

TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ
TASARIM ve ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan TIN

Danışman

Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ağustos 2006

T.C.
AFYONKARAHİSAR KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ
TASARIM ve ANALİZİ

Sinan TIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman
Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

AFYONKARAHİSAR

2006

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEK BİNDİRMELİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ

TASARIM ve ANALİZİ

Sinan TIN

Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

Yapıştırıcılar, kaynak ve lehim gibi değişik birleştirme metotlarına alternatif olarak kullanılan malzemelerdir. Bu sebeple, kimyasal ve teknolojik alandaki gelişmelere paralel olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kullanımı kolay, ekonomik ve avantajlı olması sebebiyle endüstride tercih sebebidir. Günümüzde farklı malzemelere göre değişik yapıştırıcılar imal edilmektedir.

Bu çalışmada, farklı malzemelerden imal edilmiş levhaların yapıştırıcılar ile birleştirilmesinde meydana gelen gerilmeler sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Analizlerde, alüminyum, çelik ve bakır malzemeler 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 açıdaki levhalar (15°, 30°, 45°, 60°, 90°), yapıştırıcı kalınlıkları (0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm) ve yapıştırıcının farklı elastisite modülleri (20, 50, 100 GPa) dikkate alınmıştır.

2006, 72 sayfa.

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

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF SINGLE LAP ADHESIVE BONDING

Sinan TIN

Afyonkarahisar Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine Education

Advisor: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN

The adhesives are used as alternative to various joints methods such as weld and solder. For this reason, their use increases together with technology and chemical developments. The adhesives are preferred in the industry, because of using easy, economical and advantageous. Recently, various adhesives are manufactured for different materials.

In this study, stress which occurred in joining process with adhesives of the plates which manufactured from different materials are investigated by using finite element method. The analysis is used to various materials such as aluminium, steel and copper. In addition, the analysis used Franc 2D software program and equivalent stress (Von Mises) was considered for various angle plates (15°, 30°, 45°, 60°, 90°), adhesive thickness for 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm and various elasticity modules (20, 50, 100 GPa) of the adhesive are considered in joint by using adhesives of the plates.

2006, 72 pages.

Key words: Adhesives, Stress, Finite element method, Adhesive joints, Franc.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI :.....	3
3.YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI	8
3.1 Yapıştırıcı Çeşitleri.....	10
3.1.1 Yapıştırılacak Malzeme Türüne Göre	13
3.1.2 Fiziksel Formuna Göre Sınıflandırma	13
3.1.3 Sertleşme Olayına Göre Sınıflandırma	13
3.1.4 Yapıştırma Sıcaklığına Göre Sınıflandırma	14
3.1.5 Ana Elemanın Kimyasal Türüne Göre Sınıflandırma	14
3.2. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Bağlantılarla Karşılaştırılması	17
3.3. Yapıştırma Bağlantılarının Kullanılma Nedenleri	20
3.4. Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları	21
3.5. Yapıştırma İşlemi	22
3.5.1. Yapıştırma Yüzeyinin Hazırlanması	23
3.5.2. Ön Hazırlık Çalışmaları	24
3.5.3. Parçaların ve Sıkıştırma Düzeneklerinin Hazırlanması	25
3.5.4. Yapıştırma Bağlantılarının Maruz Kaldığı Kuvvetler	28
4. GERİLME ANALİZİ KRİTERLERİ	30
4.1 Koordinat Sistemindeki Gerilme İlişkileri	30
4.2 Gerilme Şekil Değiştirme İlişkileri	32

4.3 Eşdeğer Gerilme (Von Mises)	33
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	35
5.1 Franc Programı	36
5.2. İki Boyutlu Problem	37
5.3 İzoparametrik Eleman	39
5.4 Eleman Rijitlik Matrisi	43
6. ANALİZ SONUÇLARI	46
6.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	46
6.1.1 Franc Programı Kullanılarak Yapıştırma Modellerinin Nümerik Olarak Analiz Edilmesi	47
6.2 Metal ve Yapıştırıcının Mekanik Özellikleri	48
6.3 Gerilme Analizleri	50
6.4 Gerilme Analizi Sonuçları	52
7. SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	70
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Yapıştırma bağlantısında adhezyon ve kohezyon	9
3.2 Bir perçin bağlantısında gerilme yayılışı	17
3.3 Bir kaynak bağlantısında gerilme yayılışı	18
3.4 Bir yapıştırma bağlantısında gerilme yayılışı	19
3.5 Uygun bağlantı türleri	26
3.6 Kaburga ve petek takviyeler	26
3.7 Kaburga ve petek takviyeler	27
3.8 Yapıştırma bağlantılarında farklı kuvvet uygulamaları	28
4.1 Kartezyen koordinatlarda gerilme elemanı	30
4.2 İki boyutlu elemanda şekil değiştirme ilişkisi	32
5.1 İki boyutlu problem	38
5.2 Dört düğümlü dörtgen eleman	39
5.3 Doğal koordinatlardaki temel eleman	40
6.1 60° açılı yapıştırma bağlantısının geometrik modeli	47
6.2 Franc programında analiz için Casca'da oluşturulan yapıştırma bağlantısının sembolik ağ yapısı	48
6.3 Franc'ta oluşturulan ankastre kısım ve uygulanan kuvvet	48
6.4 90° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı	50
6.5 60° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı	50
6.6 45° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı	51
6.7 30° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı	51
6.8 15° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı	51
6.9 15° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	52
6.10 30° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	53

6.11	45° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	53
6.12	60° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	54
6.13	90° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	54
6.14	30° açılı çelik-alüminyum levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	55
6.15	60° açılı çelik-alüminyum levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	56
6.16	30° açılı çelik-bakır levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	57
6.17	60° açılı çelik-bakır levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları	57
6.18	30° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	58
6.19	60° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	59
6.20	30° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması.....	60
6.21	60° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	60
6.22	Çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	61
6.23	Çelik-bakır levha bağlantıda meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	61
6.24	Çelik-alüminyum bağlantıda meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	62
6.25	30° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	63
6.26	60° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	63
6.27	30° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	64
6.28	60° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Önemli yapıştırıcılar	11
3.2 Bazı yapıştırıcıların özellikleri	12
6.1 Boyutlandırma değerleri	49
6.2 Malzeme özellikleri	49
6.3 Yapıştırıcının elastisite modülleri	50
6.4 30° açığa sahip üç farklı malzemede oluşan maksimum gerilmeler (MPa)	65
6.5 30° açığa sahip çelik-alüminyum levha bağlantıda oluşan maksimum gerilmeler (MPa)	66
6.6 60° açığa sahip çelik-bakır levha bağlantıda oluşan maksimum gerilmeler (MPa)	66
6.7 30° açığa ve $h = 1$ mm yapıştırıcı kalınlığına sahip levhada oluşan maksimum gerilmeler (MPa)	67
6.8 15° açığa sahip çelik levha bağlantıda oluşan maksimum gerilmeler (MPa)	67

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
∂	Diferansiyel,
σ	Gerilme,
τ	Kayma gerilmesi,
F	Kuvvet,
Σ	Toplam,
ε	Şekil değiştirme,
γ	Kayma-şekil değiştirme,
E	Elastisite modülü,
u, v	Deplasman değerleri,
σ_e	Eşdeğer gerilme,
σ_{yp}	Asal gerilme,
$\{u\}$	Yer değiştirme vektörü,
λ_{yp}	Eksenel yük faktörü,
t	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,
t_1	Levha kalınlığı,
h	Yapıştırıcı kalınlığı,
ν	Poisson oranı.

1. GİRİŞ

Endüstride yapıştırıcıların kullanılması yeni olmakla birlikte, meydana gelen fiziksel ve kimyasal gelişmeler sonucunda gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde değişik endüstri kuruluşlarında yapıştırıcılar kullanılmaktadır.

Yapıştırıcı olarak kullanılan ilk malzemenin tarihi M.Ö. 4000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Arkeologların yaptığı çalışmalar ilkel kabilelerin kırılan çömlükleri, ağaç öz suyundan yaptıkları yapıştırıcı reçine ile birleştirdikleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca yapılan diğer arkeolojik araştırmalar, M.Ö.1500–1000 yıllarında, ahşap yapıştırma işlemlerinde yapıştırıcıların kullanıldığını ortaya koymuştur. 1700'lü yıllarda yapıştırıcıların yaygın olarak kullanılmasıyla birlikte yapıştırıcıların tarihinde hızlı değişiklikler olmuştur. Bu yıllarda hayvan derisinden yapıştırıcı üreten ilk ticari fabrika Hollanda'da kurulmuştur. Yaklaşık 1750 yılında, İngiltere'de balıktan elde edilmiş hayvansal yapıştırıcının patenti alınmıştır.

1900'den beri bitkisel yapıştırıcılar, kağıt gibi gözenekli malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmasına rağmen, elli yıl öncesine kadar hayvansal esaslı olanlar, büyük öneme sahiptiler. Kasein yapıştırıcılar, I. Dünya Savaşı'nda ahşap uçak kontrüksiyonları için kullanılmış, ancak bu tip yapıştırıcıların neme karşı düşük mukavemet ve dirence sahip oldukları görülmüştür. Endüstride yapıştırıcıların kullanımında hızlı artış, doğal ürünlerde sınırlama tanımayan ve metalleri diğer metal olmayan gözeneksiz malzemelere bağlayabilen sentetik reçinelerin gelişmesinden kaynaklanmaktadır. En önemli ilk sentetik reçine, kerestelerin birleştirilmesinde kullanılan fenol formaldehittir. II. Dünya Savaşı esnasında uçaklarda yapısal metallerin bağlanması epoksi reçinelerin ve fenoliklerin kullanılmasıyla kendine önemli bir yer edinmiştir. Bu yer edinme sayesinde gün geçtikçe dayanım ve uzama kabiliyeti artarak yorulma dayanımları da iyileştirilmiştir. Aynı zamanda titreşimi sönmüleyen ve esneklik özelliklerinde iyileşmeler sağlanarak, her geçen gün daha iyi yapıştırıcılar ve yapışma bağlantıları elde edilmiştir (Tezcan Ş., 2001).

Yapıştırma bağlantısı iki parçanın yapıştırma görevini yapan, genellikle sentetik esaslı bir malzeme (yapıştırıcı) ile çözülemeyecek şekilde birleştirilmesiyle elde edilir. Parçalar arasında çok ince bir tabaka teşkil eden yapıştırıcı çok defa kimyevi reaksiyonlar sonucu makro moleküllerin çıkması ile sertleşir. Bununla birlikte iç mukavemeti ve parça yüzeylerine yapışması ile (adhezyon ve kohezyon kuvvetleri) etki eden dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar.

Yapıştırma bağlantıları maliyetlerinin düşük olması, kaynak, perçin ve diğer bağlantı şekillerinde olduğu gibi ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe sebep olmaması, gerilme yığılmaları oluşturmaması, ergime sıcaklıkları altında birleşme işleminin gerçekleşmesi ve ayrıca daha düzgün ve temiz yüzeyler elde edilebilmesi açısından diğer bağlantı türlerine göre avantajlıdır. Ancak bu teknik, bağlantı dayanımının işletme şartlarına bağımlılığı, ayrılma gerilmelerine dayanıksız olması ve bunları önlemek için özel konstrüksiyonlar gerektirmesidir. 200°C üzerindeki dayanım değerlerinde azalmalar göstermesi bu bağlantının seçilmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Yine bazı tür yapıştırıcıların birleşmeden önce hazırlanması, özel çevre şartlarını sağlanması ve yapıştırma ekipmanları gerektirmesi ürünün maliyetine olumsuz etkiler yapmaktadır (Gediktaş, M., 1995).

Yapıştırma bağlantıları, kullanılmadan evvel bağlantı yapılacak şartlar iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bağlantının mukavemeti, maruz kalacağı yüke, uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırıcıya ait özelliklere, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine ve yapışma işleminin sağlıklı yapılıp yapılmadığına bağlıdır.

Yapıştırma bağlantıları tek başlarına ve diğer bağlantı türlerini tamamlayıcı olarak kullanılmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yapıştırma bağlantılarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Ayrıca yapıştırıcılarla ilgili araştırmalar devam etmektedir ve her alanda avantajlarından faydalanılmak istenmektedir.

Tek tesirli bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde iki farklı bölge oluşmaktadır. Serbest uçlarda ayrılma, orta bölgelerde ise kayma gerilmeleri oluşur. Eğer yapıştırıcı kalınlığı arttırılırsa, kayma gerilmelerin değeri büyümektedir. Malzeme kalınlığındaki artış ile eşdeğer gerilmenin serbest uçlardan merkeze doğru yayılmasına neden olmakta ve malzeme kalınlığı arttığında bağlantı dayanımı da artmaktadır. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında çatlak oluşumu kenarlardan başlayarak orta bölgelere doğru ilerleyerek büyümektedir (Aydın vd., 2005).

Yapıştırıcı birleştirmeli kompozit yamalar, uygulama kolaylığı ve servis şartları nedeni ile mükemmel performans sağladığı için etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bunun amacı yapıştırıcı ile yapılan yamaya yük aktarılması ve bu sayede yorulma ömürlerinin artmasıdır. Tabaka sayısı arttıkça yorulma ömürlerinin arttığı ve uzun yamalar kullanıldığında yüksek yorulma ömrü elde edildiği görülmüştür. İnce tabakalı yapılarda yama uzunluğunun artması yorulma ömrünü arttırmasına rağmen, kalın parçalarda uzun yama kullanımının yorulma ömrüne etkisi görülmemiştir (Kaftelen ve Baldan, 2005).

Sargent (2005) yapılan çalışmada yüksek sıcaklık reçineleri için ara yüzeyde meydana gelen ayrılma enerjisini 60 ile 200 J/m² olduğu ve bu kuvvetin oluşturulan kompozit yapılardaki kumaşların birleşme şekillerine göre değiştiği ortaya konulmuştur. Monofilamentin kullanılmaması ile ara yüzeyde oluşan çatlak ortadan kalktığı görülmüştür.

Denizcilikte kullanılan yapışkanların durumu, su, sıcaklık ve mukavemet değerleri üzerinde yapılan çalışmada yapıştırıcı kalınlığının artması ile önemli mukavemetler elde edilmektedir. Ayrıca zamanla çizgisel hataların olabileceği ve hatta yüksek gerilme yığılmalarında bağlantının koptuğu görülmüştür (Jarry ve Shenoi, 2005).

Özellikle havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak darbelere ve yüklenmelere verdiği tepkiler deneysel olarak incelenmiştir. Bunun sonucunda yapışkan tabakasında çatlak başlangıcı olduğu, gerilme türüne bağlı olarak mod I ve mod II çatlak durumları oluşmaktadır. Asıl sebebi ise soyulma ve ayrılma gerilmelerinin etkileridir. Uygulanan kuvvetler sonucunda daha yüksek mukavemetli yapışkan kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır (Vaidya vd., 2005).

Yapıştırıcı ile takviye edilmiş cıvata bağlantılarındaki oluşan zararın ortadan kalkması hedeflenmiş ve bunu kesinleştirmek amacı ile sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Etkili olan kuvvetlerin hangi bölgeleri etkilediği sonlu elemanlar methodu kullanılarak incelenmiştir. Karşılaştırılan iki tür yapıştırıcıdan birinin gevrek birinin ise daha kararlı bir yapı sergilediği görülmüştür. Bu durumlar göz önüne alındığında yapıştırıcılarda hataların en aza inebileceği sonucuna varılmıştır (Colombi ve Poggi, 2005).

