

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

112668

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BİNDİRME BAĞLANTISININ LASER
NOKTA KAYNAĞI ESNASINDA MEYDANA GELEN SICAKLIK
DAĞILIMI VE ISIL GERİLMELERİN İNCELENMESİ

FARUK ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

112668

T.C. NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DANIŞMAN: Doç. Dr. M. Kemal APALAK
Yrd. Doç. Dr. Kemal ALDAŞ

Eylül 2001

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne;

Bu çalışma jürimiz tarafından MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Hüseyin YAPICI
Erciyes Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. M. Kemal APALAK
Erciyes Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kemal ALDAŞ
Niğde Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Doğan DEMİRAL
Niğde Üniversitesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Veysel ÖZDEMİR
Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, 29/09/2001 tarihinde, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun kararıyla kabul edilmiştir.


05/10/2001

Doç. Dr. Aydın TOPÇU
Enstitü Müdürü

ÖZET

YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BİNDİRME BAĞLANTISININ LASER NOKTA KAYNAĞI ESNASINDA MEYDANA GELEN SICAKLIK DAĞILIMI VE ISIL GERİLMELERİN İNCELENMESİ

ŞEN, Faruk

Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Kemal ALDAŞ

Ortak Danışman : Doç. Dr. M. Kemal APALAK

Eylül 2001, 110 sayfa

Bu çalışma iki aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış çok ince metal plakaların, laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. Bu amaçla, silindirik koordinatlarda iki boyutlu ısı transferi modeli oluşturulmuş ve sonlu farklar metodu kullanılarak, Fortran'da yazdığımız program ile çözülmüştür. Analizlerde faz değişimleri dikkate alınmamıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum, titanyum ve çelik plakalarda sıcaklık dağılımları tespit edilmiştir.

İkinci aşamada ise, laser nokta kaynağı yapılmış olan bu bindirme bağlantısının gerilme ve şekil değiştirme analizleri yapılmıştır. Bu aşamada, bu tür problemlerin çözümünde etkili bir metod olan sonlu eleman metodu kullanılmıştır. Bütün analizler genel amaçlı sonlu eleman yazılımı olan ANSYS^[R] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler alüminyum, titanyum ve çeliğin, deneysel gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) neticelerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Laser tarafından neden olunan delik etrafında ortaya çıkan elastik, plastik, ısı gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) dağılımları incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Laser, Laser Nokta Kaynağı, Epoksi Yapıştırıcı, Sonlu Farklar Metodu, Sonlu Elemanlar Metodu, Elasto-Plastik Gerilme Analizi, Isıl Analiz, ANSYS^[R].

SUMMARY

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER AND THERMAL STRESS DISTRIBUTION DURING LASER SPOT WELDING OF ADHESIVELY BONDED LAP JOINT

ŞEN, Faruk

**Niğde University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor : Assis. Prof. Dr. Kemal ALDAŞ

Co-Advisor : Assoc. Prof. Dr. M. Kemal APALAK

September 2001, 110 pages

This study consists of two stages. In the first stage, temperature distribution and keyhole formation occurring during laser spot-welding of adhesively bonded thin metal plates were investigated. For this purpose, a 2D-heat transfer model was developed and the governing heat conduction differential equation in cylindrical coordinates was solved using the numerical technique, the finite difference method. In the study, the effect of the phase change on the temperature distribution was not considered. The temperature distributions in the adhesively bonded aluminium, titanium and steel plate joints were determined.

In the second stage, elasto-plastic stress analysis of laser spot welded joint was carried out. The non-linear finite element method which is very powerful numerical solution technique was used in the analysis. All analyses were carried out using the general purposed finite element software ANSYS^[R]. Analysis is based on the experimental temperature dependent stress-strain (σ - ϵ) results of aluminum, steel and titanium material. Elastic and plastic thermal stress-strain (σ - ϵ) distributions around the laser drilled key-hole was investigated.

Keywords: Laser, Laser Spot Welding, Epoxy Adhesive, Finite Element Method, Finite Difference Method, Elasto-Plastic Stress Analysis, Thermal Analysis, ANSYS^[R].

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ilk aşamasında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş çok ince metal plakaların, laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. İkinci aşamada, laser tarafından neden olunan delik etrafında ortaya çıkan, elastik, plastik ısıl gerilme-şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir.

Bu çalışmanın bundan sonra, bu ve benzeri konularda çalışacak olanlara ve bilime katkıda bulunmasını dilerim.



TEŞEKKÜR

Böyle bir tez konusu seçmemi, çalışmalarımı en iyi şekilde ve tüm zorluklara rağmen yürütmemi sağlayan değerli danışman hocalarım sayın Doç. Dr. M. Kemal APALAK ve sayın Yrd. Doç. Dr. Kemal ALDAŞ Beylere şükranlarımı sunarım.

Bugüne kadar maddi ve manevi her konuda bana yardımcı olan hayatımın olmazsa olmazları sevgili babama, anneme ve abime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin tüm aşamalarında bana yardımcı olan sevgili dostlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET.....	iii
SUMMARY.....	iv
ÖNSÖZ.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
KISALTMA VE SİMGELER.....	xv
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II. LASER IŞINI, SİSTEMLERİ VE LASERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI.....	6
2.1 Laser Işım Nedir?.....	6
2.2 Laser Sisteminin Çalışma Prensibi.....	7
2.3 Laser Cihaz Tekniği.....	9
2.4 Kaynakta Kullanılan Laser Sistemleri.....	10
2.4.1 Yüksek Güçte Katı-Durum Laser Sistemleri.....	10
2.4.1.1 Ruby Laser Sistemi.....	10
2.4.1.2 Glass Laser: Nd ³ Sistemi.....	10
2.4.1.3 YAG Laser Sistemi.....	11
2.4.2 Yüksek Güçte Gaz Laser Sistemleri.....	12
2.4.2.1 CO ₂ Laseri.....	12
2.4.2.2 Argon İyon Laser Sistemi.....	13
2.5 Laserin Endüstriyel Uygulamaları.....	13
2.5.1 Laserle Delme.....	13
2.5.2 Laserle Kesme.....	14
2.5.9 Laserle Kaynak.....	17

BÖLÜM III. METAL YAPIŞTIRMA TEKNİĞİ.....	22
3.1 Yapıştırıcılar.....	22
3.2 Yapıştırıcı Bağlantılarının Diğer Çözümeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması.....	26
3.2.1 Perçin Bağlantıları.....	26
3.2.2 Kaynak Bağlantıları.....	26
3.2.3 Lehim Bağlantıları.....	27
3.2.4 Vida ve Cıvata ile Yapılan Bağlantılar.....	27
3.2.5 Sıkı Geçme Bağlantıları.....	27
3.2.6 Yapıştırma Bağlantıları.....	27
3.3 Yapıştırıcı ile Birleştirme Şekilleri.....	29
3.4 Yapıştırma Bağlantılarının Mukavemetine Etki Eden Faktörler.....	31
3.5 Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilme Halleri.....	32
3.6 Yapıştırıcı Seçimi ve Kullanılması.....	34
BÖLÜM IV. YAPIŞTIRMA VE NOKTA KAYNAĞININ KOMBİNASYONU.....	37
4.1 Parça Yüzeyinin Hazırlanması.....	37
4.2 Yüzeyine Yapıştırıcı Sürülmüş Saçların Kaynağı.....	38
4.3 Yapıştırma-Nokta Kaynağı Bağlantılarının Özellikleri.....	39
4.3.1 Makaslama-Çekme Mukavemeti.....	39
4.3.2 Kafadan Çekme Mukavemeti.....	40
4.3.3 Sıyırılma (Sıyırma) Mukavemeti.....	41
4.3.4 Yüksek ve Alçak Sıcaklıklardaki Mukavemet.....	41
4.3.5 Darbeye Karşı Mukavemet.....	41
4.3.6 Dinamik Mukavemet.....	42
4.3.7 Kararlılık (Stabilite).....	43
4.3.8 Yaşlanma ve Korozyon.....	43
BÖLÜM V. BULGULAR.....	45
5.1 Laserle Kaynak İşlemi.....	45
5.1.1 Problemin Geometrisi.....	45
5.1.2 Isı Transferi Modeli.....	46
5.2 Isıl Gerilme ve Şekil Değiştirme Problemi.....	59
5.2.1 Bir Bindirme Bağlantısının Elasto-Plastik Gerilme Analizi.....	59
5.2.1.1 Plastisitenin Temel Kavramları.....	60
5.2.1.1.1 Akma Yüzeyi ve Akma Kriteri.....	60

