı veya basınçsız olarak gerçekleştirilebilir. Soğuk yapıştırıcılar genellikle yapıştırıcı ve katılaştırıcı olmak üzere iki bileşenden meydana gelir. Sıcak zamklar ise, katı halinde bulunur ve tek bileşenlidir. Yapıştırıcılar katı, pasta veya toz halinde bulunabilirler (Akkurt 1996).

Tablo 2.2 Bazı Yapıştırıcıların Özellikleri ( Gediktaş 1995).

Yapıştırıcının Adı	Karıştırma Oranı (yapıştırıcı sertleştirici)	Sertleşme			Mukavemet		Kullanma Sıcaklığı °C
		Sıcaklık °C	Zaman Saat	Basınç (MPa)	Makaslama (MPa)	Kalkma (MPa)	
Epilox EK10	Tek bileşenli	180	2	0,1- 0,3	26	0,1	100
Epilox EK26	100:0	180	2	0,1- 0,3	24	0,4	100
Epilox EGK19	100:9	20	24	0 - 0,1	18	0,05	60
Epilox EKS11	100:3	20	24	0 - 0,1	16	0,05	70
Mökoder L5001	1:1	20	48	0 - 0,1	16	0,05	60
Plastephenal	Tek bileşenli	135-165	0,7 0,5	1 – 2	30	0,5	80
Hartgummi beyaz (sert kauçuk esaslı)	Tek bileşenli	140	1	0,01- 0,3	13	0,25	100

Yapıştırıcılar sertleşme sıcaklıklarına göre ve bileşen sayılarına göre de sınıflandırılırlar. Oda sıcaklığında sertleşenlere soğuk yapıştırıcılar (Örneğin tutkal), 200°C a kadar yüksek sıcaklıkta sertleşen yapıştırıcılara ise sıcak yapıştırıcılar denmektedir. İki bileşenli yapıştırıcılarda asıl yapışmayı sağlayan reçine ile katılaşmayı sağlayan ikinci bileşen ayrı kapların içindedir. Bunların, yapıştırma işleminden hemen önce, uygun şekilde ve oranda karıştırılmaları gerekir. Aksi halde yapıştırıcı katılaşmaz. Bunlar genellikle basınç gerektirmez (Tin 2006).

### **2.1.1.1 Yapıştırılacak Malzeme Türüne Göre Sınıflandırma**

Yapıştırıcılar genel anlamda sınıflandırılmış malzemelere göre sınıflandırılması metaller, plastikler ve kauçuklar için yeterli değildir, çünkü malzemelerin her bir sınıfında yapışma özellikleri açısından büyük farklılıklar olabilir. Mesela bakır için uygun olan bir yapıştırıcı, çelik için uygun olmayabilir.

### **2.1.1.2 Fiziksel Özelliklere Göre Sınıflandırma**

Yapıştırıcılar değişik biçimlerde bulunurlar ve her bir uygulama için hangi biçimin kullanılacağı tasarım, montaj, maliyet ve imalat gibi faktörlere bağlıdır. Yapısal bağlantılar için tek bileşenli film yapıştırıcılar artan bir kullanıma sahiptir. Bu tür uygulamalarda katılma için sıcaklık veya sıcaklık/basınç kombinasyonuna gerek duyulur. Genelde film yapıştırıcılar bağlantı boyunca eşit kalınlık sağlarlar. Ayrıca dar alanda bile yapışma, temiz ve basit olarak sağlanır.

### **2.1.1.3 Sertleşme Durumuna Göre Sınıflandırma**

Yapıştırıcılar, katılma olayına göre üç ana grupta sınıflandırabiliriz.

**1. Çözücü esaslı yapıştırıcılar:** Doğal yapıştırıcılar, akrilik, vinil, selüloz gibi sentetik reçineleri; stiren polimerleri ve poliüretan, polikloropren ve nitril kauçuk esaslı polimerleri içerir.

**2. Termoplastik yapıştırıcılar:** Isıtılınca sıvılaşır ve soğutulunca katılaşır. Poliamid, doymuş polyester, polikrilik ve polietilen içerirler. Bu tür yapıştırıcıların çoğu çözücü esaslı yapıştırıcı, olarak da iş görebilirler. Bu sınıfta ayrıca inorganik sementler ve termoset reçineler de örnek verilebilir.



**3. Kimyasal etkenlerle katılaşan yapıştırıcılar:** Genelde yüksek dayanım gerektiren ve zor çalışma şartlarına maruz kalan uygulamalarda kullanılırlar. Bir yapıştırıcının kimyasal olarak kabul edilebilmesi için çekme dayanımının oda sıcaklığında 10 Mpa'ın üzerinde olması istenir. Bu değer keyfi olarak tespit edilmiştir. Kimyasal reaksiyon sonucu katılaşan elastomerleri ve termosetleri içerirler. Oda sıcaklığında sertleşen yani soğuk yapıştırıcılar ve yüksek sıcaklıklarda sertleşen epoksi, fenolik, polyester, poliaromatik, amino vs. diğer sentetik esaslı yapıştırıcılar olarak bulunurlar. Bu tür yapıştırıcılar eritilemezlik ve çözülmezlik özelliklerine sahiptirler. Sıcaklık direnci veya sıyrılma dayanımı gibi özellikleri geliştirmek için oluşturulabilirler (Tin 2006).

#### **2.1.1.4 Yapıştırma Sıcaklığına Göre Sınıflandırma**

Yapıştırma sıcaklığı, yapışmayı sağlamak için yapıştırıcının sahip olması gereken sıcaklıktır. Buna göre yapıştırıcılar şöyle sınıflandırılabilir.

- a) Soğuk yapıştırıcılar: 20° C'ın altında sertleşen yapıştırıcılardır.
- b) Oda sıcaklığında sertleşen yapıştırıcılar: 20-30° C arasında sertleşen yapıştırıcılar.
- c) Ara sıcaklık yapıştırıcıları: 31-100°C arasında sertleşen yapıştırıcılar.
- d) Sıcak yapıştırıcılar: 100°C ve daha yüksek sıcaklıklarda sertleşen yapıştırıcılardır (Tin 2006).

#### **2.1.1.5 Kimyasal Türüne Göre Sınıflandırma**

Yaygın olarak kullanılan yapıştırıcılar aşağıda açıklanmıştır.

- a) Doğal Ürünler: Yapıştırıcılar deri veya kemikten elde edilen hayvani tutkallar nebati olanlara göre daha yüksek bağlantı dayanımına ve nem direncine sahiptirler. Bunlar elle tatbik edilirler ve genellikle ağaç işlerinde kullanılırlar. Kazein tutkalları dayanıklı kontrplak yapımında uzun süredir kullanılmaktadır. Uzun süren hava şartlarına

tahammülleri yoktur, ama çok iyi gözenek doldurma özellikleri vardır ve yapışkan tabakanın kalın olması halinde bile yüksek dayanıma sahiptir.

b) Termoplastikler: Termoplastikler sıcaklıkla yumuşayıp erime özelliklerine sahiptirler ve gerilmelerin etkisiyle akmaya eğilim gösterirler. Zayıf akma dayanımları, bağlantı dizaynlarının modifiye edilmesiyle telafi edilirler. Dolayısıyla bu yapıştırıcıların kullanımı çalışma şartları şiddetli olmayan; metal, ağaç, plastik veya gözenekli malzemelerden oluşmuş; düşük yüke maruz yapılarla sınırlıdır. Bu tür yapıştırıcıların doğal ürünlerden farkı daha yüksek bağlantı dayanımı, nem ve bozulmaya karşı gösterdikleri dirençlerdir.

c) Elastomerler: Elastomerik yapıştırıcılar doğal ve sentetik kauçuk esaslı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Genel olarak elastomerlerin dayanımları çok düşük ama esneklik özellikleri iyidir, çalışma sırasında yüksek gerilimlere maruz kalmayan kağıt, kum ve kauçuk gibi malzemelerin yapıştırılmasında kullanılır. Termoplastik gibi bunlar da ısıyla yumuşar fakat tamamıyla erimezler. Yapışkanlık, dayanıklılık, dayanım ve yapışkan direnci gibi özelliklerde kauçuklar büyük farklar gösterirler. Doğal kauçuk yapıştırıcılar mükemmel yapışkanlık özelliklerine sahiptir. Stirenbutadien yapıştırıcıların doğal kauçuk çeşitleriyle her ne kadar bağlantı dayanımları benzer olsa da ekseriyetle daha iyi yaşlanma özelliği gösterirler. Neopren yapıştırıcılar, hızlı yapışma, dayanım ve sıcaklık direnci bakımından diğer kauçuk yapıştırıcılara nazaran daha üstündür. Bu yapıştırıcılar otomotiv ve ayakkabı endüstrisinde doğal kauçuğun uygun olmadığı durumlarda; plastiklerin, derinin ve metallerin birleştirilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genelde bunlar sıcaklık veya çözücü yoluyla reaktivasyon yapılmaya uygun değildir. Nitril ve neopren yapıştırıcıları en önemli sentetik yapıştırıcılar olarak kabul edilirken diğer elastomerler de belli özellikleri saklanması bakımından önem kazanır. Bu nedenle polibutilen ve silikon kauçuklar basınca duyarlı şeritlerin imalinde kullanılır (Tin 2006).

d) Termosetler: Termoset reçineler sıcaklık veya kimyasal reaksiyon etkisiyle polimerizasyon yoluyla katılaşırlar. Bu gruptakilerin çoğu, her ne kadar bazıları 60°C'in altında faydalı olsa da 200°C'in altında ayrışmazlar. Farklı kimyasal türleri, farklı

sertleşme etkinliklerine gerek duyarlar. Termoset yapıştırıcıların diğer kimyasal gruptakilere nazaran daha kuvvetli bağlantı oluştururlar. Bu nedenle; bazı yapısal uygulamalarda tercih edilirler (Tin 2006).

e) Çifte Polimerler: Termoset reçinelerin elastomerlerle veya termoplastiklerle karıştırılmalarıyla oluşturulurlar. Böylece, karışımın her bir elemanın ayrı ayrı var olan sınırlayıcı özellikleri geliştirilmiş olur. Reçineler elastomerlerle, sıcaklık direncini geliştirmek; termoplastik ve kauçuklar ise, termosetlerle esnekliği arttırmak için karıştırılır, aksi takdirde kırılğan olur. Nitril kauçuklarla modife edilmiş fenolik reçineler, metal-metale yapısal yapıştırıcılar için en önemli bileşimlerdir. Sıvı, film veya toz halinde bulunurlar. Elastomerlerin varlığı yapışkan tabakasına biraz elastikiyet kazandırır. Dolayısıyla daha düşük gerilim dağılımı ve daha iyi yorulma direnci sağlanır. Fenolik bileşenlerin polimerizasyonu sonucu oluşan sulu yan ürünlerin etkilerini yenmek için 0,7 MPa derecesinde yüksek yapışkan basınçlarına gerek duyulur (Tin 2006).

Uygun yapıştırıcının seçiminde yapıştırılan parçaların malzemesi, şekli ve boyutları, yükleme şekli (dinamik, statik), maruz kaldığı gerilmeler (kesme, çekme, basma, sıyırma), kullanma sıcaklığı ve kimyevi etkilere maruz kalıp kalmama gibi faktörler göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Minez 2000).

### **2.1.2 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları**

Yapıştırma, diğer çözülmeyen bağlantı elemanlarını tamamlayıcı olmak üzere:

a) Diğer malzeme birleştirme yöntemlerinde (kaynak lehim gibi) ısıl etkisi nedeniyle meydana gelen kusurlar (molekül yapısındaki değişmeler, gerilme birikimleri, mukavemet azalması, çekmeler ve çarpılmalar gibi) burada yoktur.

b) Diğer bağlama elemanları ile birleştirilmesi olanaksız olan ince parçaların bu yolla birleştirilmesi sağlanır.