Underhill ve DuQesnay'ın (2005) yaptıkları çalışmada epoksi reçinesinin kayma gerilmeleri ve yorulma ömrü açısından nem faktörü üzerine durulmuş, nemli ve kuru sistemlerdeki yorulma ömürleri incelenmiş ve nemli ortamda daha az yorulma ömrünün olduğu görülmüştür. Ayrıca, yorulmanın kenara yakın bölgelerde gerçekleştiği ve hatanın yapıştırıcıdan kaynaklanmış gibi gözükse de aslında bir makaslanma gerilmesi olduğu gözlemlenmiştir.

Yapıştırıcı ile desteklenmiş yapıların esnekliği üzerine yapılan çalışmada aşırı yüklenmeler karşısında esnek olduğu ve hatta kritik yükün % 14 olarak arttırıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca modellenen yapı ile elde edilen sonuçların az hatalarda olsa doğruluğu kanıtlanmış, gerilmelerin ve kayma deformasyonunun kontrollü olması sağlanmıştır (Keller ve Castro, 2005).

Hacim yapışkanının sertliği ile karışık yük artışları sonucu gerilme yoğunluğu oluşmakta ve kırılma olayı gerçekleşmektedir. Deneysel sonuçlardan çatlak yayılma durumunun aynı olduğu ve maksimuma ulaştığı görülmüştür. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak çatlak ilerleme davranışı incelenmiş ve hasar durumu tespit edilmeye çalışılmıştır (Xie vd., 2005).

Çatlak yayılması iyi bir biçimde karakterize edilebilir ve gerilim şiddet faktörü j integrali ile açıklanabilmektedir. Ayrıca gerilme kuvvetlerinin ara yüzeyin bağ kuvvetini aşması ile bağlantının yüzeysel olarak kopması ile sonuçlandığı görülmüştür (Kanchanmai vd., 2004).

Yapılan çalışmada bağlantıdaki gerilme yığılmaları ile oluşan çatlağın başlaması ve ilerlemesini incelenmiştir. Gerilme yığılmaları belli bir sınırı aştıktan sonra çatlak başlamış mod 1 ve mod 2 kırılma davranışı gözlemlenmiştir. Gerilme hızının artması ile çatlak ilerleme hızı da artmıştır. Aynı yapıştırıcı ile daha sağlam bir bağlantı gerçekleştiğinde statik halde iken etkilenmediği görülmüştür (Deng ve Lee, 2005).

Quaresimin ve Ricotta (2005) tek tabakalı kompozit malzemelerin sahip bağlantılar sonlu elemanlar metodu ile incelemiş ve geniş deneyler sonucunda en uygun model tespit edilmiştir.

Basit bir model üzerinde gerilme dağılımları tahmin edilerek bağlantı durumları geliştirilebilir. Gerçek uygulama sırasında uygulanan potansiyel enerji ile

gerilmelerin nerelerde oluştuğu bulunur ve yapıştırıcı kalınlığı arttırılarak gerilme değerlerinde azalma görölmektedir (Nemes vd., 2005).

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

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

Moura ve diğerleri (2005) yaptıkları çalışmada epoksi yapıştırıcıların mekanik davranışları incelenmiştir. Gerilim dağılımları sonlu elemanlar metodu ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda bindirme uzunluğundan kaynaklanan eşit olmayan gerilme yığılmaları oluştuğu görölmektedir.

Fitton ve Broughton'un (2004) yaptığı çalışmada değişik modüllü yapıştırıcılar kullanılarak bağlantı performansı optimize etmeye çalışmışlardır.

AMAÇ ve KAPSAM

Bu çalışmada değişik yapıştırma bağlantılarının sonlu elemanlar metodu ile gerilme durumları incelenmiştir. Analizlerde farklı yöndeki gerilmeler dikkate alınmıştır. Ayrıca analizler Franc 2DL program yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Kısaca analiz işlemleri şu basamaklardan oluşur:

- 1) Belirlenen parçaların geometrileri Casca programı yardımı ile oluşturulup, ağ yapısı elde edilir.
- 2) Franc programı açılarak burada malzeme özellikleri ve gerekli sınır şartları girilir.
- 3) Sınır şartları belirlenen geometrinin çözümüne geçilir.
- 4) Elde edilen gerilme sonuçlarına göre grafikler oluşturulur ve sonuçlar yorumlanır.

Analizler sırasında;

- Levha açısı; 15°, 30°, 45°, 60° ve 90°,
- Yapıştırma kalınlığı; 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 ve 3mm,
- Elastisite modülü; 20, 50 ve 100 GPa

olarak alınmıştır.

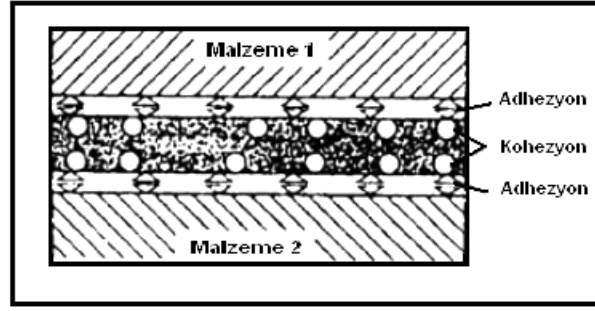
3. YAPIŖTIRMA BAĞLANTILARI

Kaynak ve lehim; ısının yardımıyla yapılan ve genellikle metalik parçalara uygulanan çözülemeyen bağlama yöntemleridir. Bu yöntemlerde ısı önemli Ŗekil deđiŖtirmeler meydana getirmektedir; bu husus özellikle boyutları küçük olan hassas cihazlarda istenilmeyen bir olaydır. Ayrıca modern teknikte metal olmayan malzemeler gittikçe daha çok kullanılmaktadır. Malzemeler için yapıŖtırma, macunlama ve gömme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler özellikle yapıŖtırma metalik parçalar için de kullanılmaktadır (Akkurt, M., 1997).

YapıŖtırma bağlantısı iki parçanın genellikle sentetik esaslı bir malzeme (yapıŖtırıcı) ile çözülemeyecek Ŗekilde birleŖtirilmesiyle elde edilir. Parçalar arasında çok ince bir tabaka teŖkil eden yapıŖtırıcı çok defa kimyevi reaksiyonlar sonucu makro moleküllerin oluşması ile sertleŖir ve gerek kendi iç mukavemeti ve gerekse parça yüzeylerine yapıŖması ile (adhezyon ve kohezyon kuvvetleri) etki eden dış kuvvetlerin karŖılanmasını sağlar (GediktaŖ, M., 1995).

YapıŖtırma bağlantıları, bazı yapıŖtırma malzemelerinin geliŖtirilmesiyle son zamanlarda daha da önem kazanmıŖtır.

Bağlantının mukavemeti iki ana olaya bağlıdır. Birincisi, yapıŖtırıcı maddenin molekülleriyle birbirine bağlanan parçaların yüzeyleri arasında meydana gelen ve fiziksel ve kimyasal bir nitelik taşıyan “adhezyon” olayıdır. İkincisi ise yapıŖtırıcının iç mukavemetini tayin eden yapıŖtırıcı moleküllerinin kendi aralarındaki bağ kuvvetini anlamına gelen “kohezyon” olayıdır (Ŗekil 3.1) (Rende, H., 2000).



Şekil 3.1 Yapıştırma bağlantısında “adhezyon” ve “kohezyon” (Rende, H., 2000).

Kağıt, kösele, deri, odun, ahşap, lastik ve keramik malzemenin birleştirilmesinde yapıştırma metodu çok eski zamanlardan beri kullanılmaktadır. Metal parçalarda yapıştırma bağlantısı ise geniş ölçüde ilk defa II. Dünya Savaşı sırasında uçak inşaatında kullanılmaya başlanmıştır. Al alaşımları gibi bazı malzemelerde diğer bağlantı şekillerinin uygulanmasındaki güçlükler, yapıştırma için tercih sebebi olmuştur. Son yıllarda kimya sanayindeki ilerlemeler sonucu birçok yeni yapıştırıcıların üretilmesi gerçekleştirilmiş ve yapıştırma bağlantılarının uygulama alanı çok genişlemiştir. Özellikle hafif maden konstrüksiyonlar, saç levhaların takviyesi, boru, mil ve göbek bağlantıları uygulama örnekleri olarak gösterilebilir. Uygun bir yapıştırıcı kullanıldığı takdirde farklı malzemeleri de iyi bir şekilde birleştirmek mümkündür. Örneğin özellikle son yıllarda fren balataları, fren pabuçlarına perçinleme yerine yapıştırma yolu ile tespit edilmektedir. Kimyevi tesirlere dayanıklı olan birçok plastik malzemenin birbirleri ile veya madeni bir parça ile birleştirilmesi ancak yapıştırma yolu ile mümkün olabilmektedir.

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, M., 1995).

3.1 Yapıştırıcı Çeşitleri

Yapıştırma malzemesi olarak dünyada çeşitli tipte yapıştırma kullanılmakta olup muhtelif isimler (araldit, redux) ve semboller (404) altında tanımlanmaktadır. Metallerin bağlanması için kullanılan yapıştırıcıların ana malzemesi fenol, epoksit, polyester, metallon ve akril reçineleri gibi suni reçinelerdir.

Genel olarak yapıştırma malzemeleri oda sıcaklığında katılaştırılan Soğuk yapıştırıcılar ve 80°-200°C arasında katılaştırılan sıcak yapıştırıcılar olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Sıcak zamlar ile yapılan yapıştırma basınçlı veya basınçsız olarak gerçekleştirilebilir. Soğuk yapıştırıcılar genellikle yapıştırıcı ve katılaştırıcı olmak üzere iki bileşenden meydana gelir. Sıcak yapıştırıcılar ise, katı halinde bulunur ve tek bileşenlidir. Yapıştırıcılar katı, pasta veya toz halinde bulunabilirler (Akkurt, M., 1997).

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.

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 (Bozacı, A., 2000).

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. Çizelge 3.1 ve 3.2’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, M., 1995).

Çizelge 3.1 Önemli Yapıştırıcılar (Gediktaş, M., 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 Desmocoll	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.

Çizelge 3.2 Bazı Yapıştırıcıların Özellikleri (Gediktaş, M., 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
Plastphenal	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

3.1.1 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.

3.1.2 Fiziksel Özelliklerine 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 yapılma temiz ve basit olarak sağlanır.

3.1.3 Sertleşme Durumuna Göre Sınıflandırma

Yapıştırıcılar, katılma olayına göre üç ana grupta sınıflandırabiliriz.

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

b)Termoplastik yapıştırıcılar: Isıtılınca sıvılaşır ve soğutulunca katılır. 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.

c) 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 özölmezlik özelliklerine sahiptirler. Sıcaklık direnci veya sıyrılma dayanımı gibi özellikleri geliştirmek için oluşturulabilirler.

3.1.4 Yapıştırma Sıcaklığına Göre Sınıflandırma

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

a) Soğuk yapıştırıcılar: 20° C'in 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.

3.1.5 Ana Elemanın 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.

Termoplastiklerden en çok kullanılan sıcak-eriyik yapıştırıcılardır. Bunlar ambalaj sanayi, mobilya ve ayakkabı imalatında kullanılmaktadır. Sıcak-eriyik yapıştırıcıları, şerit film, toz, çubuk, hap ve külçe şeklinde bulunurlar. Uygulama için kendilerini yumuşama noktasının üzerine kadar ısıtan özel sistemler gerekir. Polietilen, vinilpolimerleri ve kopolimeri ve poliamidler bu tür yapıştırıcıların formülasyonlarında önem sahibidirler. Çünkü bunlar yapıştırıcıların sıvı durumunda yüksek yapışkanlık özellikleri kazandırır, üretim hızı yüksek olan uygulamalarda özellikle tercih edilirler. Sıcaklık ile sertleşen yumuşatılmış polivinil klorür esaslı plastisol yapıştırıcılar otomotiv endüstrisinde yapısal olmayan uygulamalar için kullanılır. Bu yapıştırıcılar ekseriyetle boya kurutma işlemi sırasında sertleşirler. Avantajları yağlı olan malzemelerde ön temizliğe gerek duyulmaksızın uygulanabilmeleridir.

c) Elastomerler: Elastomerik yapıştırıcılar doğal ve sentetik kauçuk esaslı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Çift polimer türü yapıştırıcılar için modife edici olarak da kullanılırlar. Genel olarak elastomerlerin dayanımları çok düşük ama esneklik özellikleri iyidir, çalışma sırasında yüksek gerilmelere maruz kalmayacak kağıt, kum ve kauçuk gibi malzemelerin yapıştırılmasına kullanılırlar. Termoplastik gibi bunlar da ısıyla yumuşarlar 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 yeni formülasyonlarda önem kazanır. Bu nedenle polibutilen ve silikon kauçuklar basınca duyarlı şeritlerin imalinde kullanılır. Silikon kauçukların nispi olarak düşük kohesiv dayanımı göstermelerine rağmen 250°C'nin üzerine kadar iyi sıcaklık dirençleri ve mükemmel dielektrik özellikleri vardır.

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.

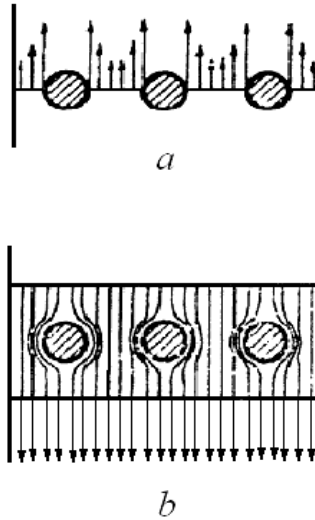
e) Çifte Polimerler: Termoset reçinelerin elastomerlerle veya termoplastiklerle karıştırılmalarıyla oluşturulurlar. Böylece, karışımın her bir elemanın ayrı ayrı var olan sınırlayıcı özellikleri geliştirilmiş veya yeni üstün özellikleri kazandırılmış olur. Mesela reçineler elastomerlerle, sıcaklık direncini geliştirmek; termoplastik ve kauçuklar ise, termosetlerle esnekliği arttırmak için karıştırılır, aksi takdirde kırılgan 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.

Bu gruplardan herhangi birinden, uygun bir yapıştırıcının seçiminde birçok faktörlerin göz önünde tutulması gerekir; örneğin yapıştırılan parçaların malzemesi, şekli ve boyutları, zorlanmanın şekli (dinamik, statik), gerilmelerin cinsi (kesme, çekme, basma, sıyırma), kullanma sıcaklığı ve kimyevi etkilere maruz kalıp kalmama gibi (Minez, B., 2000).

3.2. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Bağlantılarla Karşılaştırılması

Perçin bağlantılarında, Şekil 3.2’de görüldüğü gibi gerilme yayılımı düzgün değildir. Perçin delikleri kesiti küçülttüğü gibi çentik etkisi sebebiyle delik kenarlarında tehlikeli olabilecek gerilme tepeleri meydana gelir. Bindirme perçin bağlantılarında, kuvvetin parçaların tam ortadan etkilememesi sebebiyle bir eğilme momenti oluşur ve parçalar deforme olabilir. Bu nedenle hesaplarda perçin diziliş şekline göre ana malzeme mukavemetinde % 15-30 kadar bir azalma kabul edilir.