5.2.1.1.2 Von Mises Akma Kriteri.....	60
5.2.1.1.3 Prandtl-Reuss Akmanın Kontrol Edilmesi.....	61
5.2.1.2 Elasto-Plastik Malzemeler İçin Gerilme-Şekil Değişirme Bağıntısı..	63
5.2.1.2.1 Düzlem Şekil Değişirme Durumu.....	65
5.2.1.2.2 Düzlem Gerilme Durumu.....	66
5.2.1.3 Büyük Şekil Değişirme Parametresi H' Üzerine Bazı Düşünceler.....	67
5.2.1.3.1 Ramberg-Osgood Model.....	67
5.2.1.3.2 Elastik-Linear Büyütülmüş Model.....	68
5.2.1.4 Elasto-Plastik Problemlerin Çözümü.....	69
5.2.1.5 Kullanılan Sonlu Eleman Tipleri.....	71
5.2.1.6 Bu Tamamlayıcı Noktalarda Düğüm Noktalarının Gerilmelerinin Hesaplanması.....	72
5.2.2 Kullanılan Malzemelere ait Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri.....	76
5.2.3 Elasto-Plastik Gerilme Analizinde Elde Edilen Neticeler.....	79
BÖLÜM VI. SONUÇLAR.....	102
KAYNAKLAR.....	105

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Laser cihazlarının işletme şekli ve işletme usulleri.....	9
Çizelge 2.2 230 W güçlü sürekli çalışan CO ₂ laseriyle farklı malzemelerin kesilmesine dair datalar.....	15
Çizelge 2.3 Diğer termik kesme usullerine nazaran, CO ₂ laseri ile yapılan kesmede, kesme ağzı ve ısının tesiri altındaki bölgenin genişliği.....	16
Çizelge 2.4 Laserle yapılan kesmede uygulama örnekleri.....	16
Çizelge 2.5 Laser kaynağı için uygulama örnekleri.....	25
Çizelge 3.1 Önemli yapıştırıcılar.....	36
Çizelge 4.1 Arasında yapıştırıcı tabaka bulunan çelik sacların nokta kaynağına ait veriler.....	39
Çizelge 4.2 Nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış bağlantıların titreşimli eğme mukavemetlerinin karşılaştırılması....	43
Çizelge 5.1 Kullanılan malzemelerin termodinamik özellikleri.....	46
Çizelge 5.2 Dörtgen sonlu eleman tipindeki Gauss integrasyon noktaları, konumları ve ağırlıkları.....	73
Çizelge 5.3 Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Laser ışığı ile alelade ışık.....	7
Şekil 2.2 Üçlü ve dördü laser sistemlerinin absorpsiyonu ve emisyonu.....	8
Şekil 2.3 A: Normal yayılma, C,D: Tahrik edilmiş yayılma ○ : Tahrik edilmiş atomlar ● : Yer seviyeli atomlar	8
Şekil 2.4 CO ₂ laser.....	12
Şekil 2.5 Laserle delmede oluşan delik.....	14
Şekil 2.6 Laser-yakarak kesme yöntemi (şematik)	17
Şekil 2.7 Laser ve ark kaynağında malzeme üzerinde derinliğe göre ısının yayılışı.....	20
Şekil 2.8 Laser kaynağı için bazı dizayn tipleri: (a) çapraz tel, (b) paralel tel, (c) çapraz lama ve tel, (d) to bağlantısı.....	21
Şekil 3.1 Bir yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımı.....	28
Şekil 3.2 Uygulamada kullanılan genel yapıştırıcı bağlantıları.....	30
Şekil 3.3 Yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme tipleri.....	33
Şekil 4.1 Perçinlenmiş, nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış 1.5 mm kalınlığındaki Al, Zn, Mg, Cu,1,5 sacların kafadan çekme deneyindeki mukavemetleri. Epoksi kökenli yapıştırıcı kullanılmıştır.	40
Şekil 4.2 Perçinlenmiş, nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış ve yapıştırılmış- nokta kaynağı yapılmış Al, Cu, Mg sacların ortalama darbe mukavemetleri. Epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır.....	42
Şekil 4.3 Çeşitli muayene sıcaklıklarında perçinlenmiş, nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış AlZnMgCu 1,5 alaşımı hafif yapı profillerinde stabilite. Burada epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır.....	44
Şekil 5.1 Problemin geometrik tanımı.....	45
Şekil 5.2 Sonlu fark denklemleri için hücre elemanı.....	47

Şekil 5.3 Laser gücünün değişimi.....	49
Şekil 5.4 Heat2d.for programına ait akış şeması.....	52
Şekil 5.5.A Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı.....	53
Şekil 5.5.B Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı.....	54
Şekil 5.6.A Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 5.6.B Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı.....	56
Şekil 5.7.A Yapıştırıcı ile birleştirilmiş titanyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı.....	57
Şekil 5.7.B Yapıştırıcı ile birleştirilmiş titanyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı.....	58
Şekil 5.8 Yerel koordinatlarda iki boyutlu kenarları düz simpleks ve parabolik üçgen sonlu eleman modeli.....	71
Şekil 5.9 İki boyutlu kenarları düz simpleks ve parabolik dikdörtgen sonlu eleman modeli.....	71
Şekil 5.10 Epoksi türü yapıştırıcıya ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	77
Şekil 5.11 Alüminyum % 99.99 ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	77
Şekil 5.12 Yüksek karbonlu çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	78
Şekil 5.13 Titanyum alaşımına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	78
Şekil 5.14 ANSYS ^[R] programına ait akış şeması.....	82
Şekil 5.15 Alüminyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa).....	84
Şekil 5.16 Alüminyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları.....	85

Şekil 5.17 Alüminyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları.....	86
Şekil 5.18 Alüminyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa).....	87
Şekil 5.19 Alüminyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları	88
Şekil 5.20 Alüminyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları.....	89
Şekil 5.21 Çelik bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa).....	90
Şekil 5.22 Çelik bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları.....	91
Şekil 5.23 Çelik bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları.....	92
Şekil 5.24 Çelik bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa).....	93
Şekil 5.25 Çelik bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları	94
Şekil 5.26 Çelik bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları.....	95
Şekil 5.27 Titanyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa).....	96
Şekil 5.28 Titanyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları.....	97
Şekil 5.29 Titanyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları.....	98
Şekil 5.30 Titanyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa).....	99
Şekil 5.31 Titanyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları	100

Şekil 5.32 Titanyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları.....101



KISALTMA VE SİMGELER

SİMGE

C_p	: Özgül ısı, J/kg °K
$h, t_1, t_2, t_3,$: Malzeme kalınlıkları, mm
I_0	: Laser çıkış gücü, W/m ²
\hat{I}_0	: Maksimum laser güç şiddeti, W/m ²
k	: Isı iletim katsayısı, W/m °K
R	: Laser nokta yarıçapı, m
r	: Radyal koordinat, m
T	: Sıcaklık, °K
t	: Zaman, s
z	: Düşey koordinat, m
δ	: Absorbsiyon katsayısı, 1/m
ρ	: Yoğunluk , Kg/m ³
Δr	: r yönünde gridler arası mesafe, m
Δz	: z yönünde gridler arası mesafe, m
$\bar{\epsilon}$: Toplam şekil değiştirme, m/m
$\bar{\epsilon}^e$: Elastik şekil değiştirme, m/m
$\bar{\epsilon}^p$: Plastik şekil değiştirme, m/m
σ	: Gerilme, N/m ² ; Pa
$\bar{\sigma}$: Eşdeğer gerilme, N/m ² ; Pa
E	: Young modülü, N/m ² ; Pa
B	: Sabit sayı (gerilme analizinde)
H^f	: Büyük şekil değiştirme parametresi
ν	: Poison oranı
α	: Isıl genleşme katsayısı, $\mu\epsilon/^\circ C$

İNDİSLER

- i : radyal yöndeki adımı ifade eden indis
j : düşey yöndeki adımı ifade eden indis
n : zaman indisi



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde ki konstrüksiyonlar iş verimi ve emniyetini arttırmaya, boyutları ve ağırlığı küçültmeye, aynı zamanda malzeme ve imalat masraflarını azaltmaya yöneliktir. Buna paralel olarak birleştirme tekniği de, sürekli bir şekilde yeni problemlerle karşı karşıya kalmaktadır. Sacların birleştirilmesinde konstrüktörler, çoğu zaman yapıştırma işlemi ile nokta kaynağı arasında bir tercih yapmak zorundadır. Bu iki seçeneğin özellikleri kısmen birbiriyle çelişebilir. Halbuki bu iki tekniğin avantajlarından aynı anda yararlanmak arzu edilir. Bu da, yapıştırma ve nokta kaynağının kombinasyonu ile mümkün olabilmektedir.

Bu teknoloji; 1950'li yılların sonunda uçak yapımında kullanılmak üzere geliştirildi. Rusya'da AN 22 ve AN 24 gibi büyük nakliye uçaklarının bölmelerinin birleştirilmesinde ve ayrıca YAK 40 yolcu uçağında kullanıldı. Amerika Birleşik Devletlerinde ise, LOCKHEED C-5 askeri uçaklarının bir bölümünde ve SIKORSKY-67'lerin gövdelerinin % 10'unda perçinin yerini aldı (Amık, 1986). Ayrıca uzay taşıtlarında yakıt tankları ve oluklu sacların birleştirilmesi bu usul ile gerçekleştirilmiş ve böylece ağırlıktan ve taşıma gücünden ekonomi sağlanarak hareket olanakları arttırılmıştır. Bu teknik diğer alanlarda da her geçen gün biraz daha fazla kullanılma imkanı bulmaktadır. Örneğin; demiryolu ve karayolu taşıtlarında, hava ve su bakımından sızdırmazlık aranan alet ve kaplarda olduğu gibi.