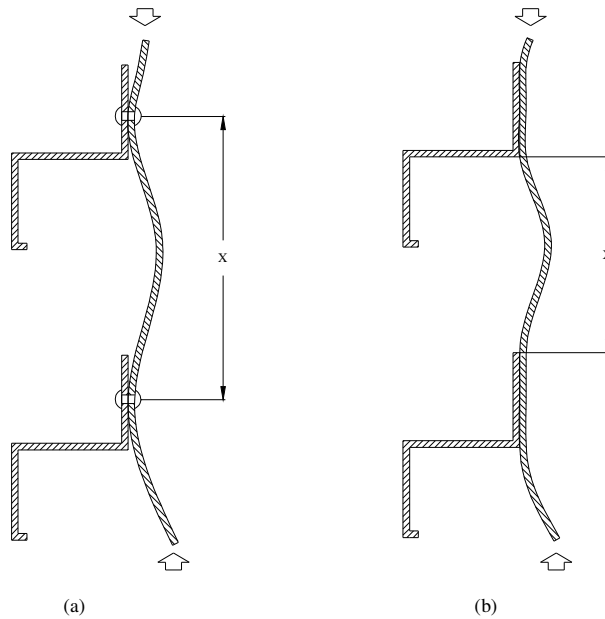
c) Bağlantı yapılırken büyük bir ısı ve basınç etkisine ihtiyaç yoktur. Dolayısıyla bağlanan parçalar kendi özelliklerini muhafaza ederler.

d) Değişik malzeme türlerinin özellikle metallere metal olmayan malzemelerin, birleştirilmesinde uygun bir bağlayıcıdır.

e) Yapıştırıcı maddelerin düşük mukavemette olması nedeniyle büyük yapıştırma yüzeylerine gereksinim vardır.

f) Bağlantının ısıya karşı mukavemeti düşüktür. Bu nedenle yapıştırma bağlantılarının işletme sıcaklığı en çok 100°C olmalıdır (Cürgül 1990).

g) Sürekli birleşme burkulma özelliğini azaltıcı etki yapar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Perçin ve yapıştırma bağlantısındaki yük dağılımı

(a) Perçin bağlantısındaki burkulma boyu (b) Yapıştırma bağlantısındaki burkulma boyu (Anık vd.1993).

Ayrıca sızdırmaz bir bağlantı yapmak, uygun olmayan diğer bağlantıların yerini tutmak, tamamen yeni konstrüksiyonlar yapabilmek için kullanılır. Yapıştırma bağlantıları tipik ince saç konstrüksiyonların gerektiği yerler için uygundur. Termik ve mekanik zorlanmalara karşı hassas olan malzemeler (ıslah edilmiş ve sertleştirilmiş çelikler, hafif metaller) yapıştırma yoluyla iyi bir şekilde birleştirilebilirler. Aşınma malzemeleri (fren ve debriyaj balataları gibi) bir çok hallerde yapıştırma yolu ile daha iyi ve daha

ekonomik bir şekilde birleştirmek m¼mk¼nd¼r (Tin 2006). Yapıştırma metodu, seri imalat maksadıyla kullanılmak için daha uygundur. Zira gerekli aparatların amortismanı ancak bu şekilde m¼mk¼n olur (Gediktaş 1995).

### 2.1.3 Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları

Yapıştırma bağlantılarının yukarıda sayılan avantajlarını yanında dezavantajları da vardır. Bunlar;

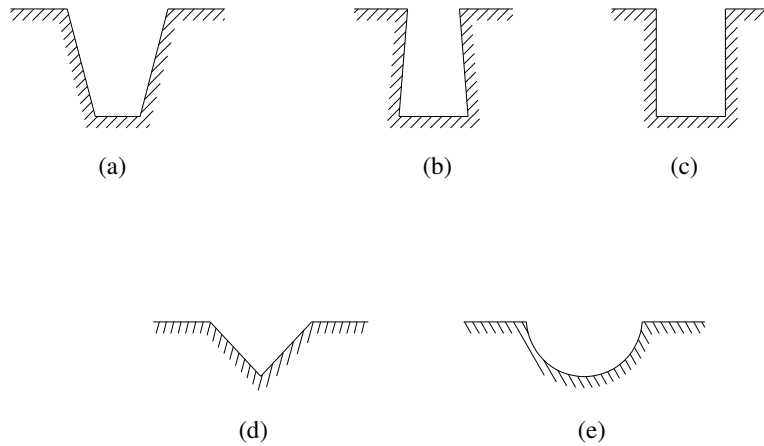
- En b¼y¼k dezavantajı sıcaklığın etkisidir. Yapıştırma bağlantılarının kullanıldıkları yerlerde işletme sıcaklığı sınırlıdır. Lehim ve kaynak bağlantılarına g¼re daha azdır.
- Yapıştırılacak y¼zeylerin hazırlanması zaman alır.
- Yapıştırma işlemi esnasında y¼zeyler tamamıyla yapıştırıcı ile kaplanmayabilir, bu da etkili yapıştırma alanının azalmasına neden olarak mukavemeti d¼ř¼r¼r.
- Bazı yapıştırıcılar neme ve kimyasal ortamlara karşı hassastırlar. B¼yle ortamlarda bulunmaları durumunda zamanla mukavemetlerinde azalma meydana gelmektedir.
- Yapıştırma bağlantıları uzun zaman sonra ancak kullanılabilirler.
- Farklı ısıl genleşmelerden dolayı oluşan sıyrılma ve çekme-makaslama dayanımı minimuma indirmek için bağlantı dizaynı ¼zenle yapılmalıdır.
- Perçinli, kaynaklı ve lehimli bağlantılar y¼ksek sıcaklıklarda kullanılmasına rağmen yapıştırma bağlantılarının y¼ksek sıcaklıklarda kullanılmasında sınırlamalar vardır.
- Yanlış bir yapıştırma bazen d¼zeltilemez.
- Bazı uygulamalarda ¼n hazırlık ¼alıřmaları ek iş ve maliyet y¼k¼ getirmektedir.
- Genelde zor ¼alıřma şartlarında uzun s¼re dayanıp dayanamayacağı bilinmez. Ayrıca yapıştırma bağlantılarının tamir için s¼k¼lmesi zordur.
- Yanma veya zehirlenme gibi tehlikeler, ¼z¼c¼ esaslı yapıştırıcıların kullanılması durumunda ortaya ¼ıkabilir (Minez 2000).

## 2.1.4 Yapıştırma İşlemi

### 2.1.4.1 Yapıştırma Yüzeyinin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantısının mukavemetinin yüksek olması için yapıştırılacak yüzeylere uygun pürüz veya çentik açılarak hazırlanmalıdır. Böylelikle yapıştırma bağlantısında Adhezyon kuvvetleri ve yüzey pürüzlülükleri kuvvet iletilmesinde etkili olan en önemli faktör olmakla birlikte çok defa yapıştırıcının kendi mukavemetinden daha büyük çıkmaktadır. İyi hazırlanmış yapıştırma bağlantılarında kopma yapıştırıcı ile malzeme arasından değil, bizzat yapıştırıcı madde de ortaya çıkar. Moleküler kuvvetlerin etkili olabilmesi yapıştırma yüzeylerinin temiz ve yabancı maddelerden arınmış olması ile mümkündür. Genellikle cisimlerin yüzeyleri adsorbe edilmiş gaz ve kimyevi buharların moleküllerini ihtiva ederler. Metallerde ise çok defa ince bir oksit tabakası da mevcuttur. Bundan başka imalat metodu, depolama ve transport şartlarına bağlı olarak ta yağ, kir ve benzeri maddeler yüzeylere yapışır.

Yüzey pürüzlülüğü de yapıştırma bağlantılarının mukavemetine önemli derecede etki eder. Yapıştırıcının pürüzler arasına girip sertleşmesi bir şekil bağı meydana getirir. Bu sebepten yapıştırılacak yüzeylerin çok parlak olmaması gerekir, (ancak pürüzlerin mukavemete ne derecede etkili olduğunu tayin etmek zordur).



Şekil 2.3 Yüzey pürüz formları

(a) pirizmatik, (b) konik, (c) silindirik, (d) V, (e) küresel (Anık vd.1993).

Yapıştırma bağlantısının kalitesi açısından 3 ile 10 µm pürüz derinlikten önerilmektedir. Yapıştırıcının türü boşlukları kaplaması ve tutması açısından pürüz formu da önem taşır (Şekil 2.3). En çok karşılaşılan ve yapışma açısından en uygun pürüz formu V tipi pürüzdür. Yüzeyi kirlilerden ve pisliklerden arındırma ve uygun şekilde pürüzlendirme, iyi bir yapışma mukavemeti için gereklidir. Bunun içinde birleştirilecek parçalara yüzey ön işleme uygulanır.

Yapıştırılacak yüzeylerin yağdan iyice temizlenmesi bir çok hallerde kafi gelir. Ancak yüzeylerde oksit tabakası da varsa ve bu tabaka Al alaşımlarında olduğu gibi ana malzemeye sağlam bir şekilde bağlı değilse bunun da giderilmesi gerekir. Galvanik kaplama tabakalarının (galvaniz edilmiş veya kadmiyum kaplanmış yüzeyler) ve varsa boya ve lak tabakalarının da temizlenmesi icap eder. Eloksal yapılmış alüminyum yüzeylerde (anodik oksidasyon) oksit tabakasının uzaklaştırılmasına lüzum yoktur (Gediktaş 1995).

#### **2.1.4.2 Ön Hazırlık Çalışmaları**

Moleküler kuvvetlerin büyüklüğü yüzeylerin temiz ve yabancı maddelerden arındırılmış olmasına bağlıdır. Bu amaçla sırasıyla yağın giderilmesi, yüzeyin pürüzlendirilmesi (zımpara vs diş açma) yüzeyin yıkanması ve kurutulması işlemleri yapılır. Yağ giderici olarak en fazla aseton, benzin, benzol, mazot triklor etilen, perkloretilen, karbon tetraklorür ve alkali esaslı temizleyicilerin sudaki eriyikleri kullanılır. Yağ ve diğer kirlilik unsurları alındıktan sonra parçalar soğuk su ile yıkanıp sıcak hava ile kurutulur. Kurutulmuş parçaların bekletilmeden yapıştırılmaları gerekir (Bozacı 2000).

Ön hazırlık çalışmaları:

- Yağın giderilmesi
- Yüzeyin pürüzlendirilmesi (zımparalama ve benzeri işlem)
- Yüzeyin temizlenmesi

- Yüzeyin kurutulması kademelerinden meydana gelir.

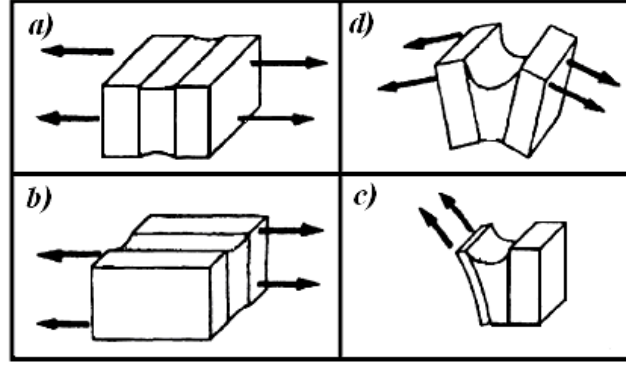
Yağı ve diğer pislikleri almak için yüzeyler önce kaba olarak temizlenmeli sonra ayrı bir kaptaki (fazla kirlenmemiş eriyikle) ikinci bir defa daha yıkanmalıdır. Yüzeylerin pürüzlendirilmesi zımparalama veya kum püskürtme ile yapılabilir. Tane büyüklüğü 100 (0 veya 2-0) veya biraz daha ince olan zımpara kağıdı kullanılmalı ve yüzey, zımpara izleri çeşitli yönlerde olacak şekilde hazırlanmalıdır. Kum püskürtme yapılıyorsa ince kum kullanılmalıdır. Pürüzlendirilen yüzeyler mümkünse hemen yapıştırılmalıdır. Bu şekilde hazırlanmış yüzeylerin yağ giderme vs. için yeniden yıkanması mukavemet üzerine bir etki yapmaz. Buna karşılık çok defa, dikkat edilmezse yüzey bu arada yeniden kirlenebilir. Yüzeylerine ikinci bir metal tabakası yapıştırılmış malzemelerde (Al alaşımlarında olduğu gibi) ince olan kaplama tabakasının zarar görmemesi, yüksek mukavemetli hafif metal alaşımlarında da çentik etkisi sebebiyle zımparalama veya kum püskürtme yapılmaz. Bu gibi hallerde yüzeyler çelik veya alüminyum yünü ile ovulup temizlenir.

Yüzey yağının bir kimyevi madde ile alınmasından sonra parçalar genellikle soğuk su ile iyice çalkalanarak yıkanır ve yüzeylerdeki artıklar giderilir, sonra çeşitli kimyevi maddelerle (çok sulu asit veya alkali banyoları gibi) ikinci bir işleme daha tabi tutulur. Bundan sonra bol su içinde tekrar iyice yıkanır. Böylece yüzeylerde herhangi bir temizleyici madde artığı da kalmaması sağlanır. Bu şekilde hazırlanmış yüzeyler temiz bir yerde genellikle sıcak hava ile kurutulur. Bundan sonra yapıştırma işlemine geçilir. Temizlenmiş ve kurutulmuş parçaların uzun süre özellikle rutubetli yerlerde bırakılması, teşekkül edebilecek oksit tabakalarından ötürü bağlantının mukavemetine olumsuz yönde etki yapar (Gediktaş 1995).