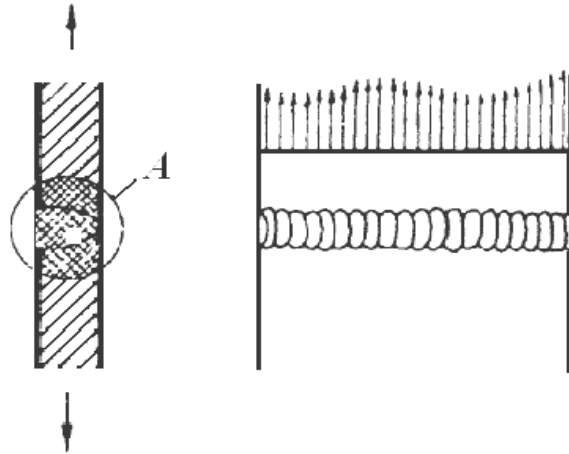


Şekil 3.2 Perçin bağlantısında gerilme dağılımı (Gediktaş, M., 1995).

a. Gerilme yayılımı b. Kuvvet akışı

Konstrüktör, bağlantıyı bu durumda daha büyük dolayısıyla da daha ağır yapmak zorunda kalır. Bundan başka perçin bağlantılarında sürekli mukavemet değerleri düzgün olmayan gerilme yayılışından ötürü düşük olur. Ayrıca farklı malzemelerin birleştirilmesinde korozyon problemi ve ısıl genleşme katsayıları perçin bağlantılarının kullanımının sınırlılıklarıdır. Uçak imalatında perçin başlarının ve ortaya çıkardığı mahzurlarda unutulmamalıdır.

Kaynak bağlantılarında parçalara uygun şekil verme ve yerleştirme imkanları malzemedan iyi bir şekilde istifade edip iyi bir bağlantı yapmayı mümkün kılar. Ancak, kaynak yapma sırasında malzemenin ergimesi ve donması bölgesel ısıl zorlanmalara ve kristal yapıda değişimlere sebep olur, kaynak dikişinde döküm yapısı elde edilir. Soğuma sırasında meydana gelen çekmeler, iç gerilmeler, yapıda bulunabilecek kaynak hataları mukavemet değerlerinde bir azalma ve bağlantıda Şekil 3.3'de görüldüğü gibi düzgün olmayan bir gerilme yayılışına sebep olurlar. Kaynak dikişlerinin kontrolü zordur ve emniyet gerilmesi kaynak kalitesine bağlı olarak çok farklı değerlerde olur.



Şekil 3.3 Bir kaynak bağlantısında gerilme yayılışı

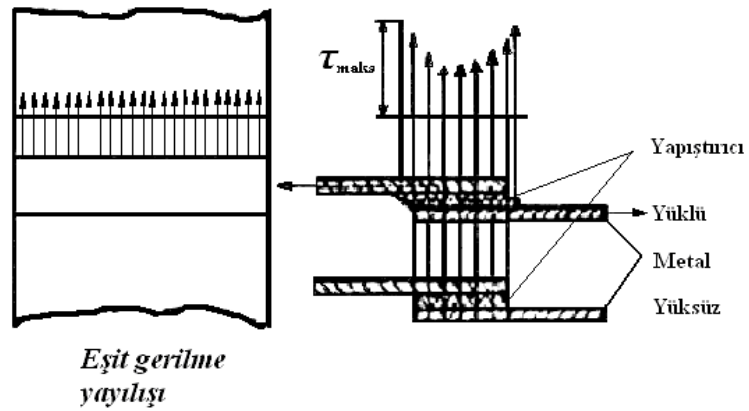
A: Bölgesel kristal yapı değişimi (Gediktaş, M., 1995).

Kaynak bağlantılarının kullanılmasını sınırlayan en önemli faktörlerden biri de yalnız aynı cins malzemenin birbiriyle kaynak edilebilmesidir.

Lehim Bağlantıları ile farklı malzemeleri birleştirmek mümkün olup termik etkiler de kaynak bağlantılarındaki kadar büyük değildir. Lehim, bağlanan parçalardan daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Bununla beraber, bilhassa sert lehimlemede kristal yapıda değişimler olması ve parçalarda çekme meydana gelmesi mümkündür. Lehimin mukavemeti bağlantının şekline ve lehime önemli derecede bağlıdır. Farklı malzemelerin lehimlenmesinde yüzeyden iyi temizlenmeyen dekapan artıkları ve rutubet sebebiyle korozyon tehlikesi vardır. Hafif madenlerin lehimlenmesi ise özel problemler doğurur.

Yapıştırma bağlantılarında, diğer bağlantı şekillerinin yukarıda sayılan sakıncaları yoktur. Ancak yapıştırma bağlantısının diğer bağlantıların yerine geçen bir bağlantı şekli olarak değil, onların etkili olmadığı veya uygulanmadığı hallerde kullanılan, bağlama elemanları grubunu tamamlayan bir bağlantı grubu kabul etmek gerekir.

Yapıştırmada büyük bir termik ve mekanik zorlanma olmadan bağlantının yapılabilmesi önemli bir avantajdır. Bu sebeple bağlanan parçalar kendi özelliklerini muhafaza ederler. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi bağlantıda iç gerilmeler söz konusu değildir veya azdır. Yük altında ise, Şekil 3.4'te görülen gerilme dağılımı elde edilir.



Şekil 3.4 Yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımı

(Gediktaş, M., 1995).

Yük yönündeki gerilme yayılışı ile yük yönüne dik doğrultudaki gerilme dağılımı farklıdır. Şekildeki bağlantıda, saçların deformasyonu ve (bindirme bağlantı sebebiyle) kuvvetin oluşturduğu momentten ötürü bağlantının uç kısımlarında gerilmeler daha büyüktür.

Yapıştırma maddelerinin genellikle mukavemetleri düşük olmaktadır. Bunun için geniş yüzeyler seçilmelidir. Bu durum ve yapıştırıcıların kimyasal ve termik etkilere karşı hassas olması bu bağlantı şeklinin dezavantajları olmaktadır. Bundan başka yapıştırma için yerine göre özel aparatlar ve ısıtmak için de uygun ısı kaynakları gerekebilir. Bunlar ise maliyeti arttırıcı etki yaparlar (Gediktaş, M., 1995).

3.3. Yapıştırma Bağlantılarının Kullanılma Nedenleri

Yapıştırma, diğer çözülmeyen bağlantı elemanlarını tamamlayıcı olmak üzere:

a) Diğer malzeme birleştirme yöntemlerinde (kaynak lehim gibi) ısı etkisi nedeniyle meydana gelen kusurlar (molekül yapısındaki değişimler, 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 metallerle 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, İ., 1990).

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 madenler) yapıştırma yoluyla iyi bir şekilde birleştirilebilirler.

Aşınmaya maruz kalan malzemelerinin (fren ve debriyaj balataları gibi) bir çok hallerde yapıştırma yolu ile daha iyi ve daha ekonomik bir şekilde birleştirmek mümkündür (Gediktaş, M., 1995).

3.4. Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları

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

- En büyük dezavantajı sıcaklığın etkisidir.
- Yapıştırma işlemi esnasında yüzeyler tamamıyla yapıştırıcı ile kaplanmayabilir, bu da etkili yapıştırma alanının azalmasına neden olarak mukavemeti düşürür.
- Bazı yapıştırıcılar neme ve kimyasal ortamlara karşı hassastırlar. Böyle ortamlarda bulunmaları durumunda zamanla mukavemetlerinde azalma meydana gelmektedir (Tezcan Ş.,2001).
- Uzun olan sertleşme süreleri nedeni ile optimum birleşme dayanımı hemen gerçekleşmez.
- Farklı ısıl genleşmelerden dolayı oluşan sıyrılma ve çekme-makaslama dayanımı minimuma indirmek için bağlantı dizaynı özenle yapılmalıdır.

- Perçinli, kaynaklı ve lehimli bağlantılar yüksek sıcaklıklarda kullanılmasına rağmen yapıştırma bağlantılarının yüksek sıcaklıklarda kullanılmasında sınırlamalar vardır.
- Bazı uygulamalarda ön hazırlık çalışmaları ek iş ve maliyet yükü getirmektedir.
- Genelde zor çalışma şartlarında uzun süre dayanıp dayanamayacağı bilinmez. Ayrıca yapıştırma bağlantılarının tamir için sökülmesi zordur.
- Katkılarla geliştirilmedikçe çoğu yapıştırıcıların ısı ve elektrik iletkenliği çok zayıftır.
- Yapıştırılan malzemelerle uygun düşmeme durumunda korozyon tehlikesi olabilir.
- Yanma veya zehirlenme gibi tehlikeler, çözücü esaslı yapıştırıcıların kullanılması durumunda ortaya çıkabilir (Minez B., 2000).

3.5. Yapıştırma İşlemi

Teknoloji bakımından yapıştırma işlemi aşağıda gösterilen bazı işlem sıralarından geçmektedir.

a. Ön hazırlık: Yapıştırılacak yüzeyler işlenir ve temizlenir. Yüzeyin pürüzlülüğü ve temizliği, bağlantının mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir.

b. Yapıştırıcının hazırlanması: İki bileşenli yapıştırıcılarda yapıştırıcı ve katılaştırıcı bileşenler yapıştırma işleminden önce birbirine karıştırılır. Bu şekilde hazırlanan yapıştırıcılar bir süre bekletilir veya derhal yüzeylerin üzerine sürülür.

c. Yapıştırıcının yüzeylere sürülmesi cinsine göre fırça veya tabanca ile yapılır. Burada dikkat edilecek husus yapıştırıcı tabakasının çok ince (0,1 - 0,3 mm) olmasıdır.

d. Yapıştırıcı sürüldükten sonra parçalar bir süre bekletilir. Yapıştırıcı cinsine bağlı olan bu süreler imal eden firmalar tarafından belirtilir.

e. Parçalar yapıştırıcının cinsine bağlı olmak üzere basınç altında veya basınçsız olarak birbirleri ile temas ettirilir. Bu işlem 5 dakika ile 1 saat arasında değişir. Yapıştırmanın başarılı olması büyük ölçüde teknolojik işlemlere bağlıdır (Akkurt, M., 1990).

3.5.1. Yapıştırma Yüzeyinin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantısının mukavemetinin yüksek olması için yapıştırılacak yüzeylerin uygun şekilde hazırlanmalıdır. Bir yapıştırma bağlantısında;

a) Adhezyon kuvvetleri

b) Yüzey pürüzlülükleri

kuvvet iletilmesinde etkili olan en önemli faktörlerdir. Esas itibariyle yapıştırıcının yüzeye bağlantısı, adhezyon kuvvetleri (moleküler kuvvetler) sonucu olmaktadır. Bu kuvvetler çok defa yapıştırıcının kendi mukavemetinden daha büyüktür. 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. Bu tabakaların uygun bir metotla mümkün olduğu kadar temizlenmesi gerekir.

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).

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, M., 1995).

3.5.2. Ön Hazırlık Çalışmaları

Yüzeylerin hazırlanması: 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, A., 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 kapta (fazla kirlenmemiş eriyikle) ikinci bir defa daha yıkanmalıdır.

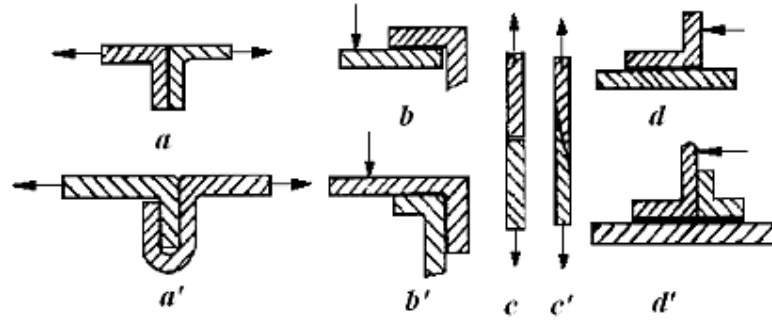
Yüzeylerin pürüzlendirilmesi zımparalama veya kum püskürtme ile yapılabilir. Tane büyüklüğü 100 (0 veya 2-0) veya biraz daha ince olan zımpara kağıdı kullanılmalı ve yüzey, zımpara izleri çeşitli yönlerde olacak şekilde hazırlanmalıdır. Kum püskürtme yapılıyorsa ince kum kullanılmalıdır. Pürüzlendirilen 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, M., 1995).

3.5.3. Parçaların ve Sıkıştırma Düzeneklerinin Hazırlanması

Bağlantının yük taşıma kabiliyeti yapışma alanının büyüklüğüne ve yapıştırıcı tabakasının inceliğine bağlıdır. Bu nedenle parçalar öncelikle amaca uygun olarak, düzgün ve ince bir yapıştırıcı tabakası verecek şekilde hazırlanmalıdır. Büyük saç parçalar presle düzeltilmelidir. Geçme parçalar arasında yeterli boşluk kalmalı, parçaların birbirine göre konumları korunmalıdır.

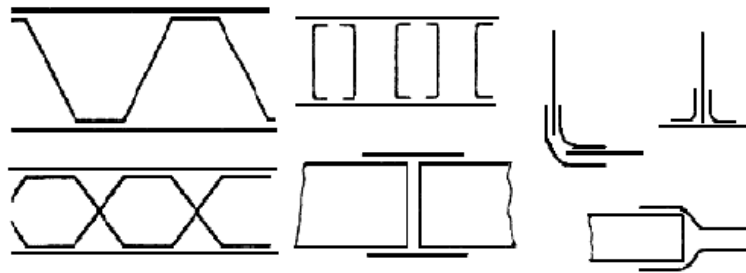
Parçalar (levhalar) yapıştırma İşlemine hazırlanırken temel kural yapışma düzleminin kaymaya zorlanmasını sağlamaktır. Bu amaçla saclardan birine veya ikisine uygun kıvrırma ve katlamalar verilerek bağlantının doğrudan çekme veya ayrılma etkisinde kalması önlenmelidir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 Uygun bağlantı türleri (a, b, c, d, yanlış a', b', c', d' doğru)

(Bozacı, A., 2000).

Saçlara kıvrırma ve katlamalar verilerek yapılan takviyeler, kaburga ve petekler hem yapışma alanını büyütür hem de konstrüsiyona rijitlik kazandırır (Şekil 3.6). Sertleşmeye terk edilen bağlantıda parçaların birbirine bastırılması gerekiyorsa pres veya üniform basma düzenekleri hazırlanır (Bozacı, A., 2000).



Şekil 3.6 Kaburga ve petek takviyeler (Bozacı, A., 2000).

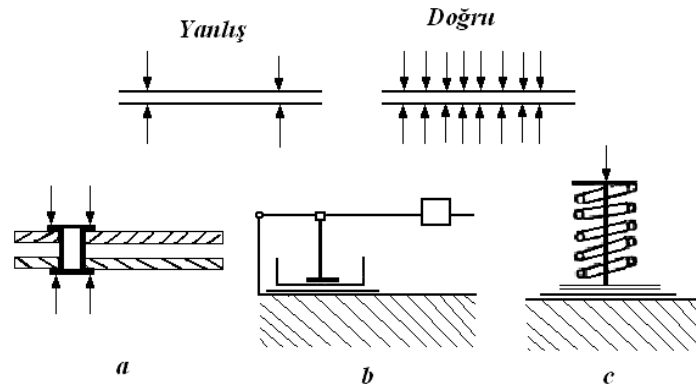
Yapıştırma bağlantısının mukavemeti yapıştırılacak parçaların maksada uygun olarak, itinalı bir şekilde hazırlanmasına sıkı bir şekilde bağlıdır.

Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı 0,1 – 0,2 mm arasında olduğu taktirde mukavemet (kuvvet taşıma kabiliyeti) en fazla olmaktadır. Homojen olarak dağıtılmış, ince bir yapıştırıcı tabakası elde edebilmek için yapıştırılacak parçaların birbirine iyi bir şekilde uyması veya düz olması gerekir. Pres edilmiş saç parçalarında bulunması muhtemel çapaklar temizlenmelidir. Büyük saç parçalarında ise çok defa düzeltme işlemine ihtiyaç vardır. Böyle büyük parçalarda özellikle şekil verildikten sonra belirli iç gerilmeler meydana gelir. Bu gibi parçalar yapıştırma için uygun değildir.