Nokta kaynağı ile yapıştırma işleminin bir arada uygulanması, farklı amaçlara göre değişir. Nokta kaynağı dikişlerinin sızdırmazlığı ve korozyona karşı korunması için bindirme (birleştirme) aralığına nokta kaynağı lâkı, yahut da nokta kaynağı macunu sürülür. Bağlantıda kuvvet, kaynak yapılmış noktalar tarafından taşınır. Birleştirilecek yüzeylere uygulanan ön işlemler, nokta kaynağı yapılabilirliğini artırır. Birleştirme yüzeylerine sürülen lâk ve macun, organik birleştirme maddelerinden oluşur. Örneğin; polivinil asetat gibi. Bu maddelere akımı iletebilmeleri için Al, Zn, Ni, Cu gibi metaller veya grafit katılır.

Yapıştırılmış bağlantıların nokta kaynağı, imalatı basitleştiren bir usuldür. Burada yapıştırılan parçaların otoklav veya preslerde sertleştirilmesi işleminden tasarruf edilir. Ayrıca nokta kaynağı usulü, yapıştırıcı malzemesinin sertleştirilmesinden evvel, diğer

işlemlerin parçaya uygulanabilme imkanını sağlar. Noktaların kuvvet taşıma zorunluluğu, nokta kalitesinin de önemli olduğunu gösterir. Dolayısıyla yüzey ön işlemleri; yapıştırma maddesinin mümkün mertebe iyi bir adhezyon sağlamasını amaçlar ve bu amaçla yapıştırma malzemesi yüksek mukavemete sahip epoksi kökenli malzemedir seçilir.

Yapıştırma-nokta kaynağı kombine işleminde, kaynak noktası ve yapıştırıcı film, kuvvet taşınmasını birlikte sürdürürler. Bu teknik, yapıştırma ve nokta kaynağı işlemlerinin bir arada kullanılması sonucu; yalnız nokta kaynağı ve perçinlemeye nazaran sızdırmazlık, korozyona karşı dayanıklılık ve işlenebilirlik ayrıca bilhassa dinamik yük taşıma kabiliyeti gibi avantajlara sahiptir. Yapıştırma-nokta kaynağında bilinen iki usul mevcuttur (Anık, 1986) bunlar:

1. Saçlara önce nokta kaynağı yapılır. Daha sonra düşük viskoziteli yapıştırıcı enjektör iğnesine benzeyen özel bir alet ile aralığa püskürtülür ve yapıştırıcı kapiler kuvvet tesiriyle aralığa yayılır. Bu usulde çabuk ve emin nokta kaynağı amaçlanmıştır. Fakat yapıştırıcının sürülmesine nazaran pahalı bir işlemdir ve yapıştırıcı mevcut bütün aralığı dolduramadığı için bazı sızdırıcı aralıklar kalabilir.
2. Birleştirilecek saçlara önce yapıştırıcı sürülerek yapıştırılır ve sonra da nokta kaynağı uygulanır. Burada düşük viskoziteden macun şekline kadar değişebilen karakterde yapıştırıcı bir madde kullanılır. Aradaki yapıştırıcı tabaka dolayısıyla, nokta kaynağı işlemi zorlaşır.

Dayanıklılık bakımından 1. usul daha avantajlıdır. Diğer taraftan, kaynaklı noktanın çevresinde, ısı etkisi dolayısıyla yapıştırıcı maddenin özelliklerinde herhangi bir zararlı etki de meydana gelmemektedir. Ancak imalat tekniği açısından oluşabilecek zorluklar 1. usulün kullanılmasını sınırlandırmaktadır. 2. usul ise, daha basit ve kullanışlıdır.

İlk olarak 1958 yılında Tawnes ve Schowlaw tarafından teorik olarak laserin meydana gelebileceği ortaya atılmıştır (Işıldak, 1990). Bu teoriden hareketle, 1960 yılında T.H. Maiman tarafından bulunmuş olan laser, günümüzün en önemli buluşlarından birisi olmuştur. Light Amplification By Stimulated Emission of Radiation (Uyarılmış Elektromagnetik Işıma Yapan Yükseltici) kelimelerinin baş harflerinden türetilmiş olan laser, elektrik enerjisini elektromagnetik enerjiye çeviren elektro-optik bir sistemdir (Koç, 1995). Bir kaynağın yaydığı elektromanyetik dalgaların, dalga boyları 1 cm civarında ise böyle dalgalara mikro dalga, bu tip kaynaklara da Maser denir. Eğer yayılan dalgaların dalga boyları kızıl ötesi veya mor ötesi bölgede ise bu tür dalgaları üreten veya yayan kaynaklara da laser denir (Hecht, 1986) (Smithells, Brandes 1976).

1916 yılında, uyarılarak enerji düzeyleri yükseltile atomların, kendiliklerinden daha alt bir enerji düzeyine düşmeleri sırasında bir enerji yaydıkları biliniyordu. Çözülmesi gereken problem kendiliğinden olan bu değişmeyi kontrol altına alabilmek, enerjiyi belli bir dalga üzerinde toplayarak istenilen şiddete yükseltebilmektir (Smithells, Brandes 1976) (Beesley, 1978).

T.H.Maiman tarafından bulunan ilk darbe esaslı katı laser'in ardından, bu alana yönelen araştırmacılar tarafından çok kısa bir zamanda elli çeşit laser geliştirilmiştir. 1960 yılının sonuna doğru Jovan, Bennet ve Herrat tarafından Helyum-Neon laseri yapılarak ilk gaz laseri imal edilmiş olup, 1962 yılında Stevenson yarı iletkenlerle çalışan laseri bularak laser çağının büyük bir hızla gelişmesini sağladı ve 1964 yılında Patel, Karbondioksit (CO₂) gaz laserini geliştirdi (Koç, 1995).

Laser konusunda çok sayıda çalışma yapan araştırmacılardan birisi olan Yılbaş; ısı dağılımı, laser-metal etkileşimi ve çeşitli laser metotları ile yapılan işlemler konusunda çalışmalar yapmıştır (Yılbaş, 1985-2000). Apalak tarafından, laser-metal etkileşimi sırasında meydana gelen ısı transferi modeli incelenmiştir (Apalak 1987). Apalak bu çalışmasını laplace transformunu kullanarak gerçekleştirmiş, nümerik çözümleri ise sonlu farklar metodunu uygulayarak çözmüştür. Malzemelerin ısı transferi modeli üzerine etkilerini incelemek gayesi ile, üç farklı ısıl özelliğe sahip malzeme (çelik, nikel, titanyum) seçmiştir.

Kahraman, laser'le ince metal ve kabloların kaynak işlemi üzerinde çalışmıştır (Kahraman, 1987). Bu çalışmada Kahraman, 0.1 ile 1 mm kalınlığında farklı özelliklere sahip metallerin kaynağını başarılı bir şekilde deneysel olarak yapmıştır.

Işıldak, derin etkili laser nokta kaynağı esnasında ortaya çıkan ısı transferi modelini incelemiştir (Işıldak, 1990). Işıldak bu çalışmasında, daha önceki çalışmalarda kullanılan sınır şartları nedeniyle teorik ve deneysel çalışmalar arasında farklar olduğunu görmüştür. Bu nedenle iki boyutlu yeni bir ısı analizi geliştirmiş, elde ettiği denklemin, sonlu farklar metodunu kullanarak, explicit ve implicit çözümlerini gerçekleştirmiştir. Akçakoyun, laser-metal etkileşimi esnasında meydana gelen metal plazması içerisinde laser ışını güç şiddetindeki zayıflamayı incelemiştir (Akçakoyun, 1994). Koç, kinetik teori yaklaşımı ile laser-malzeme etkileşimi sırasında malzemedeki sıcaklık dağılımının analizini yapmıştır (Koç, 1995).

Benzer ve benzer olmayan çelik bağlantıların, laser nokta kaynağı ile birleştirilmesi ile elde edilen bağlantıda, kaynak bölgesinin mikro yapısı ve meydana gelen gerilme dağılımları Yeni ve Çam tarafından deneysel olarak incelenmiştir (Yeni ve diğ., 1996), (Çam ve diğ., 1998)

Yapıştırıcı ile metalleri birleştirme tekniği ve yapıştırıcı bağlantıları konularında Apalak çok sayıda çalışma yapmıştır (Apalak, 1993-1998). Apalak, Z.G., tarafından yapılan çalışmada ise düz bindirme bağlantılarından farklı bir bağlantı şekli olan, yapıştırıcı ile birleştirilmiş T-tipi bağlantıların sonlu eleman metodu kullanılarak analiz ve tasarımı yapılmıştır (Apalak, Z.G., 1995). Engin, yapıştırıcılarla birleştirilmiş çift bindirmeli ankastre bağlantıların sonlu eleman metodu ile geometrik bakımdan lineer ve lineer olmayan analizini yapmıştır (Engin, 1997).