#### **2.1.4.3 Yapıştırma Bağlantılarına Etki Eden Kuvvetler**

Yapıştırma bağlantıları, mümkün olduğu kadar kayma gerilmelerine maruz kalacak tarzda şekillendirilmelidir. Çekme gerilmeleri bu bağlantı şekli için uygun bir zorlama değildir. Şekil 2.4’de yapıştırma bağlantılarının maruz kaldığı kuvvetler gösterilmiştir.





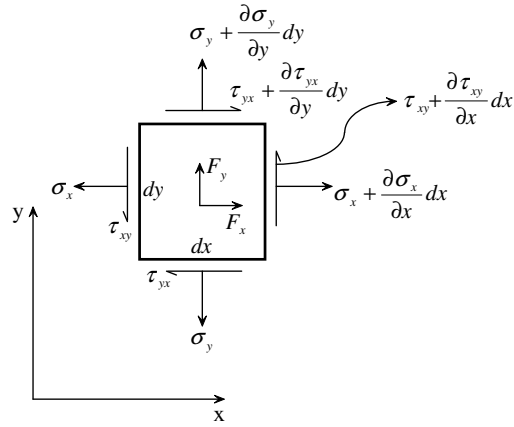
Şekil 2.4 Yapıştırma bağlantılarında farklı kuvvet uygulamaları (Rende 2000).

- a) Çekme gerilmesi; yapıştırıcının çekme mukavemeti az olduğundan dolayı, mümkünse önlenmelidir.
- b) Kesme gerilmesi; yapıştırma bağlantıları için uygundur.
- c) Ayrılma; kuvvetler tek taraflı etki ettiğinden önlenmelidir.
- d) Ayırma; bu da uygun olmadığından dolayı önlenmelidir (Rende 2000).

## 2.2 Gerilme Analizi Kriterleri

### 2.2.1 Koordinat Sistemindeki Gerilme İlişkileri

Üzerinde inceleme yaptığımız yapıştırma bağlantılarının çözümünün gerçekleştirilmesi için bazı kabuller yapıp, elastisite teorisindeki gerilme ilişkileri ve koordinat sistemleri ile incelememiz gerekir. Burada  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{yx}$  ve  $\tau_{xy}$  gerilmeleri  $z$ 'den bağımsız  $x$  ve  $y$ 'nin birer fonksiyonu olan gerilmelerdir. Burada  $x$  ve  $y$  koordinatlarında birim hacme düşen kuvvetleri  $F_x$  ve  $F_y$  olarak tanımlanmaktadır. Problem iki boyutlu olduğu için  $z$  yönündeki kuvvet dağılımı  $F_z=0$  olarak belirlenir.



Şekil 2.5 Kartezyen koordinatlarda gerilme elemanı (Ucun 2005).

Şekil 2.5’de gösterilen iki boyutlu gerilme elemanındaki gerilme değişimi kısaltılmış Taylor eşitliği ile,

$$\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \quad (2.1)$$

yazılabilir.  $\sigma_x$ , x ve y’nin fonksiyonu olduğu için kısmi türev ile belirtilmiştir. Bu ilişkiyi diğer gerilme durumları içinde belirtebiliriz.

Yukarıdaki eşitlikle birlikte birim kalınlıktaki bir elemanın denge durumunu yazacak olursak,

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dx dy \right) \frac{dx}{2} - \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx dy \right) \frac{dy}{2} + \left( \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) dx dy \\ & - \left( \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dy + F_y dx dy \frac{dx}{2} - F_x dx dy \frac{dy}{2} = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

dır. Bu çözümde moment z’ye göre sıfır kabul edilmiştir.  $\sum F_x = 0$  ifadesi ile x yönündeki kuvvetlerden denge durumu ise,

$$\left( \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dy - \sigma_x dy + \left( \tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx - \tau_{xy} dx + F_x dx dy = 0 \quad (2.3)$$

şeklinde yazabiliriz. Bazı kısaltmalarla,

$$\left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x \right) dx dy = 0 \quad (2.4)$$

yazılabilir. Benzer eşitlik y için yazıldığında,

$$\left( \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y \right) dx dy = 0 \quad (2.5)$$

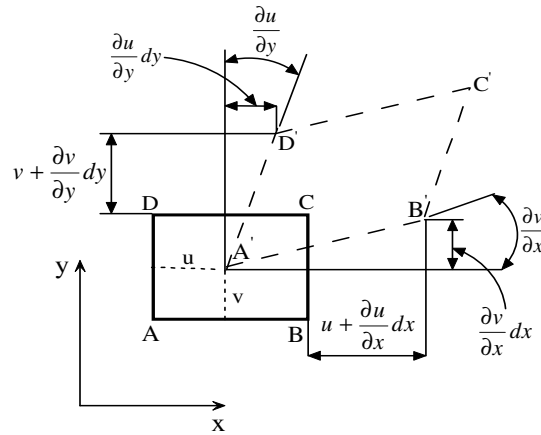
elde edilir. Bu çözümlerle birlikte iki boyutlu bir gerilme elemanı için x ve y yönlerindeki diferansiyel eşitlikler,

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y = 0 \quad (2.7)$$

ile ifade edilir. Eşitlik (2.6) ve (2.7) x ve y yönlerindeki gerilme durumlarını göstermektedir (Ucun 2005, Tin 2006).

### 2.2.2 Gerilme Şekil Değiştirme İlişkileri



Şekil 2.6 İki boyutlu elemanda şekil değiştirme ilişkisi (Topçu vd. 1998).

Şekil 2.6'da gösterilen u ve v deplasmanları ile x ve y yönündeki şekil değiştirme ifadeleri,

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}\tag{2.8}$$

yazılır. Bununla birlikte x ve y yönündeki kayma şekil değiştirme ifadesi,

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\tag{2.9}$$

olarak yazılabilir. Kayma şekil değiştirme ifadesini  $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$  olarak ifade edilebilir. Lineer ve elastik davranış gösteren malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağlantısını Hooke kanunu ile çıkarılabilir. Hooke kanununa göre x yönündeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi,

$$\{\sigma\} = [Q]\{\varepsilon\}\tag{2.10}$$

vektörel biçimde gösterilir. Gerilme ilişkisini vektörel biçimde gösterecek olursak,

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}\tag{2.11}$$

ile ifade edilir. Şekil değiştirme ilişkisini ise,

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}\tag{2.12}$$

ile gösterilir. Burada  $[Q]$  elastisite matrisi olup düzlem gerilme durumu için,

$$[Q] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilir (Topçu ve Taşgetiren 1998).

### 2.2.3 Eşdeğer Gerilme (Von Mises)

Eşdeğer gerilme, çekme deneyinde akma sınırındaki çarpılma enerjisinin, kabul edilen gerilme durumundaki çarpılma enerjisine eşit olması durumunu gösterir. Çekme işleminde çarpılma enerjisi ifadesinde akma gerilmesi yerine  $\sigma_e$  yazılarak göz önüne alınan gerilme durumuna ait çarpılma enerjisine eşitlendikten sonra elde edilen  $\sigma_e$  ifadesi eş değer gerilme olarak adlandırılır.

Von Mises gerilmesi 1904'te Huber, 1913'te Von Mises ve 1925'te Hencky tarafından geliştirilerek kullandığımız halini almıştır. Bu teori herhangi bir yüzey üzerinde bulunan gerilmeleri ya da yapıda meydana gelen hataları basit bir gerilim testi ile ilişkilendirir. Denklem (2.14) bu ilişkinin formüle edilmiş halidir.

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) = 2\sigma_{yp}^2 \quad (2.14)$$

yada başlıca şartlardaki asal gerilme,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_{yp}^2 \quad (2.15)$$

düzlem gerilme durumunda  $\sigma_3 = 0$  ve bu durum için kritik eşdeğer gerilmesi,

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_{yp}^2 \quad (2.16)$$

olur. Ya da alternatif olarak,

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{yp}}\right) - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{yp}}\right)\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) = 1 \quad (2.17)$$

olur. İki boyutlu durumdaki eşdeğer (Von Mises) gerilmesi,

$$\sigma_e = (\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (2.18)$$

olarak kullanılır (Tin 2006).

### 3. MATERYAL VE METOD

#### 3.1 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu 1920'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmış olmakla beraber bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle ancak 1960'lı yıllardan itibaren geniş bir kullanım alanı bulabilmiştir. Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt yapılara ayrılarak her birinin kendi içinde çözümlenmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: ilk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problem çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramlarını kullanarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır (Tin 2006).

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede olan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamında alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait olan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir.

Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarın sanayiye girmesi ile bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok makine elemanının (motor blokları, pistonlar vs.) kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi

mümkün olabilmektedir. Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik metotlardan üstün kılan başlıca unsurlar şöyle sıralanabilir:

- a) Kullanılan sonlu eleman boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- b) Bir veya birden çok delik ve köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- c) Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler kolaylıkla incelenebilir.
- d) Sebep sonuç ilişkisine ait problemler, genel direngenlik matrisi ile birbirine bağlanan genelleştirilmiş kuvvetler ve yer değiştirmeler cinsinden formüle edilebilir. Sonlu elemanlar metodunun bu özelliği problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini hem mümkün kılar hem de basitleştirir.
- e) Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

Bu faydaları nedeni ile sonlu eleman analizi gerçekleştirmek bazı paket programlar geliştirilmiştir. Bunlara Ansys, Nastran, Franc gibi programlar verilebilir. Bu programlar sayesinde elde edilen sonuçlara göre dizayn ve düzeltme işleri daha sağlıklı bir şekilde yapılır hale gelmiştir (Topçu vd. 1998)

### **3.2 Franc Programı**

Franc programı sonlu elemanlar metodunu kullanarak sistemlerin çözümünün elde edildiği bir programdır. Franc programı Casca programı ile birlikte kullanılmaktadır. Çünkü sistemin çözüm için gerekli olan sonlu elemanlar modeli Casca'da oluşturulmaktadır. Burada oluşturulan model Franc programında açılarak çözüm işlemine geçilmektedir.

Franc programında analiz yapabilmek için kısaca şu işlemler takip edilmelidir.

- a) İlk olarak, Casca programı açılır ve burada çözümü gerçekleştirecek modelin geometrisi oluşturulur.
- b) Çizilen geometride bulunan malzeme özellikleri girilir ve bu özellikler atanır.
- c) Model daha önceden belirlenmiş alt bölümlere ayrılır.
- d) Ayrılan bu alt bölümlerdeki düğüm sayıları seçilir ve uygulanır.



- e) Daha sonra eleman tipi seçilerek mesh (ağılı yapı) oluşturulur.
- f) Casca programı .inp formatında kaydedilen meshli sonlu elemanlar modeli Franc'da açılır.
- g) Franc'da sınır şartları, sisteme gelecek kuvvetler ve analiz tipi belirlenir ve çözüm gerçekleştirilir.
- h) Elde edilen sonuçlar gerilme dağılımı ve grafik olarak incelenebilir (Tin 2006).

### 3.3 İki Boyutlu Problem

Sonlu elemanlar metodunun esas prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerinin içeren denklemlerin çıkartılıp tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirilerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir.

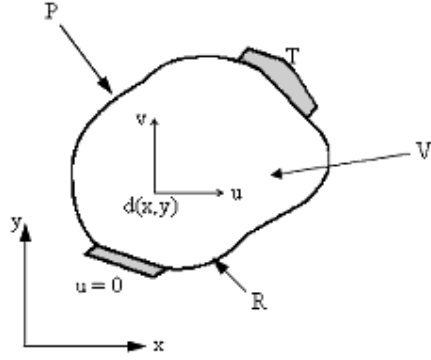
Yer değiştirme, yüzey kuvvetleri, yayılı kütle kuvvetleri ve tekil kuvvet bileşenleri (x,y) ile verilen koordinatın fonksiyonlarıdır. Yer değiştirme vektörü {u},

$$\{u\} = [u, v]^T \quad (3.1)$$

şeklinde verilir. Burada u ve v, deplasman vektörünün x,y doğrultularındaki bileşenleridir. Gerilme ve şekil değiştirme bileşenleri ise,

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \lambda_{xy}]^T \quad (3.2)$$

şeklinde olup  $\sigma$  gerilme,  $\varepsilon$  ise birim şekil değiştirmedir. Şekil 3.1'de genel olarak gösterilen iki boyutlu problemdeki kütle kuvveti, yüzey kuvvet vektörü ve diferansiyel hacim,



d noktasında kalınlık = t

d noktasında kütle kuvveti bileşenleri =  $f_x, f_y$

Şekil 3.1 İki boyutlu problem (Topçu vd. 1998).

$$\text{Kuvvet} \quad \{f\} = [f_x, f_y] \quad (3.3)$$

$$\text{Kütle} \quad \{T\} = [T_x, T_y] \quad (3.4)$$

$$\text{Hacim} \quad dV = t \cdot dA \quad (3.5)$$

'dır. Burada  $f$  kütle kuvveti,  $T$  yüzey kuvveti,  $dV$  diferansiyel hacim,  $t$  ise  $z$  yönündeki kalınlıktır. Kütle kuvveti birim hacme düşen kuvvet, yüzey kuvveti ise birim yüzey alanına düşen kuvvet olarak alınır. Şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkisi,

$$\{\varepsilon\} = \left[ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{dv}{dy}, \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (3.6)$$

olarak verilir. Gerilmeler ve şekil değiştirme arasındaki ilişki ise,

$$\{\sigma\} = [D], \{\varepsilon\} \quad (3.7)$$

olarak verilir. Burada D elastisite matrisi olup problemin düzlem şekil değiştirme veya düzlem gerilme olmasına göre değişiklik göstermektedir.