Eğer bunlar yüzey düzgünlüğünü telafi için büyük basınçlar altında yapıştırılınca, çok defa bağlantının bu iç gerilmeler sonucu hemen veya bunun etkisi ile ufak dış kuvvetlerde kırıldığı görülür. Yapıştırılacak saç parçaların düzgün, iç gerilmenin az olması ve yapıştırma yüzeylerinin de birbirine uyması gerekir.

Boru ve geçme bağlantılarında, gerekli boşluk bırakılmalıdır. Bu boşluk 0,1 – 0,3 mm arasında olmalıdır. Yuvarlak parçaların bağlantısında, parçaların konumlarını kolaylıkla ayarlayabilmek için fatura yapılması gerekebilir.

Yapıştırıcının sertleşmesi sırasında parçaları birbirine bastırmak gerekiyorsa, örneğin Şekil 3.7’de görüldüğü gibi üniform bir basma sağlamak için gerekli tertibatlar kullanılmalıdır (Gediktaş, M., 1995).



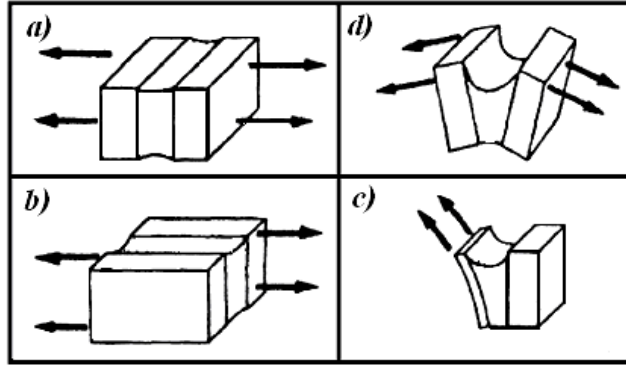
Şekil 3.7 Yapıştırılan parçaların sıkıştırılması (Gediktaş, M., 1995).

a. Tespit perçini, b. Manivela prensibi, c. Yay prensibi.

Yapıştırma bağlantısının başarısı yapıştırıcının yüzeye bağlanması, yani adhezyon kuvvetlerinin (moleküler kuvvetler) büyüklüğüne bağlıdır. Bu kuvvetler çok defa yapıştırıcının kendi mukavemetinden daha yüksektir. Bu nedenle kopma, yapıştırıcı ile yüzey arasında değil bizzat yapıştırıcıda meydana gelmektedir. Yapıştırıcının yüzeye iyi yapışması yüzeyin durumuna bağlıdır. Yapıştırılacak yüzeyler işlenir ve temizlenir. Ancak yüzey parlatılmaksızın bir miktar pürüzlü bırakılır. Pürüzler bağlantının mukavemetine büyük etki yapar. Yapıştırıcı madde iki bileşenli ise birbirine karıştırılarak hazırlanır. Yapıştırıcı kalınlığı $h = 0,1-0,3$ mm arasında olmalıdır (Cürgül, İ., 1990).

3.5.4. Yapıştırma Bağlantılarının Maruz Kaldığı Kuvvetler

Yapıştırma bağlantıları, mümkün olduğu kadar kayma gerilmelerine maruz kalacak tarzda şekillendirilmelidir. Çekme gerilmeleri bu bağlantı şekli için uygun bir zorlama değildir. Şekil 3.8’de yapıştırma bağlantılarının maruz kaldığı kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Yapıştırma bağlantılarında farklı kuvvet uygulamaları

(Rende, H., 2000).

a) Çekme gerilmesi; yapıştırıcının çekme mukavemeti az olduğundan dolayı, mümkünse önlenmelidir.

b) Kesme gerilmesi; yapıştırma bağlantıları için uygundur.

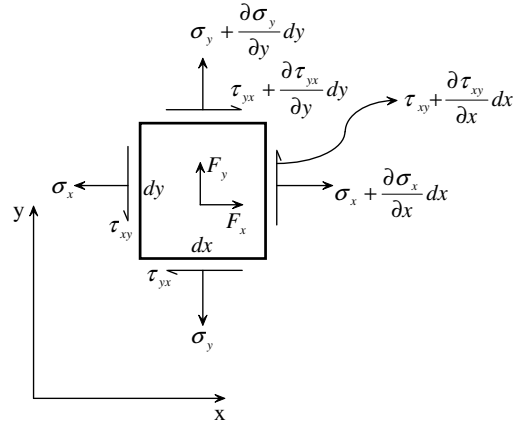
c) Ayrılma; kuvvetler tek taraflı etki ettiğinden önlenmelidir.

d) Ayırma; bu da uygun olmadığından dolayı önlenmelidir (Rende, H., 2000).

4. GERİLME ANALİZİ KRİTERLERİ

4.1 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. Şekil 4.1’de iki boyutlu olarak gösterilen dy ve dx boyutlarında ince bir gerilme elemanı verilmiştir. Burada $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{yx}$ ve τ_{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 4.1 Kartezyen koordinatlarda gerilme elemanı

(Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

Şekil 4.1’de gösterilen iki boyutlu gerilme elemanındaki gerilme değişimi kısaltılmış Taylor eşitliği ile,

$$\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \quad (4.1)$$

yazılabilir. σ_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,

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dx dy \right) \frac{dx}{2} - \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx dy \right) \frac{dy}{2} + \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) dx dy \\ & - \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dy + F_y dx dy \frac{dx}{2} - F_x dx dy \frac{dy}{2} = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

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

$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dy - \sigma_x dy + \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx - \tau_{xy} dx + F_x dx dy = 0 \quad (4.3)$$

şeklinde yazabiliriz. Bazı kısaltmalarla,

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x \right) dx dy = 0 \quad (4.4)$$

yazılabilir. Benzer eşitlik y için yazıldığında,

$$\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y \right) dx dy = 0 \quad (4.5)$$

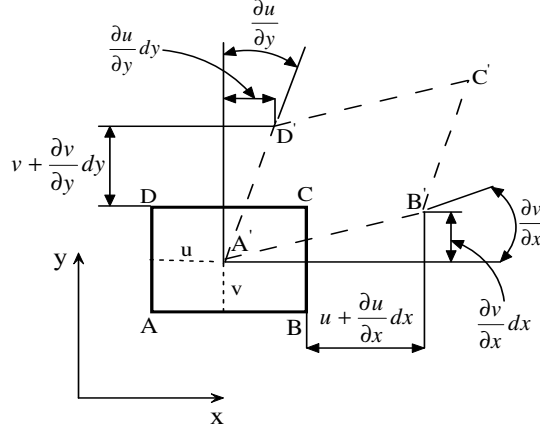
elde edilir. Bu çözümlerle birlikte iki boyutlu bir gerilme elemanı için x ve y yönlerindeki diferansiyel eşitlikler,

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + F_x = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + F_y = 0 \quad (4.7)$$

ile ifade edilir. Eşitlik (4.6) ve (4.7) x ve y yönlerindeki gerilme durumlarını göstermektedir.

4.2 Gerilme Şekil Değişirme İlişkileri



Şekil 4.2 İki boyutlu elemanda şekil değişirme ilişkisi
(Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

Şekil 4.2’de gösterilen u ve v deplasmanları ile x ve y yönündeki şekil değişirme ifadeleri,

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}\end{aligned}\quad (4.8)$$

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

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\quad (4.9)$$

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

$$\{\sigma\} = [Q]\{\epsilon\}\quad (4.10)$$

vektörel biçimde gösterilir. Gerilme ilişkisini vektörel biçimde gösterecek olursak,

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.11)$$

ile ifade edilir. Şekil değiştirme ilişkisini ise,

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.12)$$

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

$$[Q] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilir (Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

4.3 Eşdeğer Gerilme (Von Mises)

Eşdeğer gerilme, çekme deneyinde akma sınırındaki çarpılma enerjisinin, kabul edilen gerilme durumundaki çarpılma enerjisine eşit olması durumu ile elde edilir. Çekme işleminde çarpılma enerjisi ifadesinde akma gerilmesi yerine σ_e yazılarak göz önüne alınan gerilme durumuna ait çarpılma enerjisine eşitlendikten sonra elde edilen σ_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 (4.14) bu ilişkinin formüle edilmiş halidir.

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) = 2\sigma_{yp}^2 \quad (4.14)$$

yada başlıca şartlardaki asal gerilme,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_{yp}^2 \quad (4.15)$$

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

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_{yp}^2 \quad (4.16)$$

olur. Ya da alternatif olarak,

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{yp}}\right) - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{yp}}\right)\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) = 1 \quad (4.17)$$

olur. İki boyutlu durumdaki Von Mises eşdeğer yada efektif gerilmesi,

$$\sigma_e = (\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (4.18)$$

olarak kullanılır (Uğural ve Fenster, 1995).

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

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.

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 olabilmiştir.

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 M. ve Taşgetiren S., 1998).

5.1 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 gerçekleştirilecek 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 (ağlı yapı) oluşturulur.
- f) Casca programı .inp formatında kaydedilen meshli yapı 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.

5.2. İki Boyutlu Problem

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

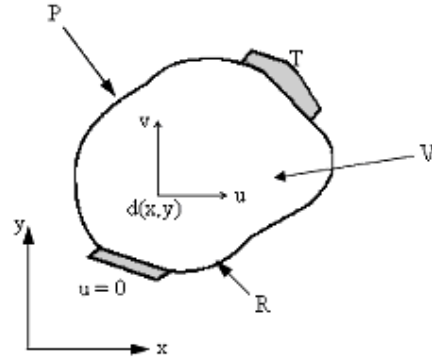
Yer değiştirme, yüzey kuvvetleri, yayılı kütle kuvvetleri ve tekil kuvvet bileşenleri (x,y) ile verilen koordinatın fonksiyonlarıdır. Yer değiştirme vektörü {u},

$$\{u\} = [u, v]^T \quad (5.1)$$

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

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \lambda_{xy}]^T \quad (5.2)$$

şeklinde olup σ gerilme, ε ise birim şekil değiştirmedir. Şekil 5.1'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 5.1 İki boyutlu problem (Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

$$\text{Kuvvet} \quad \{f\} = [f_x, f_y] \quad (5.3)$$

$$\text{Kütle} \quad \{T\} = [T_x, T_y] \quad (5.4)$$

$$\text{Hacim} \quad dV = t \cdot dA \quad (5.5)$$

'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,

$$\{\varepsilon\} = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{dv}{dy}, \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (5.6)$$

olarak verilir. Gerilmeler ve şekil değiştirme arasındaki ilişki ise,

$$\{\sigma\} = [D], \{\varepsilon\} \quad (5.7)$$

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

5.3 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.

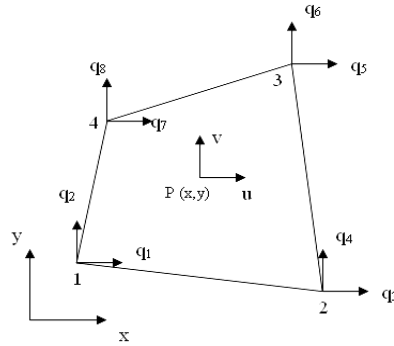
Şekil 5.2’de dört düğümlü dörtgen eleman verilmiştir. Lokal düğüm numaraları saat ibresinin ters yönünde 1, 2, 3, 4 şeklinde verilmiş olup ve düğüm koordinatları, i düğümü için (x_i, y_i) ’dir. Düğüm deplasman vektörü,

$$\{q\} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8]^T \quad (5.8)$$

’dir. Eleman içindeki P noktasının deplasmanları ise,

$$\{u\} = [u(x, y), v(x, y)]^T \quad (5.9)$$

şeklindedir.



Şekil 5.2 Dört düğümlü dörtgen eleman (Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

Şekil fonksiyonları öncelikle doğal koordinatlardaki bir temel eleman üzerinde geliştirilir. Temel eleman (r,s) doğal koordinatlardaki düzgün bir kare olarak tanımlanabilir (Şekil 5.3). 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;

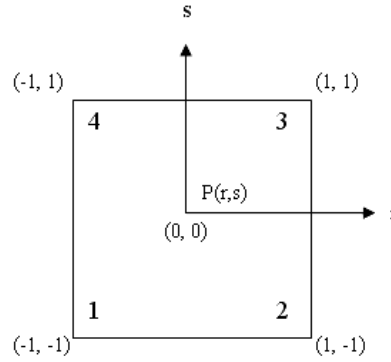
1. düğümde $N_1 = 1,$

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

$$N_1 = c(1-r)(1-s) \quad (5.10)$$

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



Şekil 5.3 Doğal koordinatlardaki temel eleman (Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

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

$$1 = c(2)(2) \quad (5.11)$$

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

$$N = \frac{1}{4}(1-r)(1-s) \quad (5.12)$$

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

$$N_i = \frac{1}{4}(1 + rr_i)(1 + ss_i) \quad (\text{şekil fonksiyonu}) \quad (5.13)$$

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

$$u = N_1 q_1 + N_2 q_3 + N_3 q_5 + N_4 q_7 \quad (5.14)$$

$$v = N_1 q_2 + N_2 q_4 + N_3 q_6 + N_4 q_8 \quad (5.15)$$

olarak yazılabilir. Matris formunda ise,

$$\{u\} = [N]\{q\} \quad (5.16)$$

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

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

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

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4 \quad (5.18)$$

$$y = N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \quad (5.19)$$

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;

$$\frac{\partial f}{\partial r} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial r} \quad \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \quad (5.20)$$

yazılır. Matris notasyonu ile J jakobiyen matrisi olmak üzere,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial r} \\ \frac{\partial f}{\partial s} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.21)$$

yazılır. Jakobiyen matrisi ise

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial r} \\ \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

şeklindedir. Buradan

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

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

elde edilir. f fonksiyonu yerine şekil fonksiyonlarını yazarsak

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (5.24)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.25)$$

yazılır. Buda,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} \\ \frac{\partial N}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N}{\partial r} \\ \frac{\partial N}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.26)$$

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

$$dA = dx dy = \det J dr ds \quad (5.27)$$

şeklinde verilen bir ilişki vardır. Bu ilişki eleman rijitlik matrisi hesaplarında sıklıkla kullanılacaktır.

5.4 Eleman Rijitlik Matrisi

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

$$U = \int_v \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\epsilon\} dV \quad (5.28)$$

şeklindedir. Kalınlık sabit alınır ve eleman boyutunda yazılırsa,

$$U = \sum_e t_e \int_e \frac{1}{2} \{\sigma\} \{\epsilon\} dA \quad (5.28)$$

olur. Şekil değiştirme-yer değiştirme ilişkisi ise,

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (5.29)$$

şeklindedir. Buradan $f = u$ alınır,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.30)$$

olur, aynı şekilde v için de,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.31)$$

yazılır. (5.29) (5.30) ve (5.31) eşitliklerinden,

$$\{\varepsilon\} = [A] \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \\ \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} \quad (5.32)$$

elde edilir. Burada $[A]$,

$$[A] = \frac{1}{\det J} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -J_{21} & J_{11} \\ -J_{21} & J_{11} & J_{22} & -J_{12} \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

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

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{\partial u}{\partial s} \\ \frac{\partial v}{\partial r} \\ \frac{\partial v}{\partial s} \end{Bmatrix} = [G] \{q\} \quad (5.34)$$

yazılabilir ki burada $[G]$

$$[G] = \frac{1}{4} \begin{vmatrix} -(1-s) & 0 & (1-s) & 0 & (1+s) & 0 & -(1+s) & 0 \\ -(1-r) & 0 & -(1+r) & 0 & (1+r) & 0 & (1-r) & 0 \\ 0 & -(1-s) & 0 & (1-s) & 0 & (1+s) & 0 & -(1+s) \\ 0 & -(1-r) & 0 & -(1+r) & 0 & (1+r) & 0 & (1-r) \end{vmatrix} \quad (5.35)$$

şeklinde elde edilir. Şekil değiştirme ve yer değiştirmeler matris formunda $\{\varepsilon\} = [B]\{q\}$ olarak verildiğinden (5.32) ve (5.34)'den $[B] = [A][G]$ olarak elde edilir. Diğer taraftan $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$ olduğundan eleman içindeki gerilmeler,

$$\{\sigma\} = [D][B]\{q\} \quad (5.36)$$

olur. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi ifadesini,

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \{q\}^T \left[t \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det J dr ds \right] \{q\} \quad (5.37)$$

şeklinde yazılabilir. Bu da,

$$U = \sum_e \frac{1}{2} \{q\}^T [k]_e \{q\} \quad (5.38)$$

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

$$[k]_e = t \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D][B] \det J dr ds \quad (5.39)$$

şeklinindedir. Eleman rijitlik matrisi (8×8) boyutundadır. $[B]$ ve $[J]$; r ve s'ye bağlı olduklarından gerekli integraller nümerik olarak yapılacaktır (Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

6. ANALİZ SONUÇLARI

6.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar ile yapılan nümerik inceleme teknikleri; emniyetli, ekonomik ve performanslı bir yapıdır. Bağlantısının dizayn edilmesinde önemli bir araçtır. Ama birleşme bölgesi çok karmaşık ve çok farklı malzemelerden oluşan birleşmelerin nümerik inceleme teknikleri ile incelenmesinde matematiksel olarak gerçek çözümlerinin bulunma zorlukları ortaya çıkar. Bu matematiksel problemlerin bazıları teorik olarak sonsuz gerilmeler ve sınır şartlarının belirlenme zorluğudur.