Günümüzde ilerleyen laser teknolojisi ile istenilen dalga boyunda ışınım yapan ve çıkış gücü miliwatt ve kilowatt seviyesinde değişen katı, sıvı ve gaz laserin imalatı mümkün olmaktadır.

Laser; başta Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya olmak üzere gelişmiş ülkelerin sanayilerinde başarı ile kullandıkları yeni bir imalat sistemi olmuştur. İmalat sanayiinde laser, elektronik, uçak, askeri gereçlerin imalatında, nükleer tesisler ve türbinler gibi hassas çalışma gerektiren alanlarda; kaynak, delme, kesme teknikleri olarak başarı ile kullanılmaktadır (Anık, 1983).

Uygulamada laserle; delik çapının, delik derinliğine oranları 1/1 ile 1/20 arasında değişen delikleri, en sert malzemeleri dahi delmek mümkün olmaktadır. Aynı zamanda mikro işlemcilerin (mikro chip) imalatına gerekli olan μm mertebesindeki kaynağın yapılması da mümkün olmaktadır. Bilgisayar kontrollü laser takım tezgahları hem ekonomik oldukları için, hem de işlem hassasiyetlerinin yüksek olması nedeniyle kullanımda öncelikle tercih edilen tezgahlar olmuşlardır. Laser çıkış enerjileri 5-75 Joule ve darbe uzunlukları 1.2 ile 3 ms arasında değişen laser ışınlarının, bir kondenser mercekle yardımıyla bir malzeme yüzeyine odaklandığında, odak düzleminde büyük bir güç yoğunluğu meydana gelmektedir. Bu güç yoğunluğundan dolayı malzeme sırasıyla ısınmakta, ergimekte ve buharlaşmaktadır. Böylece malzemenin ısı olarak işlenmesi mümkün olmaktadır. Bu olayda malzemenin fizik ve termik özellikleri önemli rol oynamaktadır. Bu ısı işlemler sırasında laser çıkış enerjisinin zamanla değişimi çok önemlidir. Laser takım tezgahlarının diğer takım tezgahlarına olan üstünlüklerini şu şekilde sıralamak mümkün olmaktadır (Luxon ve diğ. 1987);

1. Laserle malzemenin işlenmesinde, işleme kalitesi malzemenin mekanik özelliklerine (sertlik, kırılgenlık vb.) bağılı değildir. En sert malzemelerin bile, laserle işlenmesi mümkündür.
2. Laserle malzeme arasında mekanik bir temas yoktur.
3. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB) çok küçüktür.
4. Nümerik kontrolle kolayca otomatikleştirmek mümkündür.
5. Delme ve kesme zamanı çok kısa olduğundan seri imalatta işleme hızı yüksektir.
6. Delik delme ve kaynak konumu çok hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir.

Bu avantajlar yanında laser takım tezgahlarının bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

1. İmalat ve maliyetleri yüksektir.
2. Verimleri çok düşüktür (%1-6).

BÖLÜM 2

LASER IŞINI, SİSTEMLERİ ve LASERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

2.1 Laser Işını Nedir?

Bundan kısa bir süre öncesine kadar laser yalnız özel işler için imalatta kullanılırken, şimdi artık laser teknolojisinin hızlı gelişimi, laser ışınından metallerde ve plastik malzemelerde birçok imalat probleminin çözümü için bir vasıta olarak faydalanma imkanını vermektedir. Gelişme eğilimi hem cihaz hem de kullanma tekniğinde hiçbir şekilde kapanmış olarak görülmeyeceğinden, gelecek için artan uygulama alanı beklenebilir.

Montaj parçalarının sürekli olarak küçülmesi birleştirme tekniğinin daha küçük boyut alanlarına yayılmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle mekanik ve termik olarak çok yüklenmiş bağlantılar için, diğer birleştirme usulleriyle birlikte kaynak tercih edilmektedir. Küçük boyutları kapsayan alanda, klasik kaynak usulleri (elektrik direnç kaynağı hariç) kesinlikle kullanılmaz. Bu durum, termokompresyon, ultrasonik, elektron ışını ve laser ışını kaynağı gibi, yeni tip birleştirme usullerinin gelişimini teşvik etmiştir. Bunların arasından laser kaynağı, bir seri özel avantajları dolayısıyla kendini göstermiştir (Işıldak, 1990).

1. Birkaç mikron bölgesinde ki iyi odaklanma kabiliyetinden ve 10^8 W/cm²'nin üzerindeki yüksek güç yoğunluğundan ötürü, tungsten (wolfram) gibi yüksek sıcaklıklarda eriyen (3400 °C) metaller kendiliğinden erirler ve bununla birlikte ısı etkiler ısıya karşı duyarlı civar bölgeler üzerinde minimumla sınırlandırılabilir.
2. Kaynak süresi olarak (konsantre edilmiş ısı iletimi şartına bağlı kalarak) iri taneli, tekrar kristalleşmiş ve segragasyon gibi uygun olmayan iç yapı değişikliklerini geniş ölçüde giderebilecek ve yüksek üretim hızlarına erişebilecek şekilde, noktasal bağıntılar için birkaç ms yeterlidir.
3. Laser ışını temassız çalışır, yani takım ile iş parçası arasında hiçbir mekanik kontak oluşmaz ve iş parçasının istenmeyen alaşımlanması veya distorsiyonu önlenmiş olur.
4. Laser ışınının üretimi, ne mikro plazma kaynağındaki gibi koruyucu gazların kullanılmasını, ne de elektron ışını ile kaynaktaki gibi bir vakuma bağlı kalmayı

BÖLÜM 2

LASER IŞINI, SİSTEMLERİ ve LASERİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

2.1 Laser Işını Nedir?

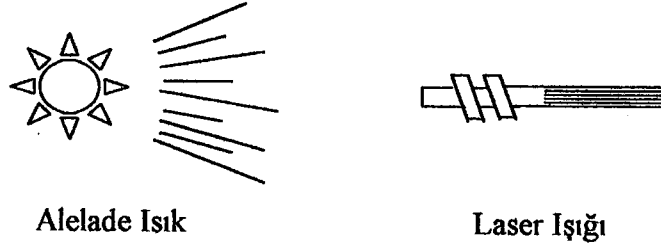
Bundan kısa bir süre öncesine kadar laser yalnız özel işler için imalatta kullanılırken, şimdi artık laser teknolojisinin hızlı gelişimi, laser ışınından metallerde ve plastik malzemelerde birçok imalat probleminin çözümü için bir vasıta olarak faydalanma imkanını vermektedir. Gelişme eğilimi hem cihaz hem de kullanma tekniğinde hiçbir şekilde kapanmış olarak görülmeyeceğinden, gelecek için artan uygulama alanı beklenebilir.

Montaj parçalarının sürekli olarak küçülmesi birleştirme tekniğinin daha küçük boyut alanlarına yayılmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle mekanik ve termik olarak çok yüklenmiş bağlantılar için, diğer birleştirme usulleriyle birlikte kaynak tercih edilmektedir. Küçük boyutları kapsayan alanda, klasik kaynak usulleri (elektrik direnç kaynağı hariç) kesinlikle kullanılmaz. Bu durum, termokompresyon, ultrasonik, elektron ışını ve laser ışını kaynağı gibi, yeni tip birleştirme usullerinin gelişimini teşvik etmiştir. Bunların arasından laser kaynağı, bir seri özel avantajları dolayısıyla kendini göstermiştir (Işıldak, 1990).

1. Birkaç mikron bölgesinde ki iyi odaklanma kabiliyetinden ve 10^8 W/cm²'nin üzerindeki yüksek güç yoğunluğundan ötürü, tungsten (wolfram) gibi yüksek sıcaklıklarda eriyen (3400 °C) metaller kendiliğinden erirler ve bununla birlikte ısı etkiler ısıya karşı duyarlı civar bölgeler üzerinde minimumla sınırlandırılabilir.
2. Kaynak süresi olarak (konsantre edilmiş ısı iletimi şartına bağlı kalarak) iri taneli, tekrar kristalleşmiş ve segragasyon gibi uygun olmayan iç yapı değişikliklerini geniş ölçüde giderebilecek ve yüksek üretim hızlarına erişebilecek şekilde, noktasal bağlantılar için birkaç ms yeterlidir.
3. Laser ışını temassız çalışır, yani takım ile iş parçası arasında hiçbir mekanik kontak oluşmaz ve iş parçasının istenmeyen alaşımlanması veya distorsiyonu önlenmiş olur.
4. Laser ışınının üretimi, ne mikro plazma kaynağındaki gibi koruyucu gazların kullanılmasını, ne de elektron ışını ile kaynaktaki gibi bir vakuma bağlı kalmayı

gerektirir. Bundan ötürü, özellikle seri imalat için, imalat maliyeti çalışma hızı ve otomatize edilebilme bakımından dikkate değer avantajlar ortaya çıkar.