### 3.4 İzoparametrik Eleman

İzoparametrik elemanlar sonlu elemanlar ile problem çözümü sırasında kullanılan ve geniş bir kullanım alanı bulmuş ve deneysel verilere oldukça iyi uyum sağlayan bir elemandır.

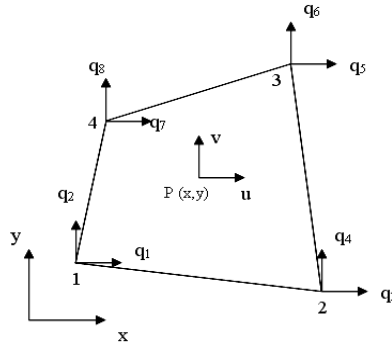
Şekil 3.2’de dört düğümlü dörtgen eleman verilmiştir. Lokal düğüm numaraları saat ibresinin ters yönünde 1, 2, 3, 4 şeklinde verilmiş olup ve düğüm koordinatları,  $i$  düğümü için  $(x_i, y_i)$ ’dir. Düğüm deplasman vektörü,

$$\{q\} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8]^T \quad (3.8)$$

’dir. Eleman içindeki P noktasının deplasmanları ise,

$$\{u\} = [u(x, y), v(x, y)]^T \quad (3.9)$$

şeklindedir.



Şekil 3.2 Dört düğümlü dörtgen eleman (Topçu vd.1998).

Şekil fonksiyonları öncelikle doğal koordinatlardaki bir temel eleman üzerinde geliştirilir. Temel eleman  $(r,s)$  doğal koordinatlardaki düzgün bir kare olarak tanımlanabilir (Şekil 3.3). Langrange şekil fonksiyonları  $i= 1, 2, 3, 4$  olarak düğüm numaraları olmak üzere  $N_i$  şeklinde gösterilir. Her şekil fonksiyonu tanımlı olduğu düğümde 1 diğer düğümde ise sıfırdır. Örnek olarak;

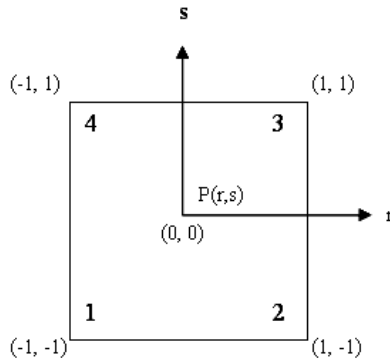
1. düğümde  $N_1 = 1,$

2, 3 ve 4. düğümde;  $N_1 = 0$

olarak kısaca gösterilebilir. Buna göre  $N_1$ ,  $r = 1$  ve  $s = 1$  kenarları boyunca sıfır olmak zorundadır. Bu da

$$N_1 = c(1-r)(1-s) \quad (3.10)$$

formunda bir eşitlik verir. Buradaki sabit  $c$  katsayısı 1 düğümünde  $N_1 = 1$  olması şartından bulunur.



Şekil 3.3 Doğal koordinatlardaki temel eleman (Topçu vd. 1998).

Bu durumda 1 düğümünde  $r = s = -1$  olduğundan;

$$1 = c(2)(2) \quad (3.11)$$

olur. Buradan  $c = 1/4$  olarak elde edilir. Böylece 1 düğümündeki şekil fonksiyonu

$$N = \frac{1}{4}(1-r)(1-s) \quad (3.12)$$

olarak elde edilir. Diğer düğümler için de benzer yoldan  $N_2 = \frac{1}{4}(1+r)(1-s)$ ,

$N_3 = \frac{1}{4}(1+r)(1+s)$ ,  $N_4 = \frac{1}{4}(1-r)(1+s)$  olarak bulunur. Bilgisayar uygulamasında

kolaylık sağlaması açısından şekil fonksiyonları  $r_i$  ve  $s_i$  ilgili düğümün doğal koordinatlardaki yerini vermek üzere, kısa gösterimde

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + rr_i)(1 + ss_i) \quad (\text{şekil fonksiyonu}) \quad (3.13)$$

olarak yazılabilir. Eleman içinde herhangi bir noktanın yer değiştirmeleri şekil fonksiyonunun yardımı ile,

$$u = N_1q_1 + N_2q_3 + N_3q_5 + N_4q_7 \quad (3.14)$$

$$v = N_1q_2 + N_2q_4 + N_3q_6 + N_4q_8 \quad (3.15)$$

olarak yazılabilir. Matris formunda ise,

$$\{u\} = [N]\{q\} \quad (3.16)$$

'dır. Burada [N] şekil değiştirme fonksiyonları matrisi olup,

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

şeklindedir. İzoparametrik formülasyon da koordinatlar da aynı şekil fonksiyonları ile gösterilebildiğinden, eleman içinde herhangi bir noktanın koordinatı,

$$x = N_1x_1 + N_2x_2 + N_3x_3 + N_4x_4 \quad (3.18)$$

$$y = N_1y_1 + N_2y_2 + N_3y_3 + N_4y_4 \quad (3.19)$$

olarak yazılır. Bundan sonra şekil değiştirmelerin hesabına geçilir. Bunun için  $r, s$  koordinatlarında verilen şekil fonksiyonlarının  $x, y$  koordinatlarındaki türevlerine ihtiyaç vardır. Buradan zincir kuralı ile herhangi bir

$f = f[x(r, s), y(r, s)]$  fonksiyonu için;

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \quad \frac{\partial f}{\partial s} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \quad (3.20)$$

yazılır. Matris notasyonu ile  $J$  jakobiyen matrisi olmak üzere,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial r} \\ \frac{\partial f}{\partial s} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

yazılır. Jakobiyen matrisi ise

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

şeklindedir. Buradan

$$J = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-s)x_1 + (1-s)x_2 + (1+s)x_3 - (1+s)x_4 & -(1-s)y_1 + (1+s)y_2 + (1+s)y_3 - (1+s)y_4 \\ -(1-r)x_1 - (1+r)x_2 + (1+r)x_3 + (1-r)x_4 & -(1-r)y_1 - ((1+r)y_2 + (1+r)y_3 + (1-r)y_4) \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

elde edilir.  $f$  fonksiyonu yerine şekil fonksiyonlarını yazarsak

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.24)$$

olur. Şekil fonksiyonlarının  $x$  ve  $y$ 'ye göre türevi gerektiğinden bu eşitliğin tersi alınarak,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

yazılır. Buda,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

şeklinde ifade edilebilir. Diğer taraftan birçok matematik analiz kitabında verildiği üzere doğal koordinatlardaki alan arasında;

$$dA = dx dy = \det J dr ds \quad (3.27)$$

şeklinde verilen bir ilişki vardır. Bu ilişki eleman rijitlik matrisi hesaplarında sıklıkla kullanılacaktır (Topçu vd.1998).

### 3.5 Eleman Rijitlik Matrisi

Dörtgen elemanlar için rijitlik matrisi elastik enerji ifadesinden hareketle elde edilebilir. Bu eşitlik,

$$U = \int_v \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\epsilon\} dV \quad (3.28)$$

şeklindedir. Kalınlık sabit alınır ve eleman boyutunda yazılırsa,

$$U = \sum_e t_e \int_e \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\epsilon\} dA \quad (3.28)$$

olur. Şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkisi ise,

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

şeklindedir. Buradan  $f = u$  alınırsa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

olur, aynı şekilde  $v$  için de,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

yazılır. (3.29) (3.30) ve (3.31) eşitliklerinden,

$$\{\varepsilon\} = [A] \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \\ \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (3.32)$$

elde edilir. Burada  $[A]$ ,

$$[A] = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_{21} & J_{11} \\ -J_{21} & J_{11} & J_{22} & -J_{12} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

'dır. Bu durumda yer değiştirmelerin şekil fonksiyonları cinsinden yazıldığında,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \\ \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} = [G] \{q\} \quad (3.34)$$



yazılabilir ki burada  $[G]$

$$[G] = \frac{1}{4} \begin{vmatrix} -(1-s) & 0 & (1-s) & 0 & (1+s) & 0 & -(1+s) & 0 \\ -(1-r) & 0 & -(1+r) & 0 & (1+r) & 0 & (1-r) & 0 \\ 0 & -(1-s) & 0 & (1-s) & 0 & (1+s) & 0 & -(1+s) \\ 0 & -(1-r) & 0 & -(1+r) & 0 & (1+r) & 0 & (1-r) \end{vmatrix} \quad (3.35)$$

şeklinde elde edilir. Şekil değiştirme ve yer değiştirmeler matris formunda  $\{\varepsilon\} = [B]\{q\}$  olarak verildiğinden (3.32) ve (3.34)'den  $[B] = [A][G]$  olarak elde edilir. Diğer taraftan  $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$  olduğundan eleman içindeki gerilmeler,

$$\{\sigma\} = [D][B]\{q\} \quad (3.36)$$

olur. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi ifadesini,

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \{q\}^T \left[ \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det J dr ds \right] \{q\} \quad (3.37)$$

şeklinde yazılabilir. Bu da,

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \{q\}^T [k]_e \{q\} \quad (3.38)$$

olup eleman rijitlik matrisi olan  $[k]_e$ ,

$$[k]_e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det J dr ds \quad (3.39)$$

şeklinindedir. Eleman rijitlik matrisi  $(8 \times 8)$  boyutundadır.  $[B]$  ve  $[J]$ ;  $r$  ve  $s$ 'ye bağlı olduklarından gerekli integraller nümerik olarak yapılacaktır (Topçu vd. 1998).

### 3.6 Yapıştırma Bağlantısının Geometrik Modeli

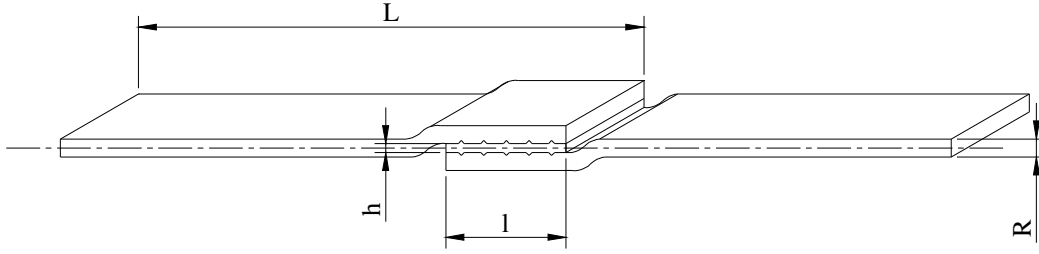
Yapıştırma bağlantılarının tasarımında nümerik modelleme olarak sonlu elemanlar metodu genişçe kullanılmaktadır. Birleşme bölgesi çok karmaşık ve çok farklı malzemelerden oluşan birleşmelerin nümerik inceleme teknikleri ile incelenmesinde

matematiksel olarak gerçek çözümlerinin bulunmasında bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu matematiksel zorlukların bazıları teorik olarak sonsuz gerilmeler ve sınır şartlarının belirlenme zorluğudur.