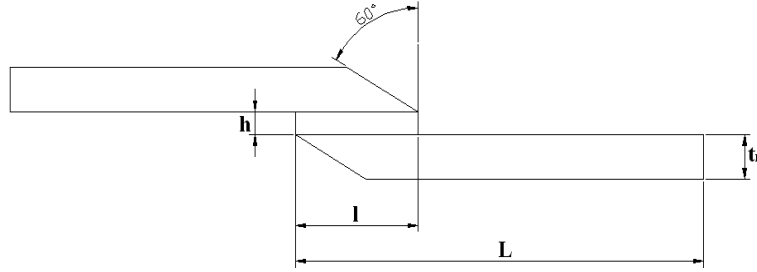
Nümerik yöntemler; karmaşık yüklere, geometrilere, malzeme özelliklerine ve sınır şartlarına sahip yapıya biçimlerine adapte edilebilirler. Bununla beraber nümerik çözümler, gerçek çözümler için sadece birer yaklaşımdır. Gerçek çözümler ile bu yaklaşık çözümler arasındaki doğruluğun derecesi çözülecek 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. İncelenen 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 metod olmasıdır (Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998).

6.1.1 Franc Programı Kullanılarak Yapıştırma Modellerinin Nümerik Olarak Analiz Edilmesi

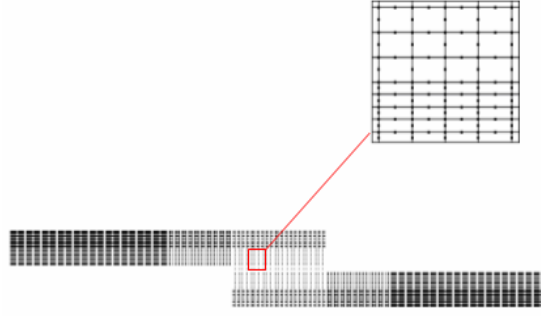
Nümerik olarak incelenilecek ve en uygun geometri bulunmaya çalışılacak olan yapıştırma bağlantılarında Franc programı ile Casca programı birlikte kullanılacaktır.

İlk olarak Casca programı yardımı ile geometri ve ağı yapı oluşturulacaktır. Ağı yapı oluşturulmadan evvel incelenecek levhanın şekilleri belirlenir. Bu çalışmada farklı malzemelerden oluşmuş ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş levhalar kullanılmıştır. Bu levhalar şekillerde gösterildiği gibi L levha uzunluğuna, l yapıştırma boyu uzunluğuna, t_1 levha kalınlığına ve h yapıştırıcı kalınlığına sahiptir. Ayrıca bu geometrilerde oluşturulan levhalara ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 90°) açı verilmiş ve bu açılardaki yapılar Casca programı ile oluşturulmuştur (Şekil 6.1).



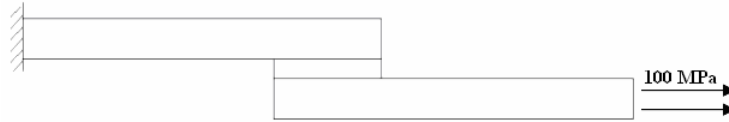
Şekil 6.1 60° yapıştırma bağlantısının geometrik modeli

Geometriler belirlendikten sonra Casca programında gerekli elemanlar kullanılarak geometri oluşturulur. Geometri oluşturulduktan sonra malzemelerin özellikleri belirlenir. Geometri alt bölgelere ayrılır. Alt bölgelere ayrılan geometri belirlenen düğüm sayılarına bölünür ve ağ yapısı oluşturulur. Şekil 6.2'de oluşturulan ağ yapısı gösterilmektedir. Ağ yapısı oluşturulduktan sonra kaydedilerek Franc programına geçilir.



Şekil 6.2 Franc programında analiz için Casca'da oluşturulan yapıştırma bağlantısının sembolik ağ yapısı

Franc programı açıldıktan sonra sırası ile problem tipi ve sabitlenecek kısım tespit edilir. Daha sonra malzeme özellikleri kontrol edilir ve malzemelerin iki ayrı parça olarak ayrılmış olup olmadığına bakılır. Bu işlemlerden sonra incelenecek parça üzerine uygulanacak kuvvet uygulanır (Şekil 6.3). Bu işlemlerden sonra çözüm aşamasına geçilir. Buradan da istenilen gerilme kuvveti ya da değeri elde edilir. Çözüm işlemi gerçekleştirilmiş olan ağı yapıya iki nokta arasında gerilme değerleri alınacaktır. Elde edilen bu değerler Excel yardımı ile grafikleştirilecek ve buna göre değerlendirilme yapılacaktır.



Şekil 6.3 Franc'ta oluşturulan ankastre kısım ve uygulanan kuvvet

6.2 Metal ve Yapıştırıcının Mekanik Özellikleri

Sonlu elemanlar metodu ile incelenecek olan model için alınan mekanik özellikler daha önce belirlenmiş Franc ve Casca programına bu değerler girilerek inceleme yapılmıştır. Bu değerler üç ana başlık halinde tablolaştırılmıştır. Tablo 6.1'de boyutlandırma değerleri verilmiştir. Burada kullanılan yapıştırıcının ve metal levhaların kalınlıkları, uzunlukları ve model ya da geometriye uygulanacak yayılı yüke yer verilmiştir.

Çizelge 6.1 Boyutlandırma değerleri

Boyutlandırma Değerleri	Kalınlık (t) (mm)	Uzunluk (L) (mm)	Modele Uygulanacak Yayılı Yük (MPa)
Metal	10	100	100
Yapıştırıcı	0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3	30	

Tablo 6.2’de geometriler oluşturulmasında kullanılan levhaların ve yapıştırıcının malzeme özellikleri verilmiştir. Malzeme özelliklerinden kasıt ise kullanılan malzemelerin elastisite modülleri (E), Poisson oranı (ν) ve kalınlık (t) değerleridir. Bu değerler ışığında analiz gerçekleştirilecektir.

Çizelge 6.2 Malzeme özellikleri

Malzeme / Özellikler	Elastisite Modülü (E) (MPa)	Poisson Oranı (ν)	Kalınlık (t) (mm)
Çelik	200.000	0,3	50
Alüminyum	70.000	0,33	50
Bakır	110.000	0,343	50
Yapıştırıcı	20.000	0,33	50

Tablo 6.3’de ise farklı elastisite modülleri ile yapılan incelemelerde kullanılan yapıştırıcı malzemenin farklı elastisite modülleri verilmiştir.

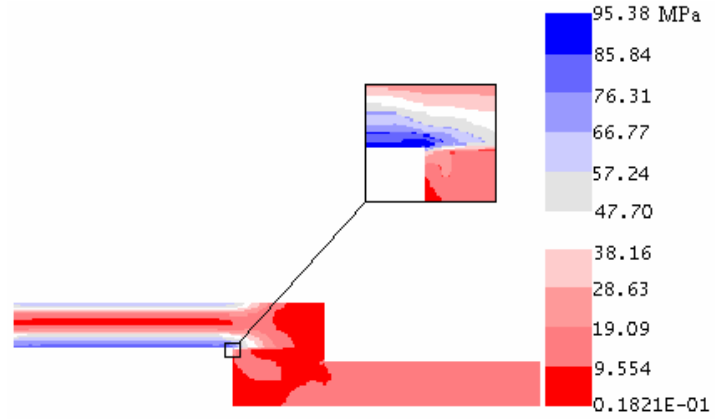
Çizelge 6.3 Yapıştırıcının elastisite modülleri

Yapıştırıcının farklı elastisite modülleri	Elastisite Modülü (E) (MPa)
E_1	20.000
E_2	50.000
E_3	100.000

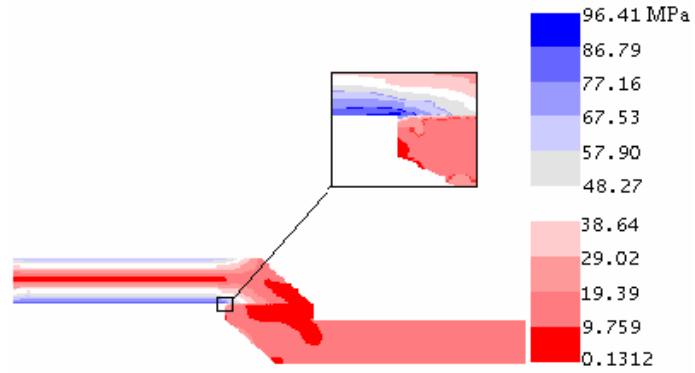
6.3 Gerilme Analizleri

Yapıştırma bağlantılarında elde edilen gerilmeler eşdeğer gerilme (Von Mises) dağılımına göre değerlendirilmiştir. Analizlerde; alüminyum, bakır ve çelik olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmış olup, tek yapıştırma elemanı ele alınmıştır.

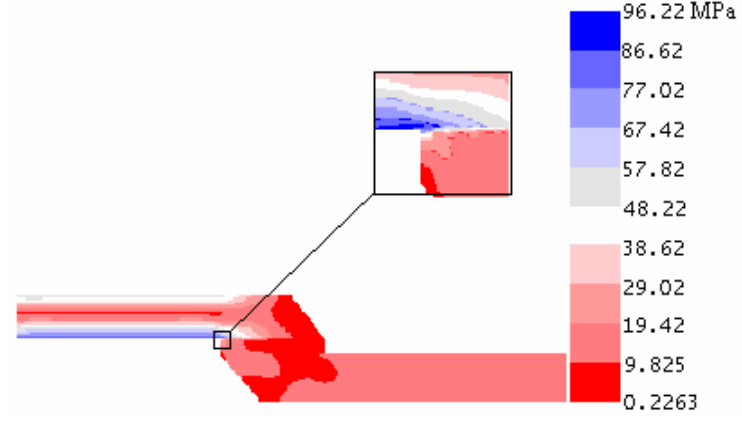
Ayrıca analizlerde farklı yapıştırıcı kalınlıkları ve levha açıları kullanılmıştır. Farklı açılardaki yapıştırılan levhalarda meydana gelen gerilmeler Şekil 6.4-8'de gösterilmiştir.



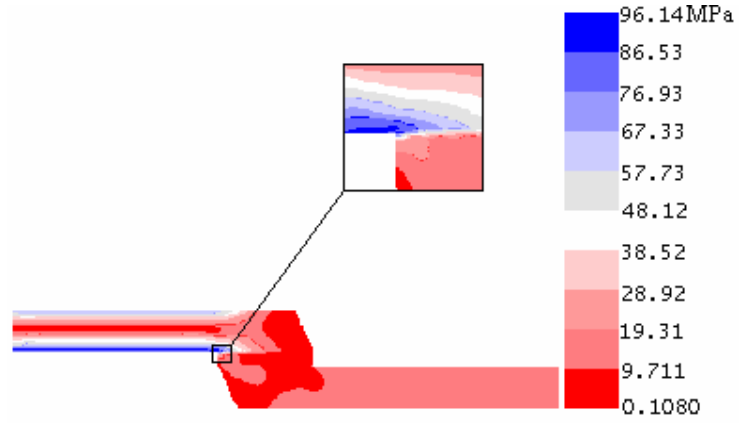
Şekil 6.4 90° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı



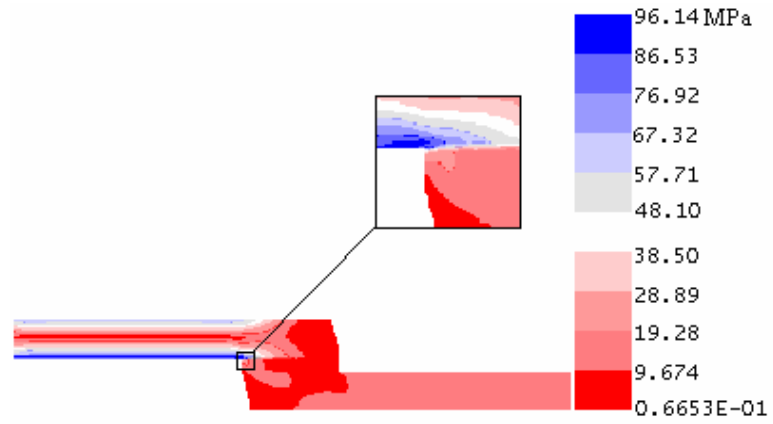
Şekil 6.5 60° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı



Şekil 6.6 45° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı



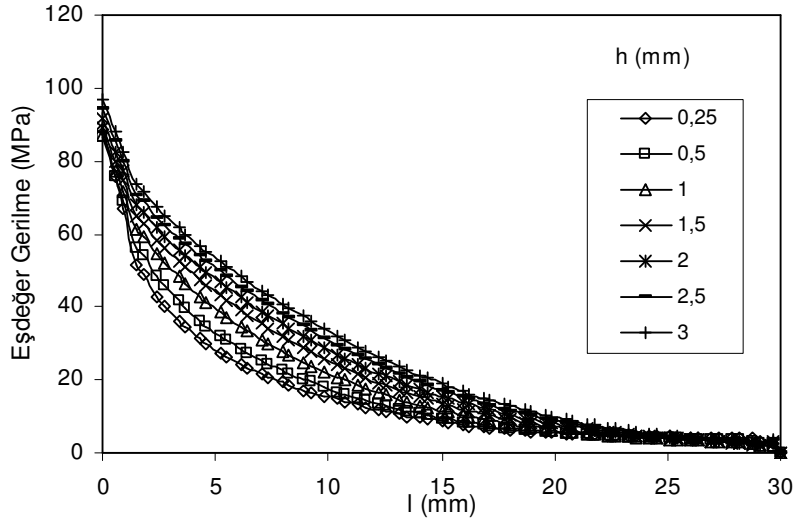
Şekil 6.7 30° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı



Şekil 6.8 15° açılı levhada meydana gelen gerilme dağılımı

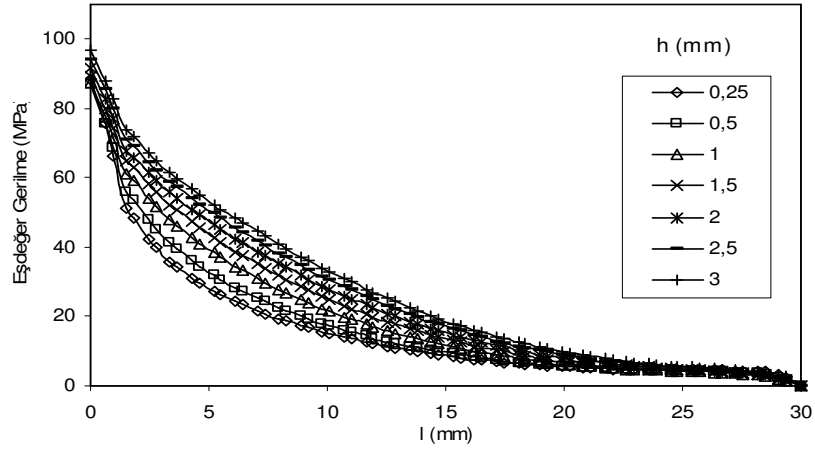
6.4 Gerilme Analizi Sonuçları

15° lik açığa sahip iki çelik levhanın yapıştırma bağlantısında elde edilen eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Farklı yapıştırıcı kalınlığı kullanılarak yapılan analizlerde en büyük 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 0,5 mm kalınlığa sahip bağlantı elemanında elde edilmektedir.