Laser ışığı ile alelade bir ışığın farkı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



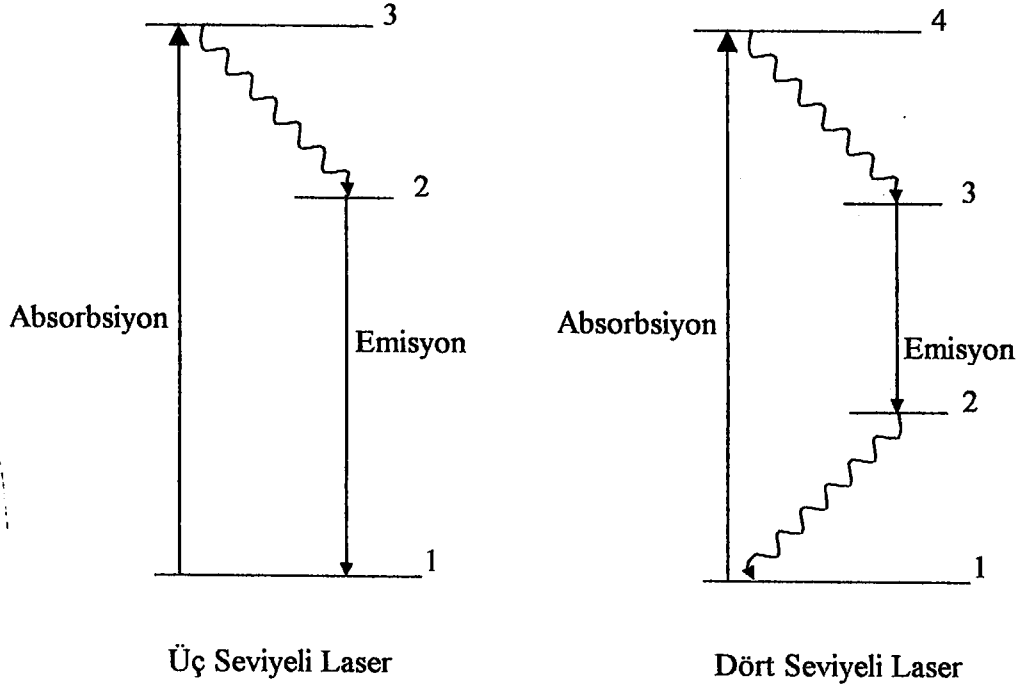
Şekil 2.1. Laser ışığı ile alelade ışık (Dağlılar, 1969)

2.2 Laser Sisteminin Çalışma Prensibi

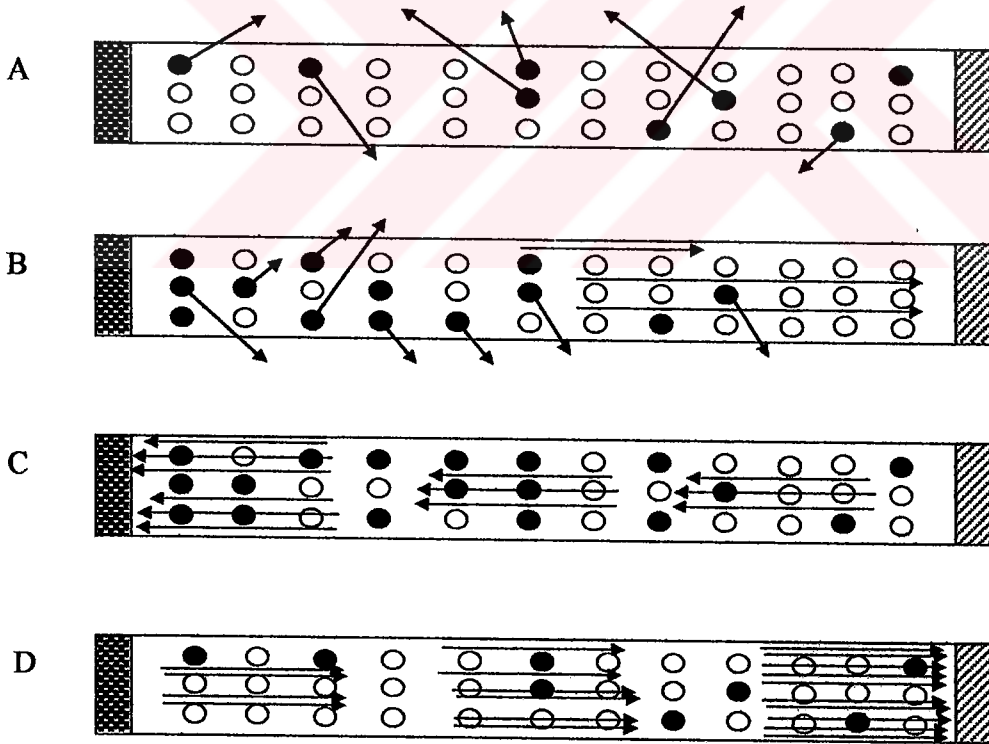
Laser sisteminin gerçekleştirilmesinde atom fiziğinin temel prensiplerinden olan her atomun enerji (kuantum) seviyesine sahip olmasından yola çıkılmıştır. Isı dengesi süresince düşük enerji seviyesinde bulunan atomlar bir dış kaynaktan enerji absorpsiyonu ile yüksek seviyelere tahrik edilebilirler.

Genellikle dış kaynak olarak elektro-manyetik radyasyon kullanılır. Özetle, elektro-manyetik radyasyonun bir fotonunu absorbe eden atom üst enerji seviyesine sahip olur. Üst enerji seviyesine sahip, tahrik olmuş atomlar, ısı değişimi ile ivedi olarak bir ara enerji seviyesine, daha sonrada eski durumları olan yer seviyesine dönüşürler. Bu düşüş aktif iyonlar içeren laser sistemlerinde 3 veya 4 aşamalı olarak meydana gelir (Şekil 2.2). Atomlar düşüş esnasında optikal spektrumun kırmızı bölgesinde ışık yayarlar, bu da komşu atomların daha hızlı dönüşümünü ve olayın hızlanarak devamını sağlar.

Laser çubuğu içinde belirli bir enerji birikiminden sonra kısmi geçiren uçtan kaçan laser, tek renkli ve ayrılmaz nitelikte ışık kümesidir (Şekil 2.3).



Şekil 2.2. Üçlü ve dörtlü laser sistemlerinin absorpsiyonu ve emisyonu (Aykol, 1985)



Şekil 2.3. A: Normal yayılma, C,D: Tahrik edilmiş yayılma
 ○ : Tahrik edilmiş atomlar ● : Yer seviyeli atomlar
 (Aykol, 1985) (Dağlılar, 1969)

2.3 Laser Cihaz Tekniği

Bir laser sistemi esas olarak iki parçadan oluşur, optik resonatör (laser kafası) ve kumanda düzenli enerji kaynağı. Laser kafasının içerisine sevk edilen enerjinin bir bölümü laser aktif madde (ortam) tarafından hacim ve zamana bağlı olarak elektromağnetik bir ışına çevirilir. Aktif madde katı, sıvı ve gaz şeklinde olabilir. Sıvı hal laseri, malzeme işlemek üzere, şimdiye kadar hiç kullanılmamıştır. Katı hal laserinin uygulamada en fazla kullanılanları; Neodin-YAG ve Neodin-cam, ender olarak ta Rubin (yakut)'dir. (YAG: Yttrium-Alüminium-Garnet). Katı hal laserleri optik olarak yeni ışık şeklinde tahrik edilir. Gaz hal laserinde malzeme işlemek için genellikle karbondioksit, ender olarak da argon laser aktif gaz kullanılır. Enerji giriş, elektriksel olarak bir gaz boşalımı şeklinde oluşur.

Çizelge 2.1 Laser cihazlarının işletme şekli ve işletme usulleri (Anık, 1983)

İşletme çeşitleri Laser	Tek darbeler	Kuazi-Sürekli	Sürekli
Rubin	Nokta kaynağı	Dikiş kaynağı	
Nd-Cam Nd-YAG	Delme Noktasal sertleştirme	Kaldırma (tesviye) (Dikiş kaynağı)	Kaldırma (tesviye) (Dikiş kaynağı)
CO ₂		Kaldırma (tesviye) (Dikiş kaynağı)	Dikiş kaynağı Kesme Kaldırma Çizgisel sertleştirme

Laserler ya sürekli yada darbeli olarak çalışabilir. Farklı laserler, ışını farklı dalga boylarında açığa çıkarırlar (ihraç ederler). Bu durum, işlenen malzemelerin absorpsiyon derecesi için etkilidir ve erişilebilen küçük odak çapını sınırlar. Laser cihazlarının işletme şekli ve işletme usulleri Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Çıkış gücü, demetin ortasında (ışın ekseninde) bir Gauss amplitüd dağılıma sahipse, ışın Gauss ışını olarak adlandırılır ve işletme durumu "Single-Mode" veya TEM₀₀-Mode" işletme olarak tarif edilir. (TEM: Transversal Elektromagnetik "Optik" Dalga). Yüksek mertebeden modlar ortaya çıkarsa, ışın kesiti üzerinde birden fazla odak noktası (güç

yoğunluğu maksimumu) oluşur. İşletme durumu böylece “Multi-Mode-İşletme” olarak adlandırılır.