Nümerik yöntemler; karmaşık yüklere, geometrilere, malzeme özelliklerine ve sınır şartlarına sahip yapılaşma biçimlerine uygulanabilmektedir. Bununla beraber nümerik çözümler, gerçek çözümler için sadece birer yaklaşımdır. Gerçek çözümler ile bu yaklaşık çözümler arasındaki doğruluğun derecesi çözülecek problemin karmaşıklığına bağlıdır. Bu yüzden analizi yapan kişinin nümerik teknikleri kullanmanın kısıtlamalarını, analiz edilecek yapının maruz kaldığı gerilme tipini ve birleşmedeki tekil noktaların yerini çok iyi bilmesi gerekir. Nümerik olarak analiz edilecek bölge, çeşitli geometrik şekillere sahip küçük parçalara bölünür. Bu parçalara analiz elemanı denir. Bu analiz elemanları üçgen, dikdörtgen, paralel kenar ya da yamuk şeklinde olabilir. Analiz elemanlarının seçimi, analiz edilecek bölgenin yapısına bağlıdır. Bu küçük analiz elemanları yapı üzerinde bir araya gelerek ağ biçiminde oluşurlar. Bu ağın kesişim noktalarına, düğüm adı verilir. Şekil üzerinde oluşan bu düğümler, analiz elemanlarının birbirleri ile ilişkisini sağlar. İncelenecek bölge üzerindeki düzgün sürekli parçalama fonksiyonları bilinmeyen nitelikleri tahmin etmek için kullanılır.

Çok karmaşık geometriye sahip birleşmelerin gerilme analizi için, sonlu elemanlar yöntemi çok iyi sonuç verir. Nümerik inceleme yönteminin bir başka özelliği de farklı malzemelerden oluşan birleşmelerde analiz için en uygun metot olmasıdır.

Bu çalışmada, iki bileşenli yapıştırıcılarla birleştirilmiş malzemelerin; çentik tipi, çentik sayısı ve yapıştırıcı kalınlıklarına bağlı olarak çekme mukavemetleri incelenmiştir. Öncelikle Casca programı kullanılarak malzemenin geometrik modeli oluşturulur. Malzemenin geometrik modeli; yapıştırılacak olan kısım (l), yapıştırma bağlantısının daha kuvvetli olması için V ve U tipi, derinlikleri 250µm olan çentikler açılır. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi çözümün daha doğru sonuçlar vermesi için yapıştırılacak levhaların eksenleri ile yapıştırıcının eksenini aynı düzlem üzerine gelecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi L levha uzunluğu (100 mm), l yapıştırma boyu (30 mm), R levha kalınlığı (2 mm), h yapıştırıcı kalınlığını (0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5mm) olarak alınmıştır.



Şekil 3.4 Yapıştırma bağlantısının geometrik modeli (çentik tipi V, çentik sayısı 5)

### 3.7 Yapıştırıcının ve Yapıştırılacak Malzemenin Özellikleri

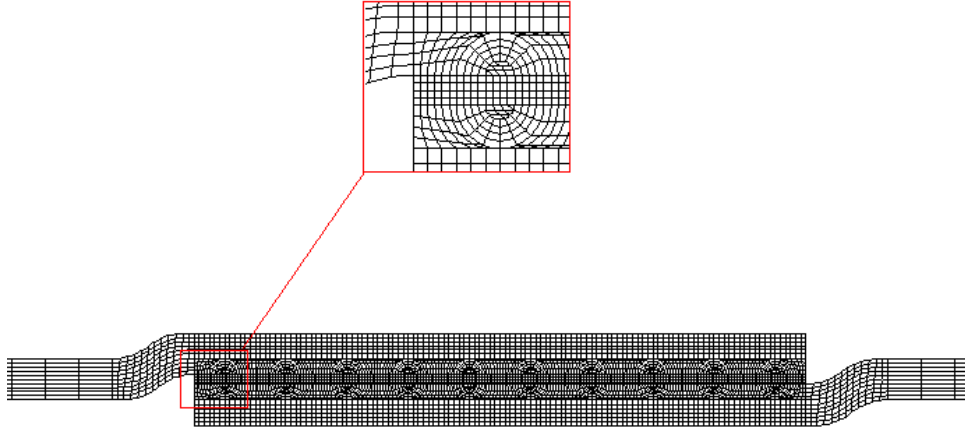
Casca programında geometrik model oluşturulduktan sonra, analiz için Franc programına aktarılmıştır. Yapıştırıcının ve yapıştırılacak olan metallerin malzeme özellikleri Franc programında girilmiştir. Analizlerde yapıştırıcı için üç farklı elastikiyet modülü seçilmiştir. Yapıştırıcı ve metal malzemelerin özellikleri tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Yapıştırıcı ve yapıştırılacak malzemelerin özellikleri

	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Poisson Oranı ( $\nu$ )
<b>Çelik</b>	200	0,3
<b>Alüminyum</b>	70	0,33
<b>Bakır</b>	110	0,343
<b>Yapıştırıcı</b>	20 ,50, 100	0,33

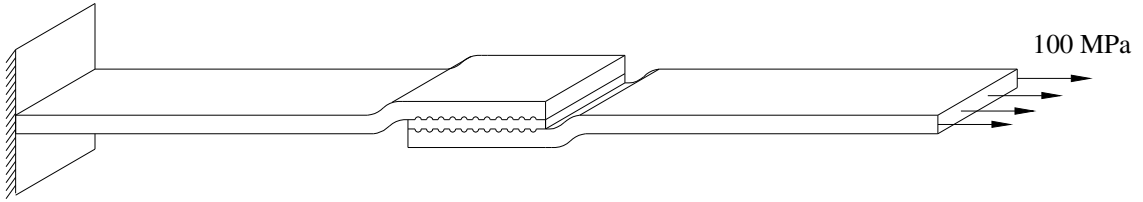
### 3.8 Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Şartları

Oluşturulan model alt bölgelere ayrılır ve düğüm noktaları belirlenerek (5240 elemanlı, 16137 düğümlü) ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 3.5’de Casca’da oluşturulan yapıştırma bağlantısının sembolik ağ yapısı görülmektedir. Yapıştırıcı maddesindeki ağ yapısı metal levhalardaki ağ yapısına nazaran daha yoğun oluşturulmuştur. Bu ağ yapısı daha hassas sonuç alınmasını sağlamıştır. Sonlu elemanlar ağ yapısını oluşturmada dört düğümlü dörtgen izoparametrik elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Yapıştırma bağlantısının sonlu elemanlar modeli

Casca Programında elde ettiğimiz model Franc programında açılır. İlk olarak, malzeme özellikleri kontrol edilir ve malzemelerin iki ayrı parça olarak ayrılmış olup olmadığına bakılır. Daha sonra Problem tipi ve sabitlenecek kısım tanımlanır. Malzemenin sabitlenmemiş kısmına Şekil 3.6'da görüldüğü gibi yapıştırıcı eksenine paralel şekilde 100 MPa bir çekme kuvveti uygulanmıştır.



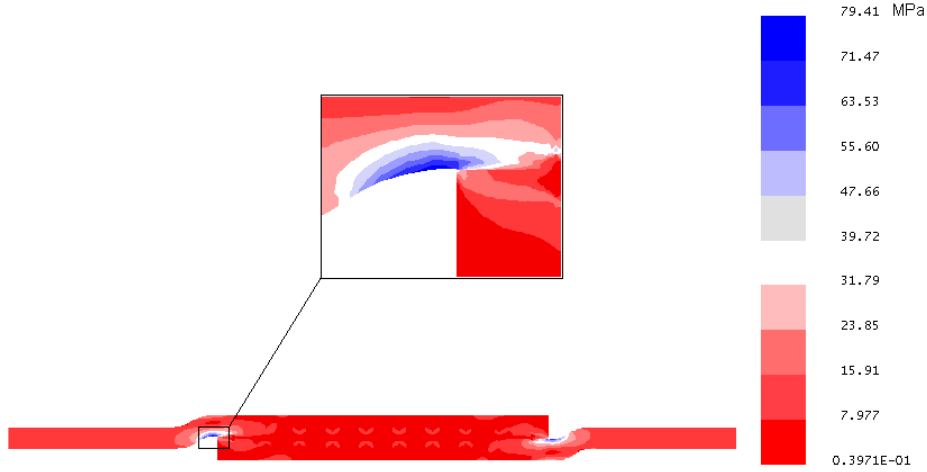
Şekil 3.6 Yapıştırma bağlantısının yükleme ve sınır koşulları

Bu işlemlerden sonra analiz işlemlerine geçilir. Analiz sonuçları belirlenen iki nokta arasındaki belirli sıklıktaki gerilim değişimleri incelenerek yapılmıştır.

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Gerilme Analizleri

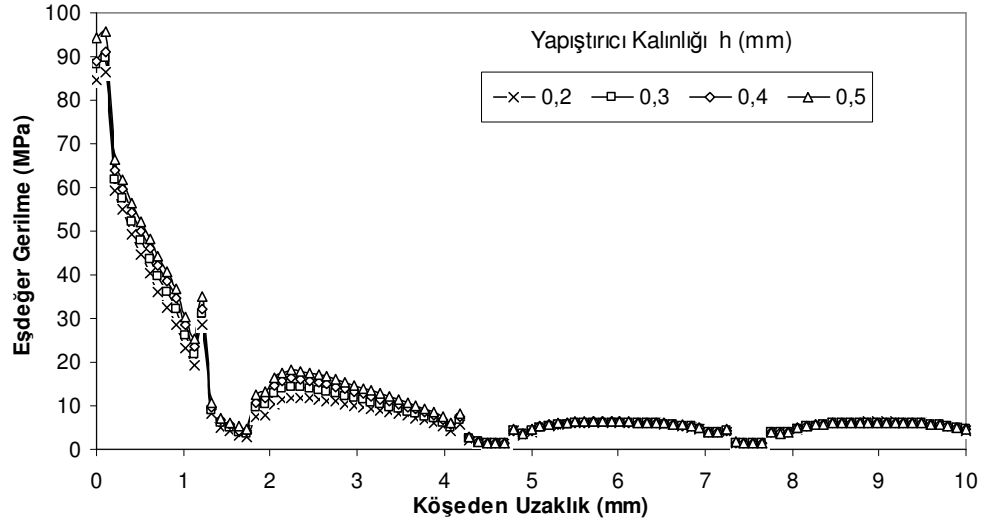
Bu çalışmada, farklı yapıştırma durumları göz önüne alınarak yapıştırılmış iki plakanın gerilme analizi sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Gerilme kriteri olarak eşdeğer (Von Mises) gerilmeler göz önüne alınmıştır. Analizlerde; çelik, alüminyum ve bakır malzeme kullanılmıştır. Ayrıca, farklı yapıştırıcı kalınlıkları, levha çentik tipi ve çentik sayıları kullanılmıştır. İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen eşdeğer gerilme dağılımı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi maksimum gerilmeler malzemelerin uç noktalarında meydana gelmektedir. Bu noktalar kritik bölgeler olarak tanımlanmakta ve ilk olarak ayrılma işlemi bu bölgelerde gerçekleşmektedir. E1 yapıştırıcı malzemesinin elastisite modülünü göstermektedir.



Şekil 4.1 İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 10, çentik tipi V )

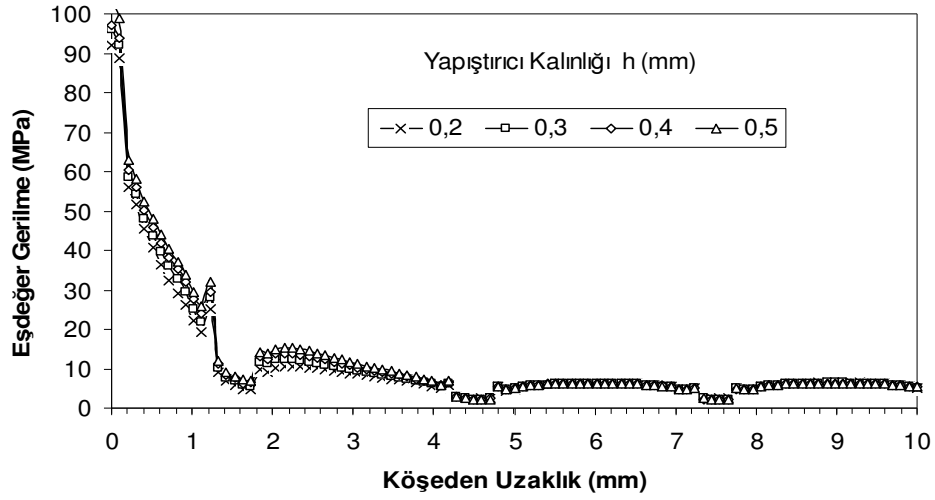
Şekil 4.1’de görüldüğü gibi maksimum gerilmeler, yapıştırıcı ve levha arasında, uç kısımlarda oluşmaktadır. Çentikli iki çelik levhanın yapıştırma bağlantısında elde edilen eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Burada yapıştırılacak yüzeye yuvarlak ve 10 adet çentik açılmıştır. Farklı yapıştırıcı kalınlığı kullanılarak yapılan analizlerde maksimum gerilmenin yapıştırıcı kalınlığının en büyük olduğu durumda

elde edilmiştir. En büyük gerilmeler levha uçlarına yakın bölgelerde görülmektedir. Bu mesafeden itibaren gerilmeler düşmektedir. O halde hasar açısından en tehlikeli bölgeler en büyük gerilmeye maruz kalan levhaların köşe bölgeleridir. Analizde, en düşük gerilme yapıştırıcı kalınlığının en düşük olduğu bağlantı elemanında elde edilmektedir.