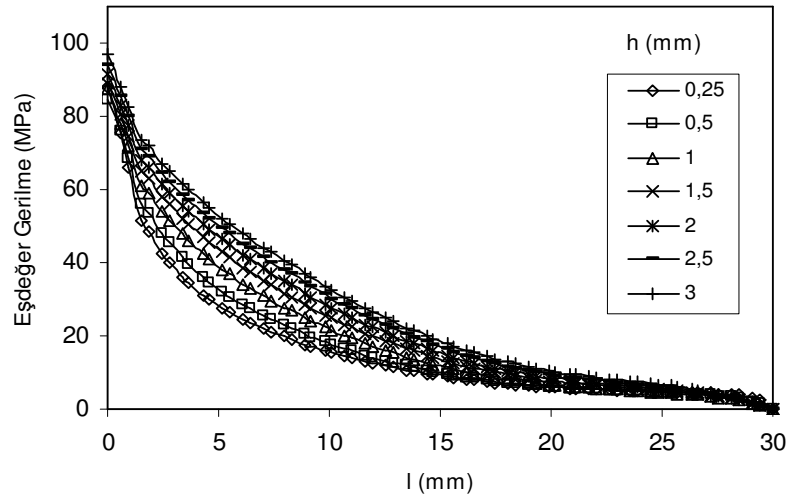
Şekil 6.9 15° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

30° açılı çelik levhalarda elde edilen gerilme dağılımı Şekil 6.10'da gösterilmiştir. En yüksek gerilmeler yapıştırıcı kalınlığının en büyük olduğu durumda elde edilmiştir. Yapıştırma kalınlıklarının azalması ile gerilme dağılımında önemli ölçüde azalmaktadır.

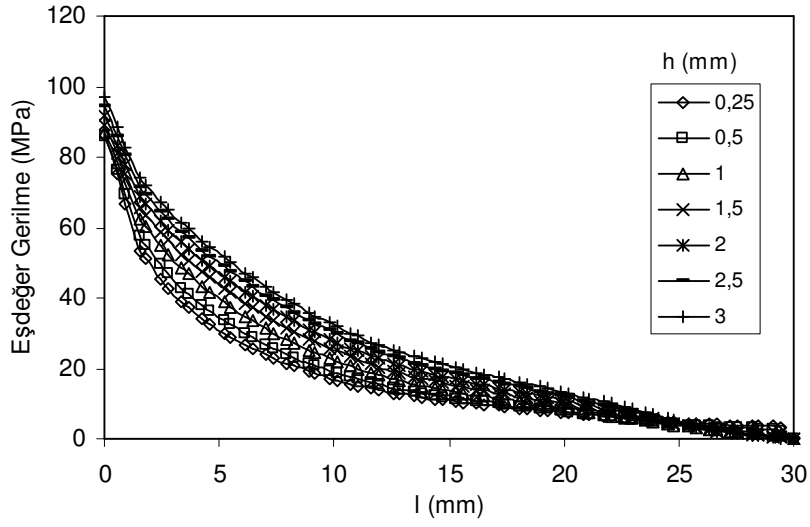


Şekil 6.10 30° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

45°, 60° ve 90° açılı çelik yapıştırma bağlantılarda elde edilen gerilme dağılımları Şekil 6.11, 6.12 ve 6.13'de gösterilmiştir. 45° ve 60°'lerde en büyük gerilme dağılımları yapıştırma kalınlığının en büyük olduğu durumlarda elde edilmiştir. Kalınlığının artması gerilme dağılımlarını arttırmaktadır. Bağlantı elemanları kuvvete maruz kaldığı zaman uç bölgelerde önemli gerilme konsantrasyonları oluşmaktadır. Bu bölgeler hasar açısından önemli bölgelerdir.

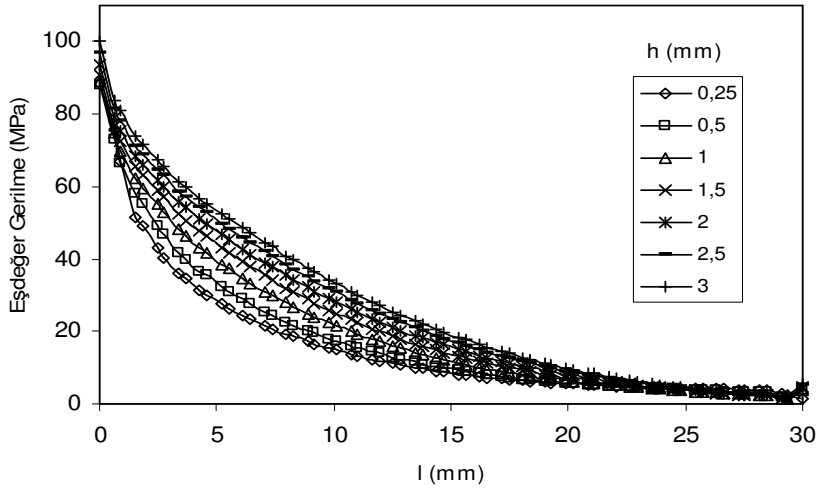


Şekil 6.11 45° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları



Şekil 6.12 60° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

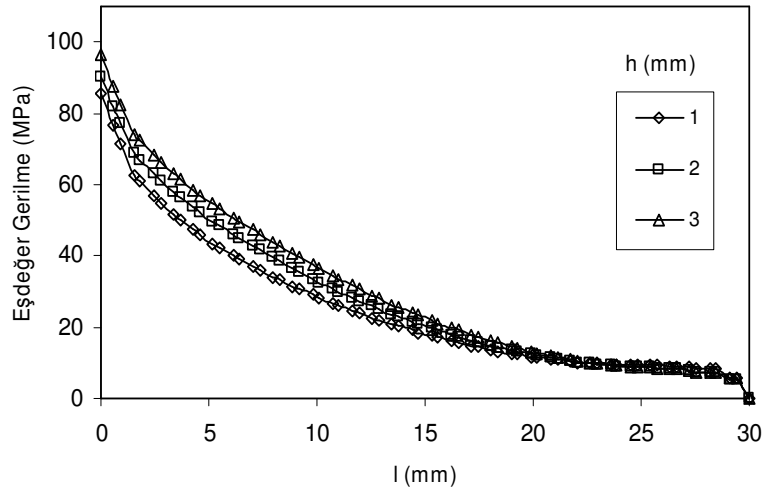
Diğer yandan 90° açılıya sahip bağlantıda elde edilen gerilme sonuçları diğerleri ile aynı olmaktadır. Levha açılarının büyümesi yapıştırıcı kalınlık farklarını önemli ölçüde değiştirmektedir.



Şekil 6.13 90° açılı çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

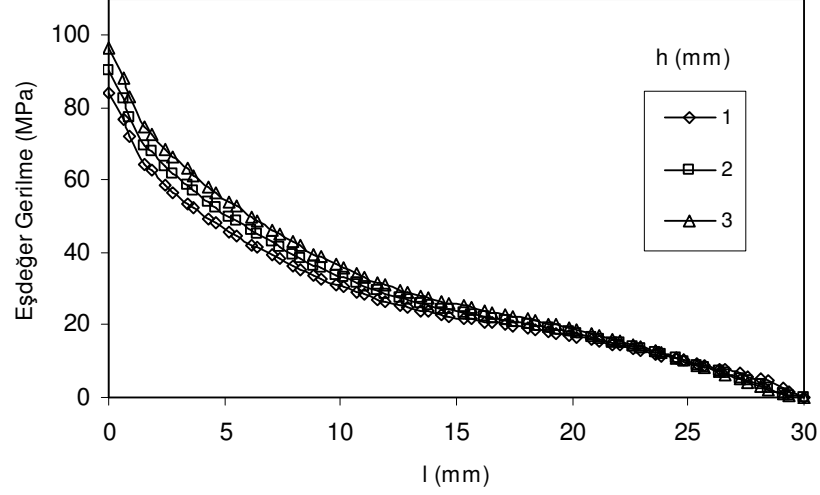
Çelik- alüminyum malzemelerden oluşan bağlantıda üç farklı yapıştırıcı kalınlığı ($h = 1, 2, 3$ mm) ve iki farklı açılı (30° ve 60°) levha kullanılmıştır. Çelik-

alüminyum bağlantısında çelik-çelik bağlantısına göre biraz daha düşük gerilmeler elde edilmiştir. 30° açılıya sahip çelik-alüminyum yapıştırma bağlantısında elde edilen gerilme dağılımı Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Bu bağlantı türünde de gerilmenin en kritik olduğu bölge yapılan analiz sonucunda levha ile yapıştırıcı arasında bulunan yüzeyde gerçekleştiği görülmüştür. Yani gerilme konsantrasyonu en yoğun olarak bu bölgede oluşur ve alttaki levhaya gidildikçe düşmektedir. Çelik-alüminyum bağlantısında maksimum gerilme yapıştırıcı kalınlığının 3 mm olduğu bağlantıda oluşmaktadır. En büyük deformasyon burada oluşur.



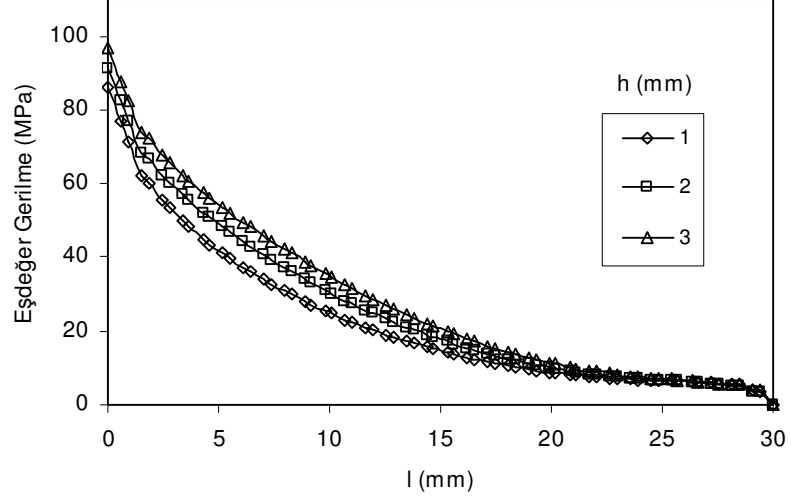
Şekil 6.14 30° açılı çelik-alüminyum levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

Yine çelik-alüminyum malzemedan oluşan 60°'lik yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımları Şekil 6.15'de gösterilmiştir. Bu değerler incelendiğinde minimum gerilmenin en düşük kalınlık olan 1 mm'de, maksimum gerilmenin ise 3 mm'de olduğu görülmektedir. Bir başka ifade ile kalınlık arttıkça gerilme değerleri ve oluşabilecek hasar artmaktadır.



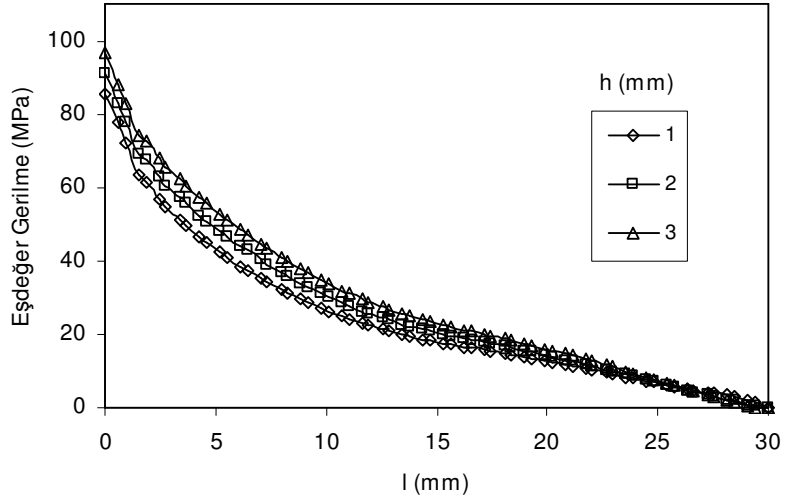
Şekil 6.15 60° açılı çelik-alüminyum levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

Çelik-bakır malzemelerden oluşan bağlantıda ise yine çelik-alüminyum bağlantıda olduğu gibi üç kalınlık ve iki farklı açılı levha kullanılmıştır. Çelik-bakır bağlantısında elde edilen gerilmeler ise alüminyum malzemeli bağlantıdan daha yüksek, fakat çelik levhalı bağlantıdan daha düşük çıkmaktadır. 30° açılıya sahip çelik-bakır yapıştırma bağlantısında elde edilen gerilmeler Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Yapılan analizlerde diğer bağlantı türlerinde olduğu gibi bu bağlantıda da kritik bölge ara yüzeydir. Genellikle yapıştırma bağlantıları incelendiğinde ayrılma durumlarının levha-yapıştırıcı arasında olduğu görülmektedir. Hasar açısından en tehlikeli bağlantı türü yine yapıştırıcı kalınlığının en fazla olduğu bağlantıdır. Minimum gerilme ise en düşük kalınlıkta gerçekleşmektedir.



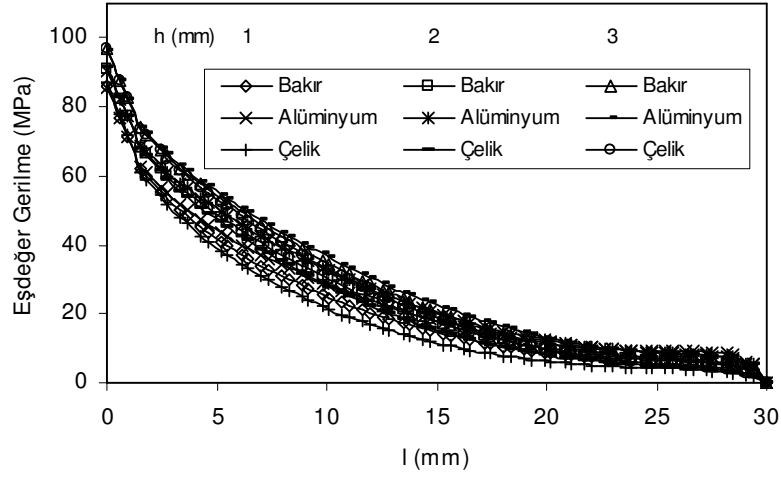
Şekil 6.16 30° açılı çelik-bakır levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

60° açılı levhalardan oluşan bağlantıda da 30°' ye benzer sonuçlar elde edilmiş ve şekilde gösterilmiştir. Yani minimum gerilme düşük yapıştırıcı kalınlığında, maksimum gerilme ise en büyük kalınlıkta olmaktadır. Bir başka deyişle hasar için kritik gerilme konsantrasyonları yapıştırıcı kalınlığının fazla olduğu durumda ortaya çıkar (Şekil 6.17).