2.4 Kaynakta Kullanılan Laser Sistemleri

Kaynakta kullanılan laser sistemlerini iki grupta toplamak mümkündür (Genceli, 1985).

1. Yüksek güçte katı-durum laser sistemleri

- a) Ruby laser sistemi
- b) Glass laser sistemi
- c) YAG laser sistemi

2. Yüksek güçte gaz laser sistemleri

- a) CO₂ laser sistemi
- b) Argon iyon laser sistemi

2.4.1 Yüksek güçte katı-durum laser sistemleri

2.4.1.1 Ruby laser sistemi

İlk geliştirilen ve uygulamaya yöneltilen laser sistemlerinden birisi olan Ruby laser sisteminin çubuğu Al₂O₃ kristallerinden meydana gelmiştir. Al₂O₃ yaklaşık olarak 1/1000 oranında aktif element olarak Cr⁺³ (Cr₂O₃) içermektedir. Oldukça iyi optikal kaliteye, yüksek ısı iletimine, yeterince sertliğe ve dayanıklılığa sahip olması nedeni ile bir çok avantajları olan ruby laser çubuğunun ölçüleri, çapta; 0,1 cm-2 cm, boyda; 2 cm-25 cm arasında olabilir (Aykol, 1985). Ayrıca laser karakteristikleri laser çubuğunun sıcaklığı ile yakından ilgilidir. Bu nedenle soğuma olayının yüksek verimde gerçekleşmesi gerekir. Ruby laser çubuğu bu konuda da tatminkar sonuçlar vermektedir.

Bir ucu tam yansıtıcı ayna ile diğer ucu kısmi geçiren ayna ile kapatılmış olan silindirik şeklindeki Ruby laser çubuğu, dışarıdan bir kaynaktan bombardıman edilir. Meydana gelen zincirleme tahrik sonunda tüp içindeki enerji yoğunluğu belirli bir seviyeye ulaşır ve bunun sonucu olarak yarı geçiren uçtan laser kaçış imkanı bulur. Laser çubuğu ve flaş lambası; silindirik, elips veya çift elips şeklinde olan yüksek yansıtıcı yüzeylerle sınırlandırılırlar.

Flaş lambası olarak çoğunlukla xeon lamba kullanılır. 6773 °C'e kadar ulaşan bu lamba yaklaşık olarak 150 ton basınçta xeon gazı ile doldurulmuştur.

2.4.1.2 Glass laser: Nd³ sistemi

1961 yılında ilk defa gerçekleştirilen aktif element olarak Nd⁺³ içeren Glass laser, baryum veya yüksek silikatlı camdan yapılmaktadır. Glass laser çubuğunun boyu 180 cm uzunluğa

kadar olabilir. Mükemmel optik özelliklere sahip olmasına rağmen, düşük ısı iletkenliği glass laser için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Pulsed veya Switched şeklinde dizayn edilebilirler.

Glass laser sisteminde 1 m'lik bir laser çubuğunda 4 flaş lambası kullanılarak yaklaşık 3 milisaniyelik pulse süresinde (bu süreler laser çubuğunun uzunluğu ile bağıntılıdır) çubuktan 30 mm uzaklıktaki odak noktasına 5000 J'lük enerji uygulanabilmektedir (Beesley, 1978). Bu yüksek enerji ve pulse süresinin uzun olması kaynak için aranan bir niteliktir.

2.4.1.3 YAG laser sistemi

Bu sistemde yine Nd^{+3} iyonu YAG içinde aktif element olarak kullanılmıştır. YAG formülü $Y_3Al_5O_{12}$ olan "Yttrium-Aluminum-Garnet"dir. YAG içindeki Nd oranı % 3'ten fazla olduğunda, florasan olayının zamanı yaklaşık 200 mikrosn'dir ve Nd oranının % 6'nın üzerinde olduğu zaman ise meydana gelen Nd-Nd reaksiyonu nedeni ile florasan süresince bir azalma meydana gelmektedir (Beesley, 1978).

YAG; sert, dayanıklı ayrıca iyi optikal özellikleri ve iyi bir ısı iletkeni olan alaşım olduğu için laser üretiminde kullanılmıştır. Fakat bu özelliklerinin yanı sıra 12-13 cm'den uzun olarak imalatı çok güçtür ve sistem olarak pahalıdır. Laser çubuğu ve flaş lambası altın kaplama bir yansıtıcı küre içindedir. Küçük boyutlardaki laser çubukları için bu küre yansıtıcılar 10-25 cm çaplarında olabilir (Cerit, 1996). Çubuklar küre eksenine ve birbirlerine paralel olarak yerleştirilirler.

YAG laser sistemini tahrik eden üç tip flaş lambası mevcuttur (Aykol, 1985). Bunlar:

1. Tungsten Flament Lamba:

3473 °C kadar kapasitesi vardır. Genelde düşük güç ve verimde olduğu için laboratuvar çalışmalarında kullanılır.

2. K-Hg Lambası:

Çalışma ısısı 4000 °K civarındadır. Bu tip lambalarda aşınma etkisinden ve yüksek sıcaklıktan dolayı safir koruyucu kullanılır. Sistem fazla pahalıdır ve uzun süre yüksek güçte kullanılmaya uygun değildir.

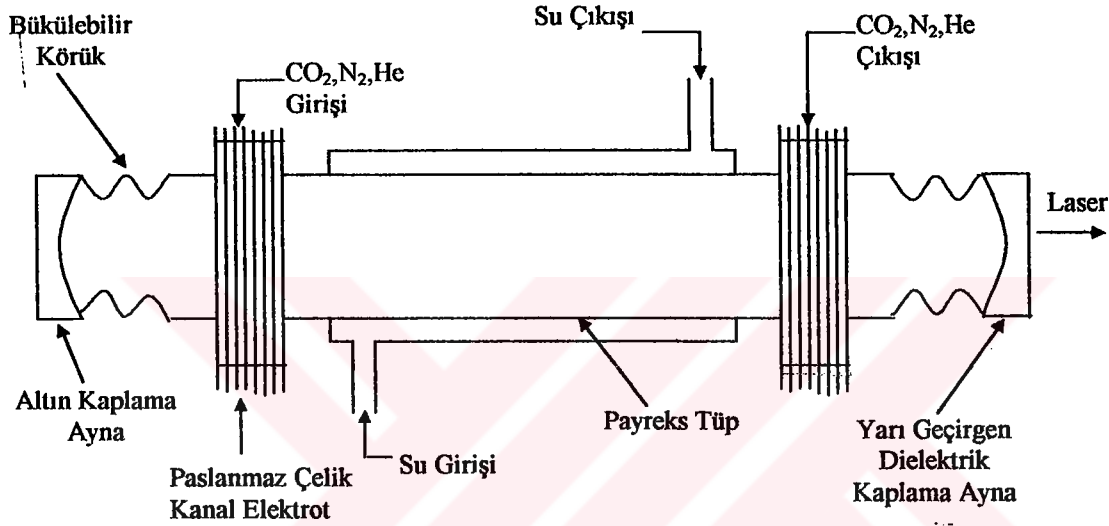
3. Yüksek Basınçta Xe veya Kr ark Lambası:

Su soğutmalı olan bu sistemlerde yüksek güçte çalışabilme olanağı vardır. Çift ark lambalı bir sistemde, 1.06 mikron dalga boyunda, 2.54 cm'lik odak uzaklığında 2×10^5 W/cm² güç elde edilmiştir.

2.4.2 Yüksek güçte gaz laser sistemleri

2.4.2.1 CO₂ laseri

İlk olarak yüksek ve devamlı güç elde edilen sistem CO₂ laser sistemidir. CO₂ laser diğer sistemlere göre verimi en yüksek olanıdır (%15-%20). Bunun yanı sıra CO₂ laserin dalga boyu 10.6 mikron olması ve bu nedenle kaynak bölgesinde bir yansıma meydana gelmesi CO₂ laser sisteminin bir dezavantajıdır.



Şekil 2.4 CO₂ Laser (Kahraman, 1987)

Şekilde görülen (Şekil 2.4) 150 W'lık CO₂, N₂, He laser sisteminde 0.5 kg/mm² basınçta N₂ ve 0.8 kg/mm²'ye çevrilerek basınçta He gazlarının karışımı tüp içine sürekli olarak pompalanır. Bu işlemin amacı, tüp içinde laser olayının meydana geldiği esnada oluşabilecek bozulma ve yığılmaları önlemektir. Tüp su soğutmalı, 2.5 cm çapında ve 2 m boyundadır. Bükülebilir iki dirseğe sahip olan tüpün her iki ucuna aynalar yerleştirilmiştir. Aynalardan birisi tam yansıma elde edebilmek için payreks veya çelik üstüne altın kaplama, diğeri kısmi geçiren ve germanyum üzerine yalıtılmıştır. Bu ölçülerde bir CO₂ laser çubuğundan 10.6 mikron dalga boyunda 120-150 W'lık devamlı güç elde edilmiştir.