Şekil 4.2 İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 10, çentik tipi U )

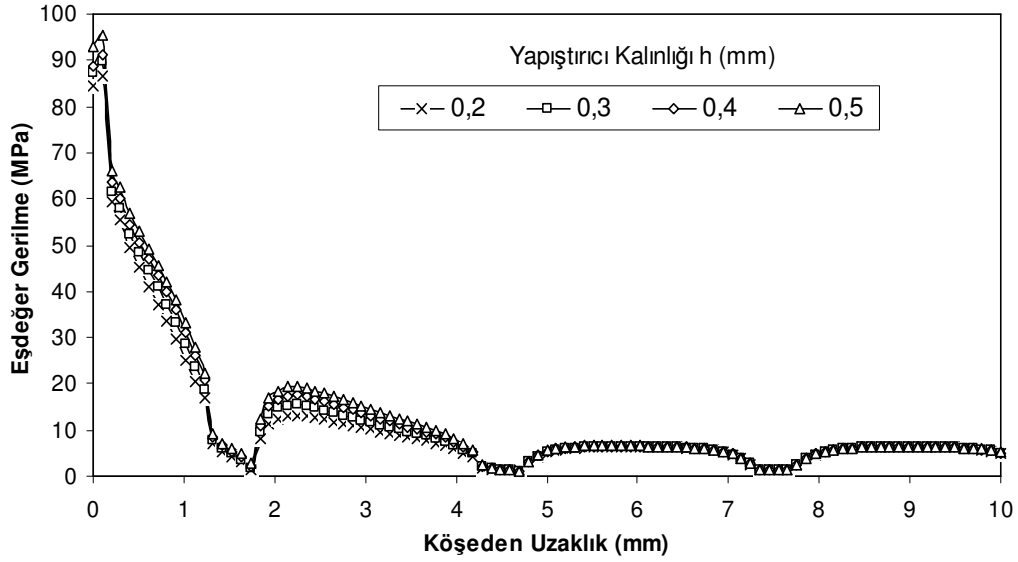
Yuvarlak 10 çentikli iki bakır levhanın dört farklı yapıştırıcı kalınlığı kullanılarak elde edilen gerilme dağılımı Şekil 4.3’de verilmiştir. Bu gerilme dağılımında da, yuvarlak 10 çentikli iki çelik levha bağlantısında meydana gelen gerilmelerle yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.3 İki bakır malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 10, çentik tipi U )

Yapıştırılacak bölgeye V tipi 10 çentik açılmış çelik levhalarda elde edilen gerilme dağılımı Şekil 4.4'de gösterilmiştir. En yüksek gerilmeler yapıştırıcı kalınlığının en büyük olduğu durumda elde edilmiştir. Çentik yerlerinde eşdeğer gerilmelerin azaldığı görülmektedir. Yapıştırma kalınlığının azalması ile gerilme dağılımı da azalmaktadır.

Burada köşeden uzaklığın 1,5mm 4,5mm ve 7,5mm olan yerlerde eşdeğer gerilmelerin sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu bölgeler yapıştırılacak levhanın üzerine açılmış olan çentik yerleridir.

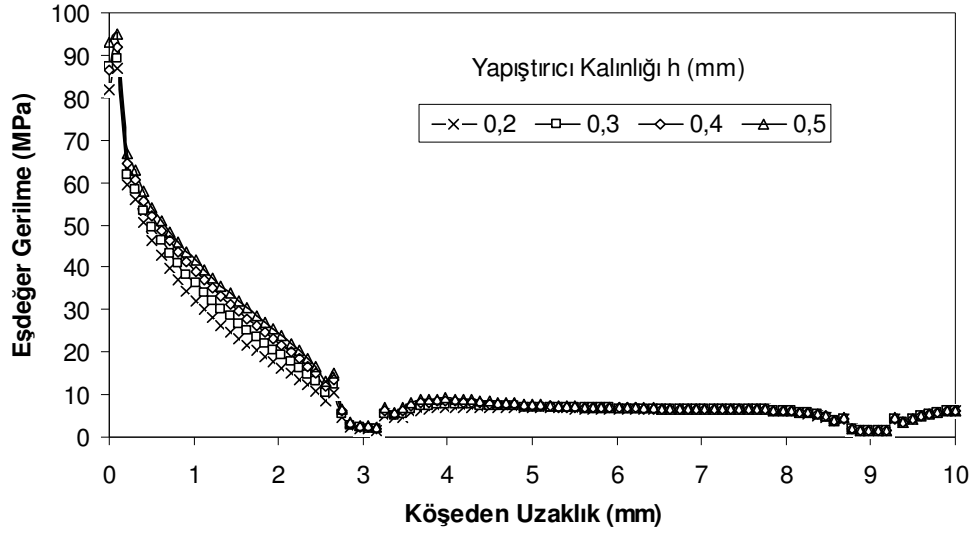


Şekil 4.4 İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 10, çentik tipi V )

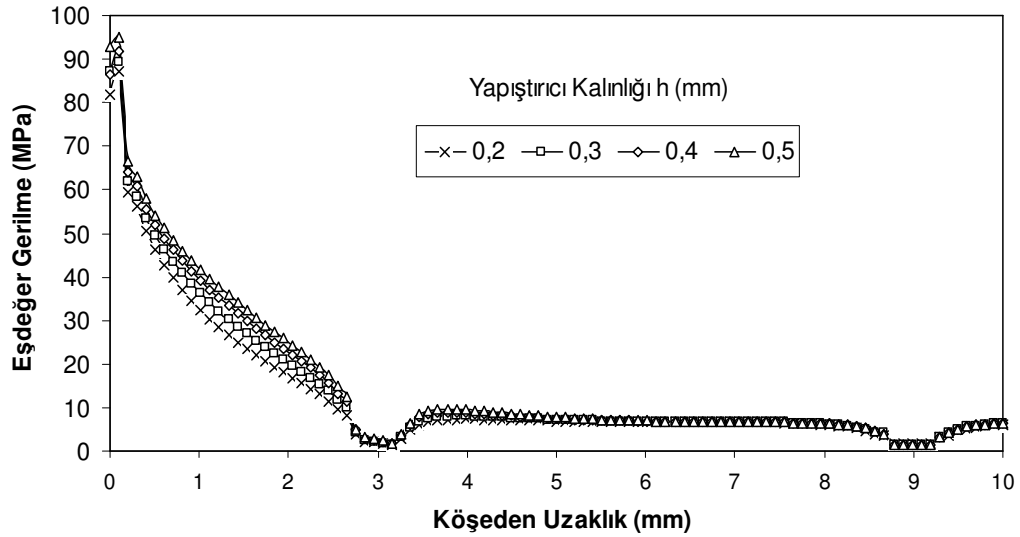
Burada çentikli iki çelik levhanın yapıştırma bağlantısı incelenmiştir. Yapıştırılacak yüzeye her iki deneyde de 10 adet çentik açılmıştır ve dört değişik yapıştırıcı kalınlığı kullanılmıştır. Şekil 4.2’de çentik tipi yuvarlak, Şekil 4.4’de ise çentik tipi V şeklinde açılmıştır. Şekil 4.3’de köşeden uzaklık mesafesinin 1 ile 2 mm arasında eşdeğer gerilmenin düzensiz olduğu görülmektedir. Şekil 4.4’de ise eşdeğer gerilmelerin biraz daha düzenli olduğu görülmektedir. Yuvarlak çentikli modelde, çentik yerlerinde eşdeğer gerilmenin aniden yükselip azaldığı görülmektedir. V çentikli modelde ise çentik yerlerindeki eşdeğer gerilmeler yuvarlak çentikliye göre biraz daha düzenli bir şekilde azalıp yükseldiği sonucuna varılmıştır.

V tipi 5 çentikli ve yuvarlak tipli 5 çentikli çelik yapıştırma bağlantılarda elde edilen gerilme dağılımları grafiği Şekil 4.5 ve 4.6’da gösterilmiştir. V tipi 5 çentikli ve yuvarlak 5 çentiklilerde en büyük gerilme dağılımları yapıştırma kalınlığının en büyük olduğu durumlarda elde edilmiştir. Çentik yerlerinde ise gerilmelerin düştüğü görülmektedir. Kalınlığının artması gerilme dağılımlarını arttırmaktadır. Bağlantı elemanları kuvvete maruz kaldığı zaman uç bölgelerde önemli gerilme yoğunlaşmaları oluşmaktadır. Bu bölgeler hasar açısından önemli bölgelerdir.





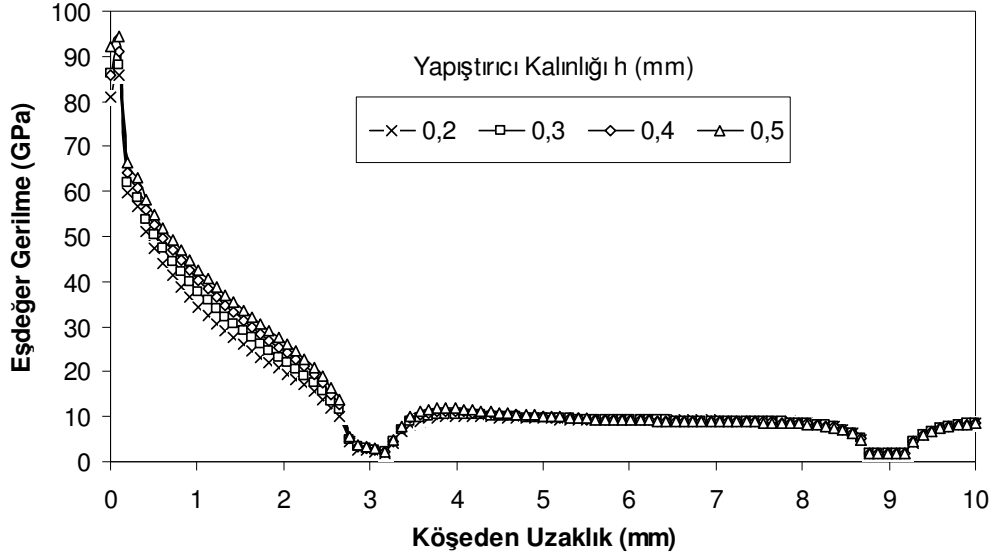
Şekil 4.5 İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 5, çentik tipi U )



Şekil 4.6 İki çelik malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 5, çentik tipi V )

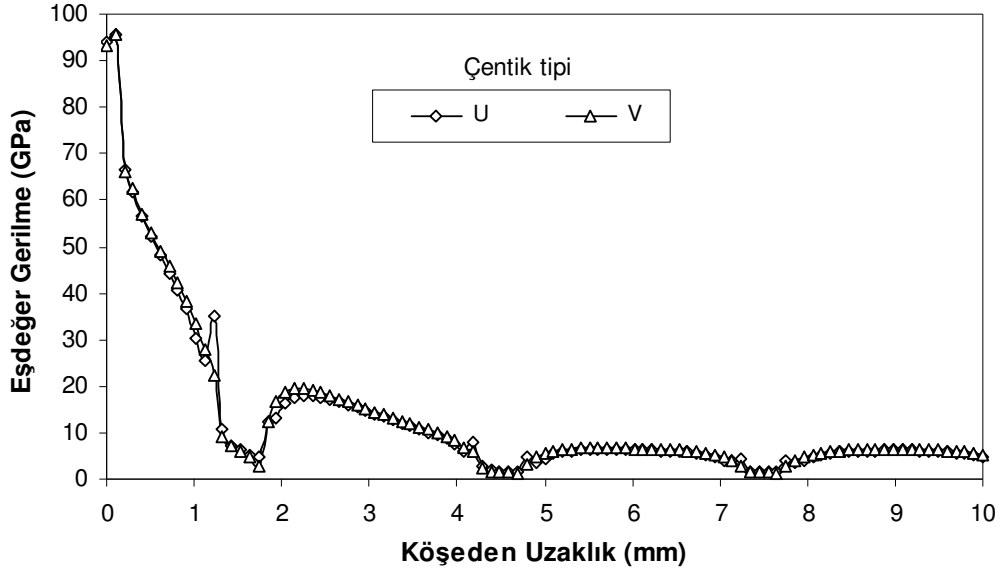
Çentikli levhalardaki çentik sayısının artması ile gerilme değerleri artmaktadır. Fakat burada yapıştırıcı kalınlığının artması veya azalması gerilme değerlerini köşeden uzaklığın 0 ile 3 mm arasındaki (ilk çentik yerine kadar) önemli ölçüde değiştirmektedir.