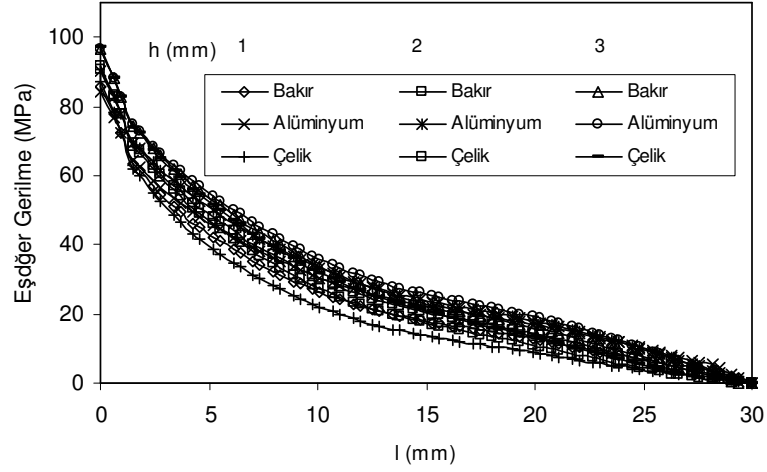
Şekil 6.17 60° açılı çelik-bakır levha bağlantıda meydana gelen gerilme dağılımları

Üç farklı yapıya sahip yapıştırma bağlantılarının karşılaştırılmasında ise yine üç kalınlık ve iki ana açı alınmıştır. Bunun nedeni belirlenen kriterler içinde bağlantıların sağlıklı bir şekilde karşılaştırılmasını sağlamaktır. 30°'ye sahip üç farklı malzemenin analizi sonucunda oluşan gerilme dağılımları Şekil 6.18'de gösterilmektedir. 30°'lik açıda dağılımlar dikkatle incelendiğinde minimum gerilme dağılımının 1 mm kalınlıkta ve çelik malzemeli bağlantıda gerçekleşmektedir. Maksimum gerilme dağılımı ise çelik-alüminyum bağlantıda ve 3 mm kalınlıkta oluşmaktadır. Diğer sonuçlar ise bu iki sonuç arasında çelik, bakır ve alüminyum kalınlıklarına göre sıralanmaktadır.



Şekil 6.18 30° açıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

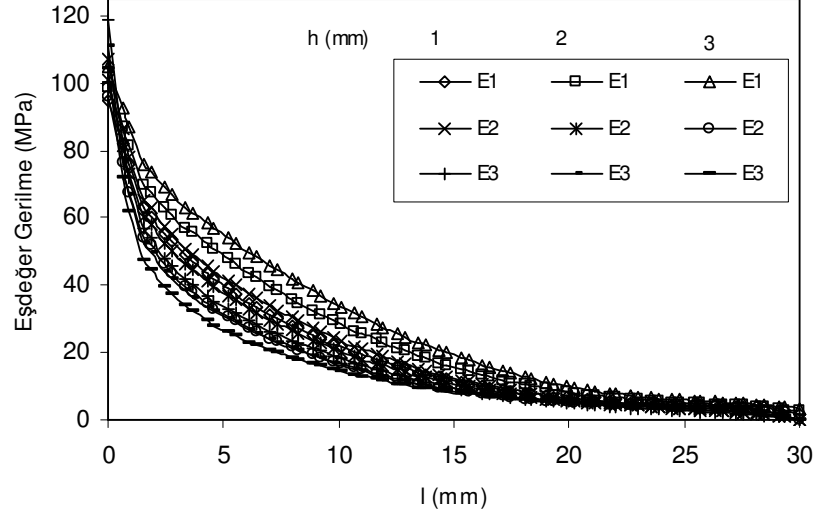
60° açılı bağlantıların karşılaştırılması durumunda ise maksimum gerilme dağılımı alüminyum levhalı bağlantıda ve en büyük kalınlıkta oluşmuştur. Bununla ilgili gerilme dağılımları Şekil 6.19'da görülmektedir. Buna göre en büyük hasar oluşma durumu çelik-alüminyum bağlantı türünde gerçekleşecektir. Gerilme dağılımı olarak en kritik bölge üst levha ile yapıştırıcı köşesinde kendini belli edecektir. Yapıştırıcı kalınlığının azalması ve malzemenin alüminyumdan çeliğe doğru değişmesi bağlantıyı sağlamlaştırıcı yönde etki eder.



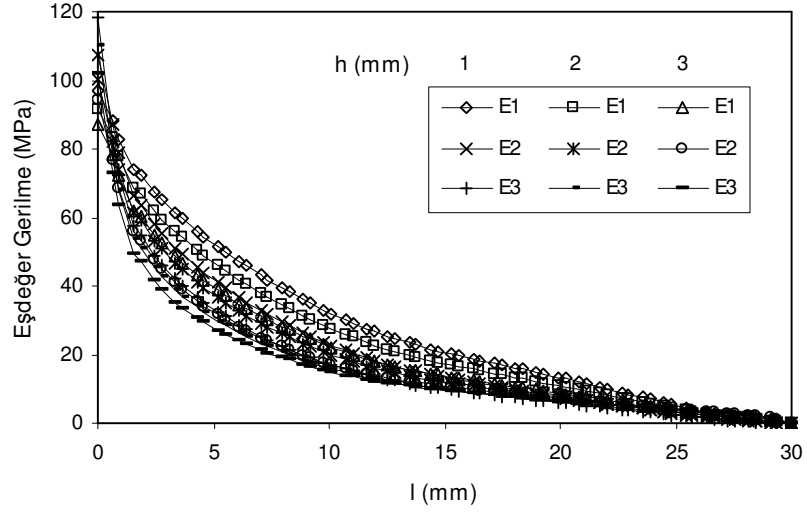
Şekil 6.19 60° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Yapıştırma bağlantılarında levha açısı, levha malzemesi, uygulanan gerilme ne kadar önemli ise yapıştırıcı malzemenin özelliği de bir o kadar önemlidir. Çalışmada genellikle aynı yapıştırıcı malzemesi tercih edilmiştir. Farklı olması açısından yapıştırıcının elastisite modülü değiştirilerek analizler yapılmıştır. 30° ve 60° açılıya sahip çelik levhaların yapıştırılmasında farklı elastikiyet modüllerinin gerilme dağılımına etkisi Şekil 6.20 ve 6.21’de gösterilmektedir. Farklı yapıştırıcı kalınlıkları dikkate alınarak yapılan analizlerde kalınlığın artması gerilmeleri önemli ölçüde büyölmektedir. Gerilme dağılımına en önemli etkiyi elastisite modülleri yapmaktadır. Elde edilen maksimum gerilmeler başlangıç olarak E_3 (100.000 MPa) gibi gözükse de alınan uzunluk boyu dikkate alındığında E_1 (20.000 MPa)’da oluştuğu görölmektedir. E_3 ’te ise gerilemektedir. Ara değer olarak ise E_2 ’de oluşmaktadır.

Bunun yanında 30° ile 60° arasında önemli gerilme farklılıkları olmamasına rağmen 30°’de elde edilen gerilme dağılımı 60°’ye göre biraz daha büyüktür. Yapılan analizler sonucunda elastisite modülünün de bağlantının mukavemetinde etkisi olduğu ortaya konulmuştur.



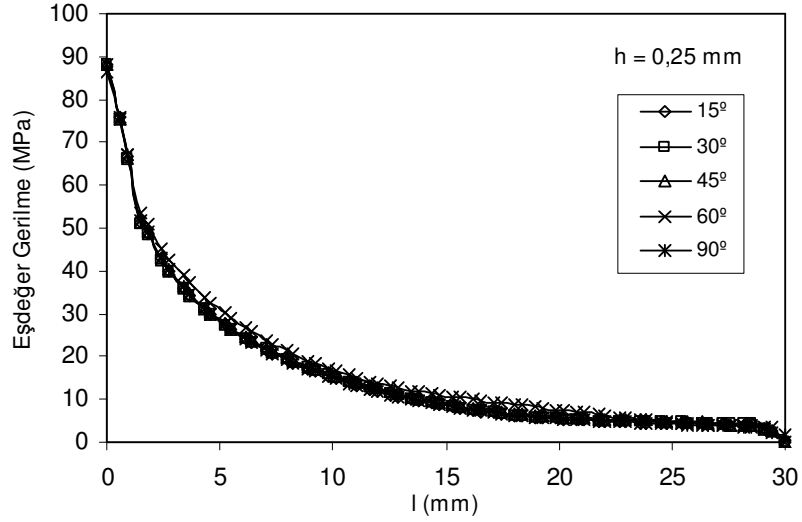
Şekil 6.20 30° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



Şekil 6.21 60° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

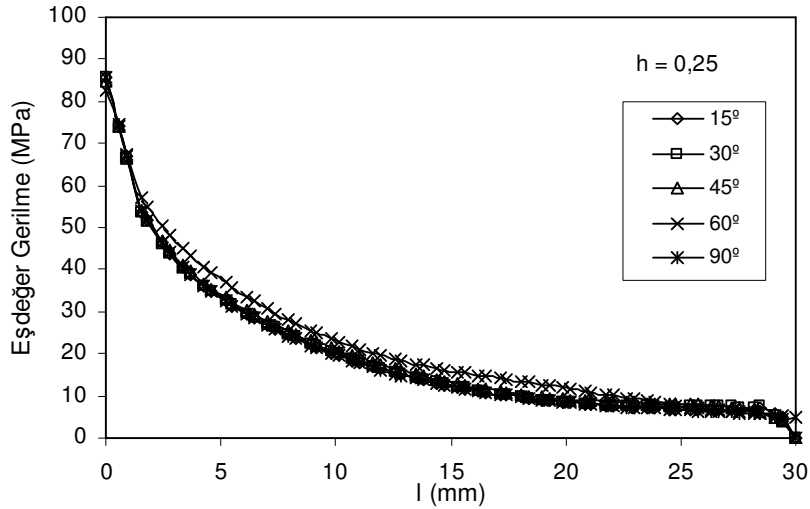
0,25 mm kalınlıktaki yapıştırıcı ile iki çelik levhanın birleştirilmesinden oluşan yapıştırma bağlantısında elde edilen gerilme dağılımları Şekil 6.22’de verilmiştir. Farklı levha açısı kullanılarak yapılan analizde maksimum gerilme 30° açılı levhada oluşmuştur. En büyük gerilme değeri bu açıda gözükse de diğer açılarda

da bu değere çok yakın değerler de oluşmuştur. Hasar için en tehlikeli bölge diğer yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi uç-kenar bölgedir.



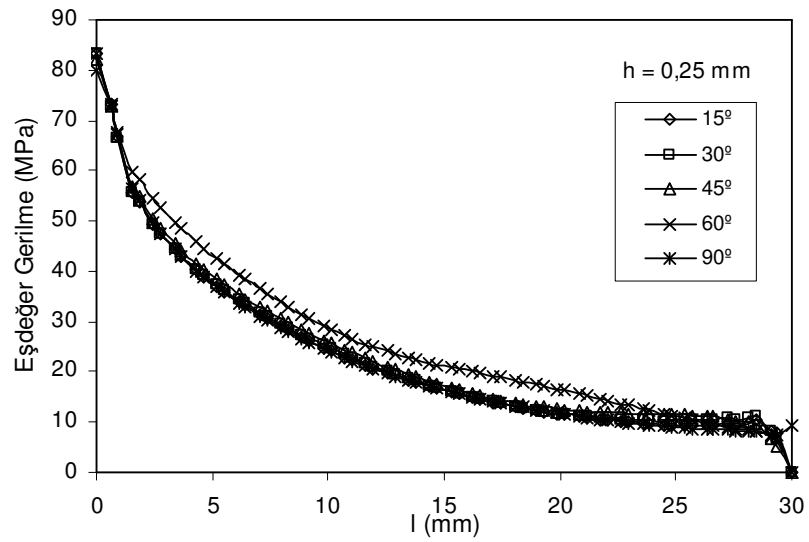
Şekil 6.22 Çelik levha bağlantıda meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Çelik-bakır levha ikilisinden oluşan yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme dağılımı Şekil 6.23'de verilmiştir. Bu analiz sonucunda da gerilme dağılımları birbirine çok yakın değerlerde çıkmıştır. Minimum gerilme dağılımı ise levha açısının 60° olduğu konumda gerçekleşmektedir.



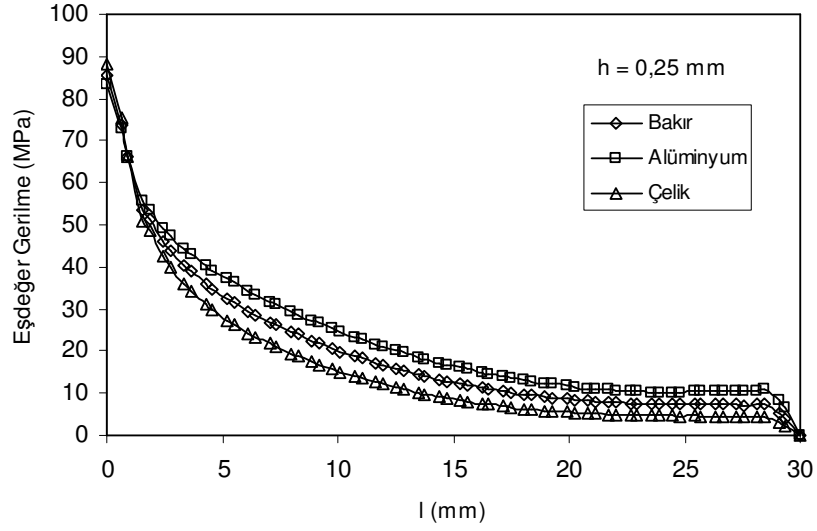
Şekil 6.23 Çelik-bakır levha bağlantıda meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Yine aynı kalınlıkta elik-alüminyum malzemededen oluşan bağlantının yapılan analiz sonucunda elde edilen gerilme dağılımları Şekil 6.24’de verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme değerleri birbirine çok yakın değerlerde çıkmıştır. Bir nceki elik-bakır bağlantı türünde olduğu gibi 60°’de diğer değerlerden bir miktar daha az gerilme değeri oluşmaktadır. Fakat diğer gerilmeler sıfıra yaklaşırken 90° açılı levhada bir miktar artış gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında kullanılan yapıştırıcı kalınlığının en uygun yapıştırıcı kalınlığı olduğu yargısı bir nebze doğrulanmıştır. Bunun nedeni ise gerilmelerin birbirine yakın çıkmasıdır.