Genellikle katı durum pulsed laser sistemleri için uygulanan Q-Switched sistemi CO₂ laser sistemi içinde uygulanabilmektedir. Döner ayna Q-Switched sistemi CO₂ laser sistemi içinde uygulanabilmektedir. Döner ayna Q-Switched sisteminin CO₂ laserde uygulanması

sonucunda her saniyede 400 pulsede 10.6 mikron dalga boyunda 100 KW güç elde edilmiştir.

2.4.2.2 Argon iyon laser sistemi

Sistem argon II'nin tahriki için gereken yüksek doğru akıma dayanıklı olacak şekilde özel olarak imal edilmiş bir tüp olmalıdır. Bu tüp segmentlere ayrılmış grafitten veya aşınarak delinmeye, yüksek ısı yüklemelerine karşı dayanıklı olması için BeO'dan imal edilir. Su soğutmalı olan bu sistemlerde nötr argonun elektro-foretik etkiler nedeni ile toplanmasını önlemek için gerekli tedbirlerin alınması gerekir. Argon iyon laser ticari olarak düşük güç gerektiren sistemlerde daha kullanışlıdır.

2.5 Laserin Endüstriyel Uygulamaları

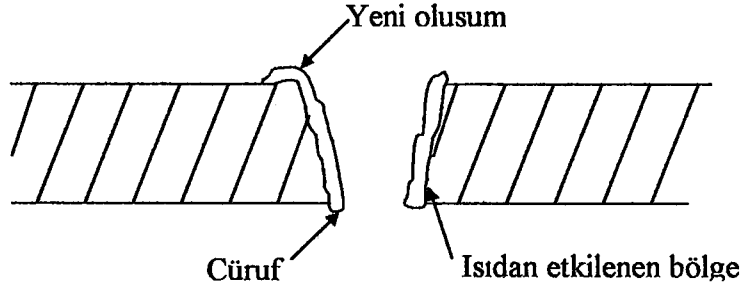
Laserin endüstriyel uygulamalarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

1. Laserle delme
2. Laserle kesme
3. Laserle yüzey sertleştirme
4. Laserle yivlendirme veya çizme
5. Gravür yapma, helezon açma ve haketme
6. Laserle ölçme teknikleri:
 - a) Holografik interferometre
 - b) Laser speckle tekniği
 - c) Laser diagnostikleri
7. Laserle hız ölçülmesi
8. Laserle kaynak

2.5.1 Laserle delme

Delme işleminde laser ışını parçaya kısa darbelerle verilerek yüzey ısıtılır ve malzemenin buharlaşması sağlanır. Buharlaşan ve eriyen malzeme üflenmiş bir gazla uzaklaştırılır ve geriye temiz bir delik kalır. Laser ışını ile delme özellikle küçük çaplardaki ve çok sayıdaki delme işlemleri için uygundur. Laser ile delmenin diğer üstünlükleri; parça söküp takma işleminin olmaması, malzeme kırılması ve deformasyonu olmaması ile klasik delme yöntemlerinden çok daha kolaylıkla istenilen yere ulaşılabilmesidir. Buna karşılık, ticari laser cihazlarında her bir darbede elde edilen enerjinin sınırlı olması nedeniyle büyük çaplı deliklerin delinmesinde laser ışını kullanmak pratik değildir.

Ayrıca odaklamak için kullanılan merceğe üzerine buharlaşmış malzemenin yoğunlaşması için bu mercekler işle malzeme arasında minimum bir uzaklıkta bulunmalıdır. Çok küçük deliklerin delinmesinde buharlaşma olayının meydana getirdiği genleşmeler deliğin kalitesine ve toleransına etki etmektedir. Laser ile çok kalın parçaların delinmesi, diğer yöntemlere göre daha pahalıdır. Laserle delme işlemi ile elde edilen bir delik, Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Laserle delmede oluşan delik (Hect, 1986)

Laserle delmede 0,1-1 mm arasındaki delik çaplarına erişilir. İşleme işlemi, parçacıkların kısmen sıvı kısmen de buhar fazında delikten dışarı atıldığı bir olaydır. Bundan ötürü, açılan deliklerin tamamen yuvarlak, düzgün ve silindirik olmamaları nedeniyle, daha sonra klasik usullerle işlenmeleri gerekir. Buna rağmen laserin uygulanmasıyla önemli miktarda zaman ve maliyet ekonomisi sağlanır (Yılbaş, 1985). Laserle delme, başlıca mekanik delme ve zımbalama usullerinin başarılı olmadığı yerlerde uygulanır. Mesela, ≤ 0 mm çaplı çok küçük deliklerin delinmesi gibi.

Malzemenin işleme kabiliyeti üzerine hiçbir etkisi olmadığı için bu usul; molibden, tungsten, sertleştirilmiş çelik, seramik, elmas, safir v.b. gibi malzemelerde, başlıca uygulama alanı bulur (Beesley, 1978). Kullanılan laser cihazları teorik olarak temel mod işletmesinde darbelendirilmiş katı laserlerdir. Büyük çaplı deliklerin delinmesinde darbelendirilmiş laser kullanılır.

2.5.2 Laserle kesme

Laser tekniğinin geliştirilmesiyle, ince plakaların da termik yöntemlerle temiz bir şekilde kesilmesi mümkün olmuştur. Laser ile kesme tekniği çok hassas kesimler yapılabilen ve

otomasyon için çok uygun olan bir yöntemdir. Laserle kesilmiş olan parçalar başka bir işlemde geçirilmeden, doğrudan doğruya üretimde kullanılabilirler. Laser ile kesmede, bir çok laser ışını üretici arasında öncelikle tercih edileni CO₂ laseridir (Akçam, 1996). CO₂ laserleri bir çok verim aralığında satışa sunulmaktadır.

Çizelge 2.2 230 W güçlü sürekli çalışan CO₂ laseriyle farklı malzemelerin kesilmesine dair datalar (Anık, 1983)

Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme Gazı	Kesme Hızı (mm-dak)	Kesme Ağız Genişliği (mm)
Çelik sac (St 37)	1.00	Oksijen	3000	0.1
Çelik sac (St 37)	3.00	Oksijen	600	0.2
Çelik sac (iki tarafı galvanizli)	0.75	Oksijen	3500	0.1
Ostenik çelik (118 Cr, 8 Ni)	1.00	Oksijen	1500	0.1
Titanyum alaşımı	2.00	Oksijen	18000	0.2
Titanyum alaşımı	10.00	Oksijen	2800	1.5
Titanyum alaşımı	40.00	Oksijen	500	3.5
Başlıklı pleksiylas	3.00	Azot	4500	0.4
Şeffaf pleksiylas	10.00	Azot	800	0.7
Polipropilen	5.50	Azot	700	0.5
Polistirol	3.20	Azot	4200	0.3
Sert PVC	7.0	Azot	1200	0.5
Cam elyaf (suni madde)	3.30	Azot	600	0.3
Polyester halı	10.00	Azot	2600	0.5
Keçe halı	5.50	Azot	8000	0.3
Tekstilller, naylon	0.1	Azot	2×10 ⁵	0.1
Pamuklu dokuma (çok katlı)	15.0	Azot	900	0.5
Ahşap	18.0	Azot	200	0.7
Alüminyumoksit	1.0	Oksijen	3000	0.1
Kuvarz camı	1.90	Oksijen	600	0.2

Çelik (kurşun, kalay, çinko ve krom kaplı çelik), titanyum, zirkonyum, niobiyum, tantal, nikel ve bu malzemelerin alaşımları gibi, teknikte kullanılan metaller, kesilmeye elverişlidirler (Çizelge 2.2). Laserle kesmede avantaj, klasik kesme usullerine nazaran, küçük kesme genişliğinin ve dar bir ısının tesiri altında kalan bölgenin elde edilmesidir. Hemen hemen yalnız CO₂ Laseri kullanılır (Çizelge 2.3). Buna karşılık alüminyum, pirinç, bakır, gümüş ve altın gibi yüksek yansıtımlı malzemeler, hiçbir şekilde CO₂ laseriyle kesilemezler (Anık, 1983).

Kesme işlemleri için, gücü 1500 W'a kadar olan laser düzenekleri kullanılır. Kesme işlemi için kullanılan düşük verimli laserlerin gücü yaklaşık olarak 600 W'a kadardır. Işın doğrultusunda hareketlenme hızı yavaş olan CO₂ laserlerin gücü ise 1500 W'a kadar

yükselir ve bunlar ışın doğrultusunda hareketlenme hızı yüksek olan CO₂ laserleridir (Üyepazarcı, 1970).