Şekil 4.7’de yapıştırılacak yüzeye V tipi ve 5 adet çentik açılmış çelik-bakır yapıştırma bağlantısı gösterilmiştir. Yapıştırılacak olan malzemenin biri çelik diğeri bakır malzemedir. Yapıştırıcının elastisite modülü 20 GPa ve dört değişik yapıştırıcı kalınlığı kullanılmıştır.



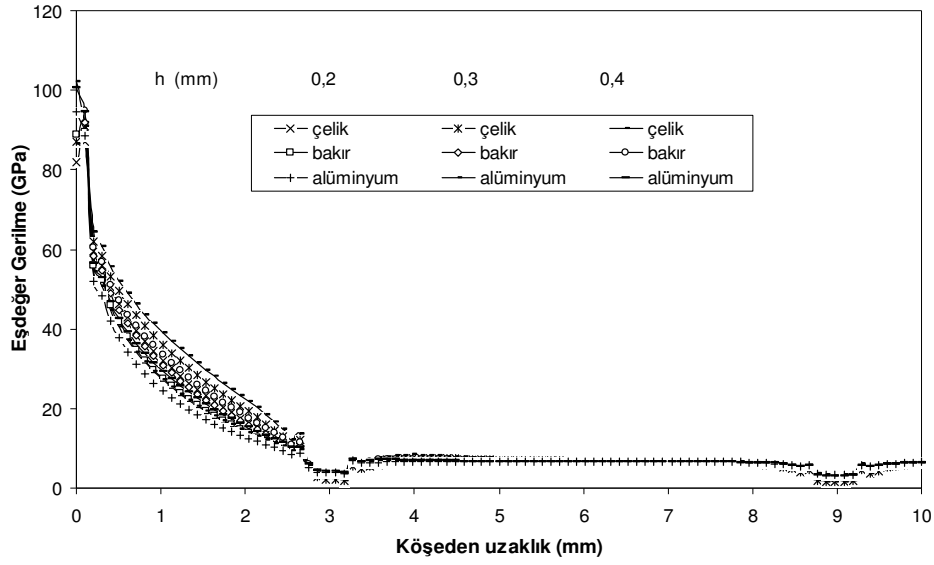
Şekil 4.7 Çelik ve bakır malzemenin yapıştırıcı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 5, çentik tipi V )

0,5mm yapıştırıcı kalınlığına sahip iki çelik levhanın U ve V çentik tipli bağlantısında elde edilen eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Farklı çentik türü kullanılarak yapılan analizlerde bazı bölgelerde V çentik tipinde gerilmelerin büyük olduğu görülmüştür. Bağlantı mukavemeti açısından U tipi bağlantıda malzeme yüzeyinde kritik gerilme bölgede gerilme konsantrasyonu olduğundan yapıştırma bağlantısının mukavemeti daha düşük olmaktadır. Buna bağlı olarak gerilme yığılmaları oluşmaktadır. Analiz sonucunda en uygun bağlantı türünün V tipi çentikli yapıştırma bağlantısı olduğu görülmüştür.



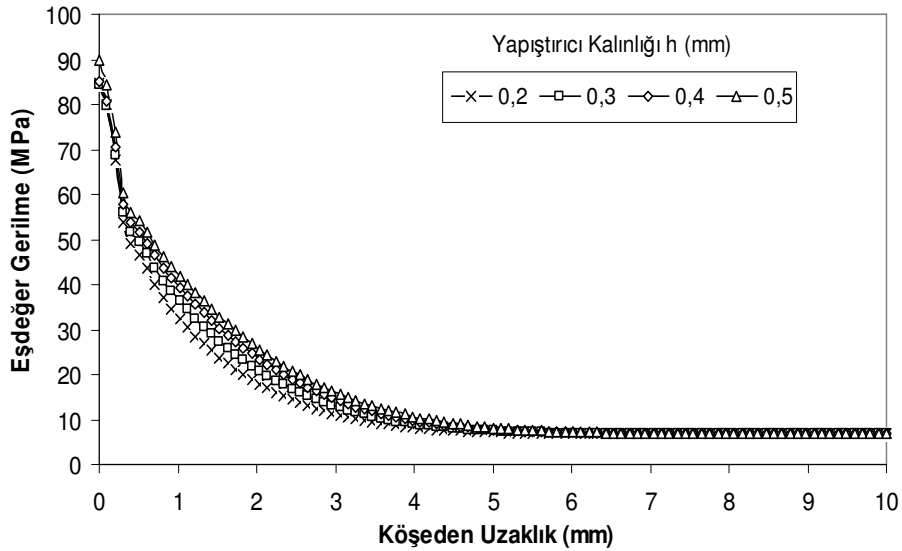
Şekil 4.8 İki farklı çentik tipli malzemenin yapıştırma bağlantısı ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilme dağılımı (E1:20GPa, çentik sayısı 10)

Farklı malzeme ve farklı yapıştırıcı kalınlıkları kullanılarak yapılan analizlerde maksimum gerilme Şekil 4.9’da görüldüğü gibi İki çelik yapıştırma bağlantısında, yapıştırıcı yüzeyi ile yapıştırılan malzeme arasında ve yapıştırıcının uç noktalarında meydana gelmektedir.



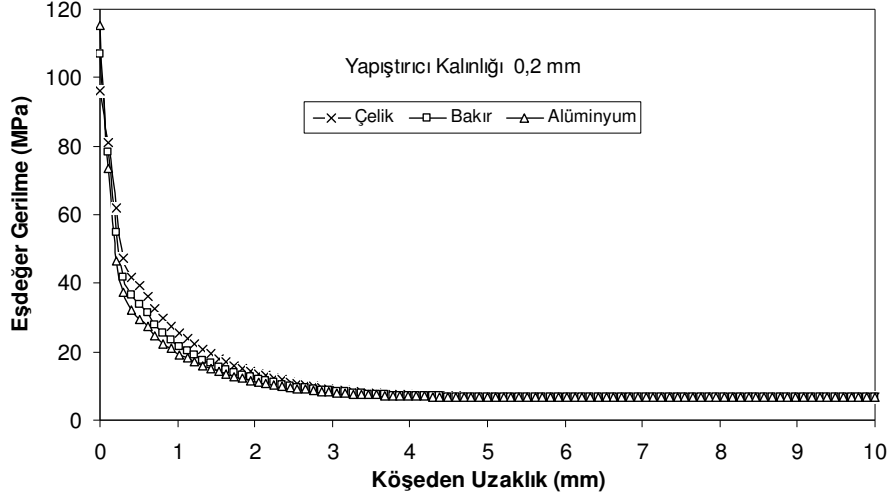
Şekil 4.9 Üç farklı malzemeden oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları (Çentik sayısı 5, çentik tipi U)

Çentiksiz (düz) iki çelik levha bağlantıda elde edilen gerilme sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Düz çelik bağlantılarında elde edilen gerilmeler çentikli bağlantılarda olduğu gibi en büyük gerilme dağılımları yapıştırma kalınlığının en büyük olduğu durumlarda elde edilmiştir. Böylelikle yapıştırma kalınlığının artıp azalması gerilme değerlerini etkilemektedir.



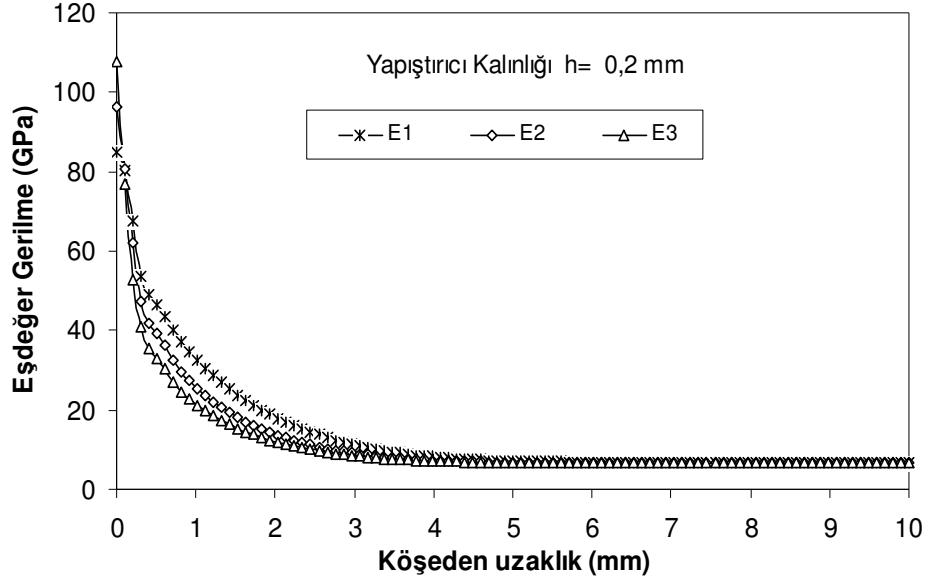
Şekil 4.10 Çentiksiz (düz) iki çelik malzemenin yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilme dağılımı

Üç farklı yapıya sahip ve yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm olan çentiksiz düz yapıştırma bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilme, çentikli bağlantılara göre daha yüksek çıkmaktadır. Çentiksiz (düz) üç farklı malzemede meydana gelen gerilme dağılımı Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Burada çelik-çelik, bakır-bakır ve alüminyum-alüminyum yapıştırma bağlantıları incelenmiştir. Yapıştırıcının elastisite modülü 20 GPa olarak alınmıştır.



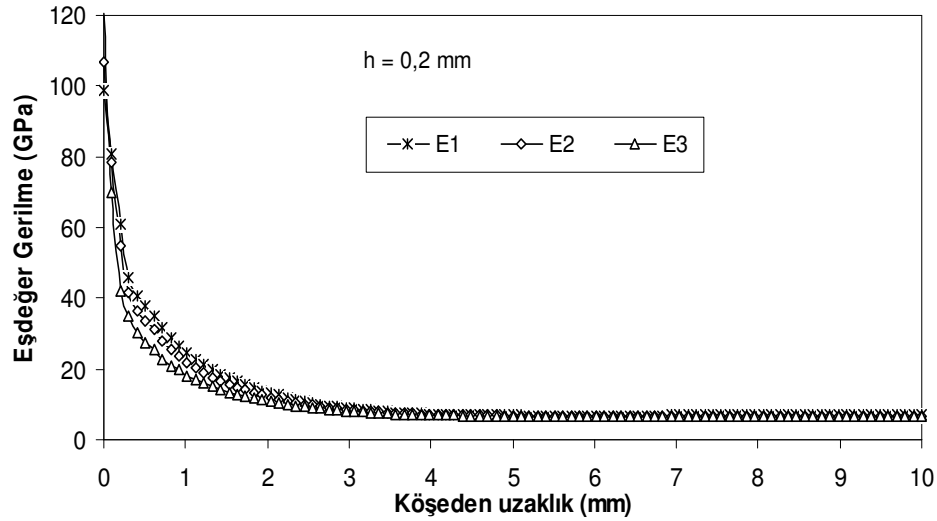
Şekil 4.11 Çentiksiz (düz) üç farklı malzemenin yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilme dağılımı

Üç farklı yapıya sahip yapıştırma bağlantılarının karşılaştırılmasında ise 0,2 mm yapıştırıcı kalınlığı, üç farklı yapıştırıcının elastisite modülü değiştirilerek analiz yapılmıştır. Şekil 4.12’de çentiksiz (düz) yapıştırıcı kalınlığı 0,2 mm, yapıştırıcının elastisite modülü E1 (20 GPa), E2 (50 GPa), E3 (100 GPa) olarak alınmıştır. Burada sadece yapıştırıcının kalınlığı değil, yapıştırıcının elastisite modülünde gerilmeleri önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 4.12 Çentiksiz (düz) iki çelik malzemenin yapıştırma bağlantısında üç farklı elastisite modülü kullanılarak meydana gelen gerilme dağılımı

0,2mm yapıştırıcı kalınlığındaki çentiksiz (düz) iki bakır levhanın birleştirilmesinden oluşan yapıştırma bağlantısında elde edilen gerilme dağılımları Şekil4.13’de verilmiştir. Burada elde edilen gerilme sonuçları, Şekil 4.12 ’de iki çelik levha bağlantısında elde edilen gerilme sonuçlarıyla hemen hemen aynı çıkmaktadır.