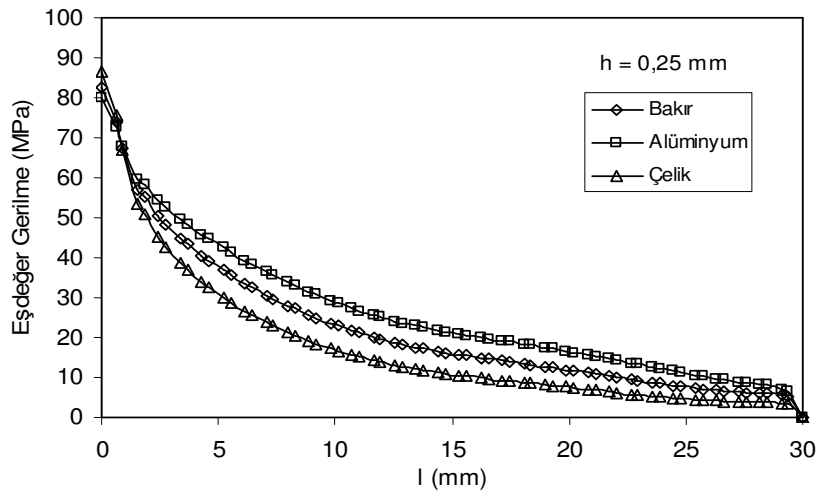
Şekil 6.24 elik-alüminyum levha bağlantıda meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Üç farklı yapıya sahip ve 0,25 mm yapıştırıcı kalınlığına sahip yapıştırma bağlantılarının karşılaştırılmasında ise yine iki ana aı alınmıştır. Bunun nedeni belirlenen kriterler içinde bağlantıların sağlıklı bir Şekilde karşılaştırılmasını sağlamaktır. 30°’ye sahip üç farklı malzemenin analizi sonucunda oluşan gerilme dağılımları Şekil 6.25’de gösterilmektedir. 30°’lik açıda dağılımlar dikkatle incelendiğinde minimum gerilme dağılımı elik-elik bağlantıda gerçekleşmektedir.



Şekil 6.25 30° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

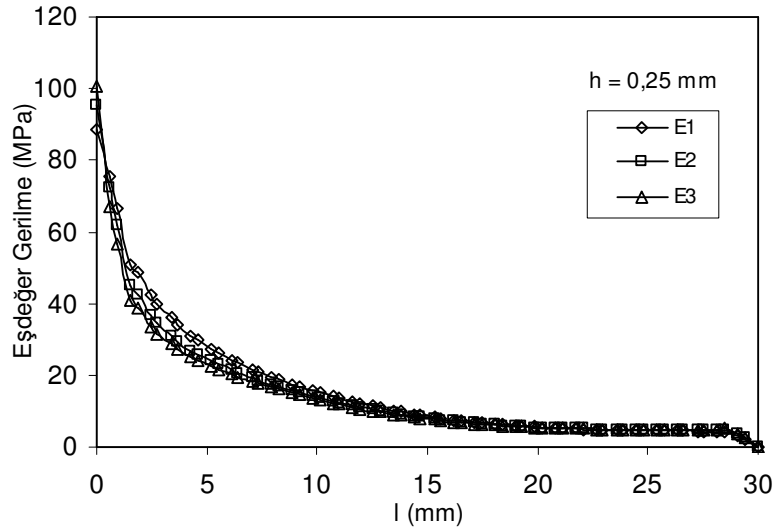
0,25 mm kalınlıkta ve 60° açılı bağlantıların karşılaştırılması durumunda ise maksimum gerilme dağılımı alüminyum levhalı bağlantıda oluşmuştur. Bununla ilgili gerilme dağılımları Şekil 6.26'da görülmektedir. Buna göre en büyük hasar oluşma durumu çelik-alüminyum bağlantı türünde gerçekleşecektir. Gerilme dağılımı olarak en kritik bölge üst levha ile yapıştırıcı köşesinde kendini belli edecektir. Yapıştırıcı kalınlığının azalması ve malzemenin alüminyumdan çeliğe doğru değişmesi bağlantıyı sağlamlaştırır.



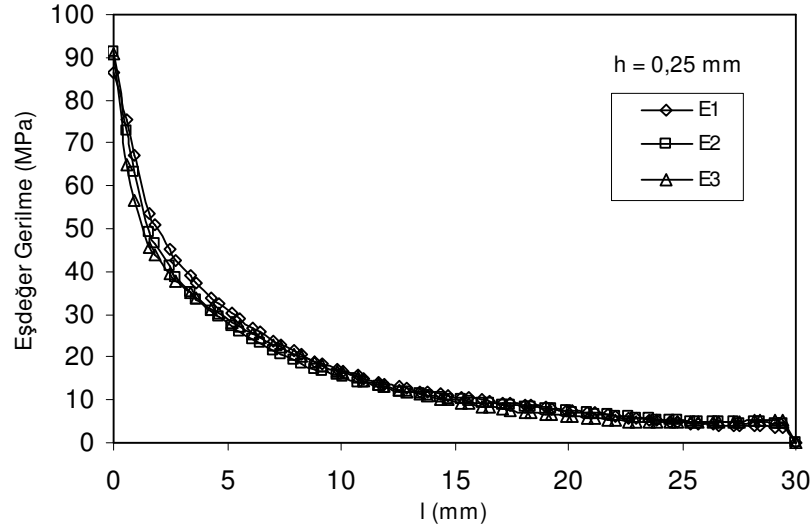
Şekil 6.26 60° açılıya sahip üç farklı malzemede meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Daha önce olduğu gibi 30° ve 60° açılara sahip çelik levhaların yapıştırılmasında farklı elastisite modüllerinin gerilme dağılımına etkisi Şekil 6.27 ve 6.28’de gösterilmektedir. Fakat burada sadece tek yapıştırıcı kalınlığı (0,25 mm) kullanılmıştır. Gerilme dağılımına en önemli etkiyi elastisite modülleri yapmaktadır. Elde edilen maksimum gerilmeler alınan uzunluk boyu dikkate alındığında E_1 (20.000 MPa)’da olduğu görülmektedir. Buna göre en fazla hasar görecektir bağlantı E_1 elastisite modülünün olduğu bağlantıdır.

Bunun yanında 30° ile 60° arasında önemli gerilme farklılıkları olmamasına rağmen 30°’de elde edilen 60°’ye göre biraz daha büyük gerilme dağılımları oluşturmuştur. Yapılan analizler sonucunda elastisite modülünün de bağlantının mukavemetinde etkisi olduğu ortaya konulmuştur.



6.27 30° açılıya sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması



6.28 60° açığa sahip levhada üç farklı elastisite modülünde meydana gelen gerilmelerin karşılaştırılması

Çizelge 6.4'te üç malzemeden oluşturulmuş yapıştırma bağlantılarının maksimum gerilme değerleri verilmiştir. Çizelgede yapıştırıcı kalınlığı $h = 3 \text{ mm}$ olarak alınmıştır. Bu sayede maksimum gerilme değerlerinin daha iyi ifade edilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 6.4 30° açığa sahip üç farklı malzemede oluşan maksimum gerilmeler (MPa)

l (mm)	Bakır	Alüminyum	Çelik
0,0	96,66	96,32	96,99
0,61	87,68	87,46	87,93
0,91	82,53	82,47	82,61
1,53	73,84	74,07	73,63
1,83	72,06	72,36	71,76
2,44	67,77	68,26	67,29
2,75	65,62	66,20	65,04
3,36	62,27	63,00	61,54
3,67	60,71	61,51	59,92
4,28	57,58	58,50	56,66

Çizelge 6.5'de çelik-alüminyum yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme değerleri verilmeye çalışılmıştır. Bu bağlantıda analiz edilen yapıştırıcı kalınlığı $h=1, 2, 3 \text{ mm}$ olarak alınmıştır.

Çizelge 6.5 30° açığa sahip çelik-alüminyum levha bağlantıda oluşan maksimum gerilmeler (MPa)

l (mm)	h (mm)		
	1	2	3
0,00	85,26	90,42	96,32
0,61	76,51	82,04	87,46
0,91	71,42	77,05	82,47
1,53	62,54	68,60	74,07
1,83	60,84	66,93	72,36
2,44	56,81	62,93	68,26
2,75	54,79	60,94	66,20
3,36	51,60	57,82	63,00
3,67	50,16	56,39	61,51
4,28	47,19	53,48	58,50

Çizelge 6.6'da çelik-bakır levhalı yapıştırma bağlantısında $h = 1, 2, 3$ mm yapıştırıcı kalınlığındaki analiz sonucunda oluşan maksimum gerilme değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.6 60° açığa sahip çelik-bakır levha bağlantıda oluşan maksimum gerilmeler (MPa)

l (mm)	h (mm)		
	1	2	3
0,00	85,49	90,83	96,81
0,61	77,70	82,94	88,21
0,91	72,25	77,65	82,88
1,53	63,27	69,14	74,36
1,83	61,36	67,28	72,50
2,44	56,85	62,80	67,94
2,75	54,59	60,57	65,66
3,36	51,13	57,13	62,17
3,67	49,51	55,51	60,49
4,28	46,32	52,23	57,10
4,59	44,89	50,73	55,58

Çizelge 6.7'de yapıştırıcının farklı elastisite modülleri ile yapılan incelemede meydana gelen gerilme değerleri maksimum olduğu durumlar ve gerilme değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.7 30° açığa ve h =1 mm yapıştırıcı kalınlığına sahip levhada oluşan maksimum gerilmeler (MPa)

l (mm)	E (GPa)		
	E ₁	E ₂	E ₃
0,00	94,92	107,27	119,02
0,61	81,77	86,63	82,04
0,91	75,76	78,31	71,76
1,53	62,83	65,47	56,66
1,83	60,35	63,09	54,00
2,44	55,43	57,56	48,08
2,75	52,99	54,98	45,61
3,36	48,86	51,04	41,74
3,67	47,07	49,20	39,90
4,28	43,50	45,75	36,76
4,59	41,78	44,19	35,39

Çizelge 6.8'de 15° açıldaki çelik-çelik yapıştırma bağlantısında analiz yapılan h = 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 mm için meydana gelen maksimum gerilme değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.8 15° açığa sahip çelik levha bağlantıda oluşan maksimum gerilmeler (MPa)

l (mm)	h (mm)						
	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0,00	86,33	86,77	87,23	89,07	91,46	94,13	96,99
0,61	75,35	75,58	77,45	80,01	82,65	85,28	87,89
0,91	66,32	68,76	71,62	74,43	77,20	79,93	82,61
1,53	50,69	56,36	61,23	64,72	67,86	70,79	73,60
1,83	47,98	54,03	59,22	62,81	65,97	68,93	71,74
2,44	41,65	48,52	54,49	58,32	61,55	64,51	67,31
2,75	38,73	45,71	52,07	56,08	59,33	62,29	65,08
3,36	34,59	41,62	48,20	52,46	55,82	58,80	61,58
3,67	32,71	39,82	46,53	50,85	54,25	57,22	59,97
4,28	29,26	36,23	42,91	47,45	50,98	53,99	56,73
4,59	27,81	34,69	41,27	45,82	49,39	52,42	55,16

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada; farklı levha açılara sahip alüminyum, bakır ve çelik malzemelerin yapıştırıcı eleman ile birleştirilmesinden oluşan gerilmeler sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Analizlerde tek yapıştırıcı eleman kullanılmıştır. Ayrıca farklı olması ve elastisite modülünde etkisini görmek için yapıştırıcının farklı elastisite modülleri kullanılmıştır.

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 gerilme uç-kenar bölgede oluşmuştur.

Farklı levha açıları kullanılarak yapılan analizlerde açı farklılığının gerilme dağılımına önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Levha açısının büyümesi ile gerilmelerde düşüş gerçekleşmektedir.

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.

Farklı elastikiyet modülleri ile yapılan inceleme sırasında ise maksimum gerilme değerleri en düşük modülde gerçekleşmektedir. Minimum gerilme ise en büyük elastisite modülünde oluşmaktadır. Elastisite modülü ile gerilme dağılımlarında birbirinin tersi yönde etki görülmektedir. Modül büyüdüğünde gerilme azalmakta, modül küçüldüğünde gerilme değerleri artmaktadır.

Yine üç farklı malzeme tipi kullanılarak yapılan analizlerde çelik-alüminyum bağlantıda en kritik ya da maksimum gerilmeler oluştuğu görülmüştür. Gerilme dağılımları çelik malzemede az iken, bakırda bundan biraz daha fazla,

alüminyumda ise en fazla olarak oluşmaktadır. Analizler sonucunda en sağlam bağlantı türünün çelik-çelik yapıştırma bağlantısı olduğu görülmüştür.

Yapılan analizlerde yapıştırma ile birleştirmenin mukavemeti; levha açısına, levha malzemesine, yapıştırıcı kalınlığına ve elastisite modülüne bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

Akkurt, M., 1990, "Makine Elemanları Cilt I", 4.Bölüm, Birsen Yayınevi, İstanbul, 92-94 s.

Akkurt, M., 1997, "Makine Bilgisi", 5. Bölüm, Birsen Yayınevi, İstanbul, 227-229 s.

Akkurt, M., 1997, "Makine Elemanları I", 9. Bölüm, İTÜ Makine Fakültesi Yayınları, İstanbul, 269-272 s.

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

Anık S., 1997, "İmal Usulleri", s. 85-86.

Sargent, J.P., "The influence of inclusions on the strength of adhesive joints", 7 January 2005, Ukrania.

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

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

Croccolo, D. and Cuppini, R., "A methodology to estimate the adhesive bonding defects and the final releasing moments in conical joints based on the acoustic emissions technique", 20 June 2005, Italy.

Colombi, P. and Paggi, C., "Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates", 30 June 2005, Italy.

Deng, J. and Lee, M.M.K., "Fatigue performance of metallic", 2005, United Kingdom.

De Maura, M.F.S.F., Daniaud, R. and Magalhaes, A.G., “Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects”, 18 June 2005, Portugal.

Frigione, M., Aiello, M.A. and Naddeo, C., “Water effects on the bond strength of concrete/concrete adhesive joints”, 30 June 2005, Italy.

Gediktaş, M., 1995, “Makine Elemanları Bağlama Elemanları Konstrüksiyon ve Hesap”, 4.Bölüm, Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu İstanbul, 104-119.s.

Jorry, E. and Sheneoi, R.A., “Performance of butt strap joints for marine applications”, 7 January 2005, Ukrania.

Keller, T. and De Castro, J., “System ductility and redundancy of FRP beam structures with ductile adhesive joints”, 1 May 2005, Switzerland.

Kanchanomai, C., Limtrakarn, W. and Mutah, Y., “Fatigue crack growth behavior in Sn-Pb eutectic solder/copper joint under mode I loading”, 31 March 2004, Thailand ve Japan.

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., “Contribution to the study of cylindrical adhesive joining”, 20 July 2005, Romania and France.

Quaresimin, M. and Ricotta, M., “Stress intensity factors and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials”, 18 July 2005, Italy.

Rende, H., 2000, “Makine Elemanları Hesap ve Konstrüksiyon Cilt I”, 4. Bölüm, Seç Yayın ve Dağıtım, Çağaloğlu İstanbul, 4.1-1/9 s.

Tezcan Ş., 2001, “Yapıştırma Bağlantılarının Dinamik Yükler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Topçu M. ve Taşgetiren S., 1998, “Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu”, Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli.

Underhill, P.R. and DuQuesnay, D.L., “The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation”, 4 May 2005, Canada.

Uğural A.C. ve Fenster S.K., 1995, “Elasticity Theory”, USA.

Vaidya, U.K., Gautam, A.R.S., Hosur, M. and Dutta, P., “Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures”, 21 March 2005, USA.

Wang, C., Huang, Y.D. and Wang, B., “Study on heat-resistant property of adhesive/carbon-carbon composites joints”, 17 March 2005, China.

Xie, D., Waas, A.M., Shohwan, K.W., Schroder, J.A. and Boeman, R.G., “Fracture criterion for kinking cracks in a tri-material adhesively bonded joints under mixed mode loading”, 22 March 2005, USA.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının hazırlanmasında her tŒrlŒ desteğini ve ilgisini esirgemeyen baőta danışman hocam Prof. Dr. SŒleyman TAŞGETİREN'e, Ar. GŒr. İsmail UCUN'a ve aileme teőekkŒrlerimi sunarım.

ÖZGEÇMİŞ

1980'de Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinde doğdu. İlkokulun üç yılını Tavşanlı'da, son iki yılını, ortaokulu ve teknik lise Makine Bölümünü Balıkesir'de tamamladı. 2003 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı Talaşlı Üretim Öğretmenliği bölümünde lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Halen aynı programın öğrencisidir.