Şekil 4.13 Çentiksiz (düz) iki bakır malzemenin yapıştırma bağlantısında üç farklı elastisite modülü kullanılarak meydana gelen gerilme dağılımı

Çizelge 4.1’de Çentik tipi yuvarlak, çentik sayısı 10 olan iki çelik levhanın yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilme değerleri verilmiştir. Çizelgede yapıştırıcı kalınlığı  $h = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$  mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.1 Çelik- bakır levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler  
(çentik sayısı 10, çentik tipi U ) (MPa)

l (mm)	h (mm)			
	0,2	0,3	0,4	0,5
0,00	84,74	88,07	88,91	94,17
0,41	49,32	52,05	54,13	56,49
1,43	5,16	5,91	6,64	7,07
2,45	11,76	13,95	15,88	17,66
3,47	8,14	9,26	10,37	11,45
4,49	1,38	1,35	1,37	1,44
5,41	5,75	5,86	6,02	6,20
6,43	5,98	5,99	6,03	6,08
7,45	1,52	1,45	1,43	1,40
8,47	5,97	5,93	5,94	5,94
9,49	6,01	5,98	6,00	6,01
10,00	4,40	4,54	4,59	4,63

Çizelge 4.2’de Çentik sayısı 10, çentik tipi V olan çelik levha bağlantısında meydana gelen gerilmeler verilmiştir.

Çizelge 4.2 İki çelik levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler  
(çentik sayısı 10, çentik tipi V ) (MPa)

l (mm)	h (mm)			
	0,2	0,3	0,4	0,5
0,00	84,55	87,17	88,71	93,04
1,43	5,18	6,05	6,68	7,19
2,45	12,58	14,74	16,72	18,55
3,47	8,51	9,64	10,76	11,87
4,49	1,44	1,45	1,49	1,55
5,41	6,10	6,22	6,39	6,59
6,43	6,23	6,24	6,27	6,33
7,45	1,49	1,45	1,43	1,41
8,47	6,22	6,21	6,21	6,21
9,49	6,26	6,25	6,25	6,26
10,00	4,98	5,06	5,11	5,13

Çizelge 4.3’de Çentik sayısı 5, çentik tipi V olan çelik levha bağlantısında meydana gelen gerilmeler verilmiştir.

Çizelge 4.3 İki çelik levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler  
(çentik sayısı 5, çentik tipi V ) (MPa)

l (mm)	h (mm)			
	0,2	0,3	0,4	0,5
0,00	81,93	87,13	86,42	92,90
1,43	24,91	28,57	31,54	34,05
2,45	11,51	13,72	15,64	17,35
3,47	5,99	6,89	7,69	8,46
4,49	7,14	7,58	8,07	8,59
5,41	6,82	6,96	7,15	7,36
6,43	6,73	6,76	6,79	6,84
7,45	6,59	6,63	6,64	6,64
8,47	4,60	4,95	5,33	5,36
9,49	4,58	5,04	5,12	5,14
10,00	6,21	6,39	6,43	6,43

Çizelge 4.4’de Çentik tipi yuvarlak, çentik sayısı 5 olan iki çelik levhanın yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilme değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 İki çelik levha yapıştırma bağlantısında meydana gelen gerilmeler  
(çentik sayısı 5, çentik tipi U ) (MPa)

l (mm)	h (mm)			
	0,2	0,3	0,4	0,5
0,00	81,98	87,19	86,48	92,97
1,43	24,77	28,42	31,38	33,88
2,45	10,81	13,01	14,87	16,49
3,47	4,80	5,56	6,17	6,78
4,49	7,00	7,41	7,89	8,40
5,41	6,77	6,89	7,06	7,26
6,43	6,71	6,71	6,73	6,76
7,45	6,58	6,55	6,54	6,53
8,47	4,60	4,78	4,86	4,88
9,49	4,21	4,32	4,39	4,37
10,00	6,21	6,21	6,23	6,24

Çizelge 4.5’de Çentiksiz (düz) çelik levha bağlantısında meydana gelen gerilme değerleri verilmiştir.



Çizelge 4.5 Çentiksiz (düz) çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilmeler (MPa)

l (mm) Köşeden uzaklık	h (mm)			
	0,2	0,3	0,4	0,5
0,00	84,90	84,33	85,25	89,90
1,43	25,28	28,97	31,95	34,47
2,45	14,45	16,83	18,95	20,90
3,47	9,46	10,67	11,87	13,03
4,49	7,55	8,04	8,58	9,15
5,31	7,05	7,25	7,50	7,77
6,43	6,91	6,94	7,00	7,07
7,45	6,92	6,92	6,92	6,93
8,47	6,95	6,94	6,94	6,93
9,49	6,97	6,96	6,95	6,95
10,00	6,97	6,96	6,96	6,95

Çentiksiz (düz) çelik levha bağlantısında meydana gelen en büyük gerilme değerleri Çizelge 4.5’de görüldüğü gibi yapıştırma kalınlığının 0,5mm olan malzemede 89,90MPa olarak bulunmuştur.

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada; farklı levha çentik tiplerine sahip alüminyum, bakır ve çelik malzemelerin yapıştırıcı eleman ile birleştirilmesinden oluşan gerilmeler sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir.

Yapıştırma bağlantıları incelendiğinde meydana gelen gerilmeler ve hasar durumları ya yapıştırıcının molekülleri arasında ya da yapıştırıcı ile levha arasındaki yüzeyde meydana gelmektedir. Bu hasarlar içinde en kritik bölge uç-kenar kısımlardır. Öyle ki yapılan analizlerde de maksimum gerilme uç-kenar bölgede oluşmuştur.

Farklı çentikli ve düz levhalar kullanılarak yapılan analizlerde çentik sayısının ve tipinin farklılığının gerilme dağılımına az miktarda etkisinin olduğu görülmüştür. Levhalardaki çentik sayısının azalması ile gerilmelerde düşüş gerçekleşmektedir. Levhaların yapıştırılacak kısımlarına yuvarlak ve V tipi çentik açılarak yapılan deneylerdeki gerilme analiz sonuçlarına baktığımızda V tipi çentikli levhaların yuvarlak tipi çentikli levhalara göre daha düşük gerilme değerleri elde edilmiştir.

Bunun yanında yapıştırıcı kalınlığının artması ile gerilmeler önemli ölçüde artmaktadır. Maksimum gerilme dağılımları yapıştırıcı kalınlığının en büyük olduğu durumda elde edilmiştir. Yani yapıştırma bağlantısında kullanılan yapıştırıcı kalınlığı ne kadar az olursa bağlantı o derece sağlam olmaktadır. Tabi bu şart optimum bağlantı sağlandığında geçerlidir.

Üç farklı malzeme türü olarak meydana getirilen çelik- çelik çelik-bakır çelik alüminyum yapıştırma bağlantılarında en riskli gerilme dağılımlarının çelik-alüminyum yapıştırıcı bağlantı türünde olduğu elde edilmiştir. En sağlam yapıştırma bağlantı türü ise çelik-çelik yapıştırma bağlantısıdır. Pratikte uygulama esnasında bu durum dikkate alınarak tedbirler uygulanıp ona uygun bağlantı dizayn edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan analizlerde yapıştırma ile birleştirmenin mukavemeti; levha üzerindeki çentik tipi ve sayısı, yapıştırıcı kalınlığına ve yapıştırıcının özelliklerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

Akkurt, M., 1996, "Makine Elemanları Cilt I", 4.Bölüm, Birsen Yayınevi, 92-94s, İstanbul.

Akkurt, M., 1996, "Makine Bilgisi", 5. Bölüm, Birsen Yayınevi, 227-229s, İstanbul.

Akkurt, M., 1996, "Makine Elemanları I", 9. Bölüm, İTÜ Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi, 269-272 s, İstanbul.

Anık S., Anık, S.,Vural, M., 1993, "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı", Birsen Yayınevi, Cilt 1 s. 291-300, İstanbul.

Anık S., 1989, "II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiri Kitabı", s. 54-56.

Aydın, M. D., Adnan, Ö., Şemsettin, T., 2005 "Yapıştırma Bağlantılarının Dayanımı ve Hasarı Üzerine Yapıştırılan Malzeme Kalınlığının Etkisi", 7. Uluslararası Kırılma Konferansı, 19-21 Ekim, Kocaeli.

Bozacı, A., 2000, "Makine Elemanları Cilt I", YTÜ Makine Fakültesi Yayınları, 7.3.Bölüm, Çağaloğlu İstanbul, 7.36-42 s.

Colombi, P. and Paggi, C., 2005, "Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates", International Journal of Adhesion and Adhesives, 22, pp. 357-365.

Cürgül, İ., 1990, "Makine Elemanları I", 3. Bölüm, YTÜ Yayınları, Kocaeli, 102-107s.

Deng, J. and Lee, M.M.K., 2005 "Fatigue performance of metallic beam strengthened with a bonded CFRP plate", Mechanics of Materials, 37, pp. 1166-1174.

Du, Y., Chen, L., Nicol, E. McMcGruer, George, G., Adams and Etsion, I., 2007, "A finite element model of loading and unloading of an asperity contact with adhesion and plasticity", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 312, pp. 522-528.

- Fekirini, H., Bachir Bouiadjra B., Belhouari, M., 2008, "Numerical analysis of the performances of bonded composite repair with two adhesive bands in aircraft structures", *Composite Structures*, Vol. 82, pp.84-89.
- Fitton, M.D., Broughton J.G., 2004, "Variable modulus adhesives:an approach to optimised joint performance", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25, pp. 329-336.
- Frigione, M., Aiello, M.A. and Naddeo, C., 2005, "Water effects on the bond strength of concrete/concrete adhesivejoints", *Construction and Building Materials*, 20, pp. 957-970.
- Gediktaş, M., 1995, "Makine Elemanları Bağlama Elemanları", *Konstrüksiyon ve Hesap*, 4.Bölüm, Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu İstanbul, 104-119.s.
- Jarry, E. and Shneoi, R.A., 2005 "Performance of butt strap joints for marine applications", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, pp. 162-176.
- Keller, T. and De Castro, J., 2005 "System ductility and redundancy of FRP beam structures with ductile adhesive joints", *Composites Part B* 36, pp. 586-596.
- Kaftelen, H., Baldan, 2005, "Adhesive birleştirme ile onarılan uçak parçaların yorulma davranışları", 7. Uluslararası kırılma konferansı, 19-21 Ekim, Kocaeli.
- Lucas, F. M., da Silva, and Adams, R. D., 2007 "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites" *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, pp. 227-235.
- Moura, M.F.S.F., Daniaud, R. and Magalhaes, A.G., 2005, "Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, pp. 464-473.
- Minez B., 2000, "Metallerin Yapıştırma Yoluyla Birleştirilmesi ve Endüstriyel Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Nemes, O., Lachaud, F. and Mojtabi, A., 2005 “Contribution to the study of cylindrical adhesive joining”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, pp.474-480.
- Quaresimin, M. and Ricotta, M., 2005 “Stress intensity factors and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials”, *Composites Science and Technology*, 66, pp. 647-656.
- Sargent, J.P., 2005, “The Influence of Inclusions on the Strength of Adhesive Joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, pp. 151-161
- Rende, H., 2000, “Makine Elemanları Hesap ve Konstrüksiyon Cilt I”, 4. Bölüm, Seç Yayın ve Dağıtım, Çağaloğlu İstanbul, 4.1-1/9 s.
- Topçu, M. ve Taşgetiren S., 1998, “Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu”, Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli.
- Tin, S., 2006, “Tek Bindirmeli Yapıştırma bağlantılarının Tasarım ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, A. Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Ucun, İ., 2004, “Mermer Kesme Disklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Gerilme ve Titreşim Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, A. Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Underhill, P.R. and DuQuesnay, D.L., 2005, “The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, pp. 62-66.
- Wang, C., Huang, Y.D. and Wang, B., 2005, “Study on heat-resistant property of adhesive/carbon-carbon composites joints”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, pp. 262-286.
- Xie, D., Waas, A.M., Shohwan, K.W., Schroder, J.A. and Boeman, R.G., 2005 “Fracture criterion for kinking cracks in a tri-material adhesively bonded joints under mixed mode loading”, *Engineering Fracture Mechanics*, 72, pp.2487-2504.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hüseyin DİNÇ

Doğum Yeri : Tavşanlı

Doğum Tarihi : 10.01.1983

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Tavşanlı Endüstri Meslek Lisesi (1996-1999)

Lisans : Simav Teknik Eğitim Fakültesi (1999-2003)

Yüksek Lisans : Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
(2004- .....)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Kurtsan Paslanmaz Çelik San. Tic. Ltd. Şti. (2006- .....)