Çizelge 2.3 Diğer termik kesme usullerine nazaran, CO₂ laseri ile yapılan kesmede, kesme ağzı ve ısının tesiri altındaki bölgenin genişliği (Anık, 1983)

Termik kesme usulleri	Oksijenle kesme	Plasma kesmesi	CO ₂ laseri ile kesme
Kesme aralığı	1.0 mm	1.5 mm	0.4 mm
Isının etkisi altındaki bölge	3.2 mm	0.24 mm	0.06 mm

Çizelge 2.4 Laserle yapılan kesmede uygulama örnekleri (Anık, 1983)

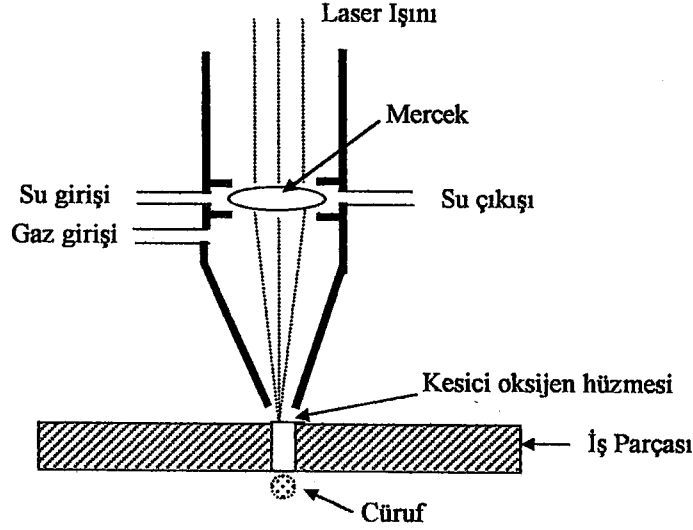
Uygulama	Malzeme ve malzeme kombinasyonları
Oto parçalarının ön fabrikasyonu için preslenmiş karoseri parçalarının kesilmesi	St 37-2
İklimlendirme ve havalandırma tekniğinde konstrüksiyon parçalarının kesilmesi	Galvanizli veya plastik (suni malzeme ile) kaplanmış St 37-2 çelik sacı
İşikli reklamlar için harf ve sembollerin imali	Pleksiglas St 37-2
Uzay ve havacılık endüstrisi için üst üste konan plakaların kesilmesi	Titanyum ve Titanyum kaplı malzeme
Gözlük çerçevelerinin şekilli kesilmesi	Sun'i malzeme (plastikler)

Laser ile kesmede laser ışını, ısı kaynağı işlevini yürütür. Bu ışın, laser gazının (alışlagelmiş olarak % 4.5 karbondioksit, %13.5 azot ve %82 helyum karışımı) elektriksel olarak aktivite edilmesi ile üretilir (Hecht, 1986). Laser elektrik enerjisi, yönlendirilmiş ışık ışımına bu ışın daha sonra kesme kafası üzerindeki mercekten geçirilerek kesilecek plakanın yüzeyine odaklanır. Bu odaklanmış laser ışınının yoğunluğu çok yüksek olan enerjisi, kesilecek olan plakayı tutuşturmak, eritmek veya buharlaştırmak için gerekli olan sıcaklığı sağlar.

Laserle yapılan kesmede uygulama örnekleri Çizelge 2.4'te gösterilmektedir. Laser ile kesme yönteminde erişilen yüksek sıcaklıklara ve kesilecek/işlenecek olan malzemenin cinsine göre, laser ile kesme yöntemi DIN 2310'da aşağıdaki gibi üç kısma ayrılmıştır (Akçam, 1996).

1. Laser-yakarak kesme (Şekil 2.6)
2. Laser-eriterek kesme

3. Laser-sublimasyon ile kesme



Şekil 2.6 Laser-yakarak kesme yöntemi (şematik) (Hecht, 1986)

2.5.3 Laserle kaynak

Laser çubuğundan çıkan ışık kümesinin mercekler yardımı ile odaklaştırılarak, mikron düzeyindeki alanlarda çok yüksek enerjinin açığa çıkartılması kaynak işleminin temelini oluşturur. Genellikle ince malzemeler üzerinde mikron derecesinde küçük ölçülerde çalışabilme özelliğinden dolayı lasere (mikro-kaynak) elemanı diyebiliriz. Mikron ölçüsündeki alanlar üzerinde çok yüksek güçler doğrudan laser sisteminin ince bir malzemeyi kaynatması için gerekli enerji miktarı, aynı ölçülerdeki malzemenin elektrik ark kaynağında kaynatılması için gerekli olan enerji miktarının 1/10'u kadardır (Anık, 1983). Ayrıca ürettiği yüksek enerji nedeni ile günümüz koşullarında yüksek ergime noktalarından dolayı kaynatılması çok zor olan Tungsten, Molibden, Kobalt, Platin, Vanadyum gibi yüksek dirençli metallerin de kaynağı başarı ile yapılmaktadır (Koç, 1995). Laser kaynağı için uygulama örnekleri Çizelge 2.5'te gösterilmektedir.

Laser kaynağı ile elektrik ark kaynağının enerji kaynakları açısından mukayesesinde görülmüştür ki; malzemenin birim derinliğindeki ergime, laser kaynağında daha az ısıtma ve soğutma süresinde meydana gelmiştir. Ayrıca daha dar ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) görülür. Örnek olarak ark kaynağı esnasında malzemenin alt ve üst noktaları arasında 70 °C'lik fark varken bu fark laser kaynağında 1200 °C'dir (Dağlılar, 1969).

Çizelge 2.5 Laser kaynağı için uygulama örnekleri (Anık, 1983)

	Uygulama	Malzeme veya malzeme kombinasyonları
Genel elektroteknik	Aşırı sıcaklık şalterinde kontaklı ölçme cihazları için spiral yayların nokta kaynağı. Eksenel bağlantılı bir daldırma termometresinin termobimetal. Bağlantı telli helezoni rezistansın nokta kaynağı. Bağlantı telli elektrik fişinin kontakt yayı. Küçük çıkıntuların soğutma kanatçıkları, elektronik devre elemanlarının bağlantı noktaları. Teyp kafası parçalarının birleştirilmesi. Taşıyıcı malzeme üzerindeki ikili altın kaplı kontaktların nokta kaynağı Ampul endüstrisinde ince tellerin alın kaynağı Televizyon tüpü parçalarının nokta kaynağı. Termo elemanlarda nokta kaynağı	Bimetal, yay bronzu Çelik veya pirinç, Yay bronzu veya termobimetal Termobimetal, çelik veya yeni gümüş, çelik Krom-nikel çeliği, Yay bronzu/pirinç Alüminyum Konstantan Duraterm/altın kaplama çelik Tungten (Wolfram) Nikel alaşımı Nikel/konstantanları
Elektronik	Kılıf içindeki yarı iletkene zarar vermeden diodların nokta kaynağı. Fişlerin bir solar (güneş) hücresi ile kontaklı	Gümüş/Gümüş
Saatçilik tekniği	Oynak yayın makara üzerine nokta kaynağı	Bronz/Pirinç Paslanmaz çelik / demir-nikel alaşımı
Cihaz tekniği Tıp	Nükleer teknolojide kovanların ve zarların sızdırmaz dikiş kaynağı. Kalp pili kılıfının dikiş kaynağı. Cam imalatında kırık dikiş kaynağı. Dişçilik takımlarının imalatı	Krom nikel çeliği Krom nikel çeliği Krom nikel çeliği

Laser kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre bir çok avantajları vardır. Bu avantajları şu şekilde sıralayabiliriz (Kahraman, 1987).

1. Laserin enerji kaynağı ışıktır ve düşük enerji miktarı ile çok küçük birim alanda çok yüksek güç yoğunlukları elde edilebilir (10^6 W/cm²).
2. Herhangi bir manyetik alan olmadığı için manyetik alandan etkilenme söz konusu değildir.
3. Enerji iş parçasına çok kısa bir süre içinde uygulanır ve hemen peşinden soğuma için yeterli süresi kalır.
4. Sistemin iş parçası ile mekanik kontağı yoktur. Çok kolay kumanda edilir.
5. Işın mercekle yardımcı ile istenilen şekilde yönlendirilebilir. Bükülebilir. Ayrıca cam, su gibi değişik ortamlarda gerçek kaynak yapma imkanı vardır.
6. Diğer kaynak sistemlerine göre iş parçası üzerinde (HAZ) "Isıdan etkilenen bölge" alanı, ayrıca yüksek ısı nedeni ile meydana gelen tahribat ve deformasyon en azdır.
7. Çok hızlı soğuma istenen metallerin kaynağı da laser ile mümkündür.

8. Mekanik özellikleri, fiziksel özellikleri veya kütleleri farklı metallerde kolaylıkla kaynatılabilir. Kaynak bölgesinin özellikleri ana metalin özelliklerine çok yakındır.

Kaynak esnasında büyük bir enerji yoğunluğu açığa çıktığı için kaynak ve delme işlemleri arasındaki sınırı çok iyi belirtmek gerekir. Kaynak için buharlaşma olayı en azda tutulmalıdır. Aksi takdirde fazla enerji nedeniyle meydana gelen aşırı buharlaşma malzemenin delinmesine neden olur. Laserin bu özelliğinden faydalanılarak mikron düzeyinde çok hassas delme işlemleri de başarı ile yapılmaktadır.

Bir laser sisteminin ayarlanması için pulse'nin karakteristikleri, ünite kapasitesi, laser materyal tipi, operasyon modeli, odak mesafesi, kaynak olacak malzemenin kalınlığı ve fiziksel özelliklerine dikkat edilmelidir (Cerit, 1996).

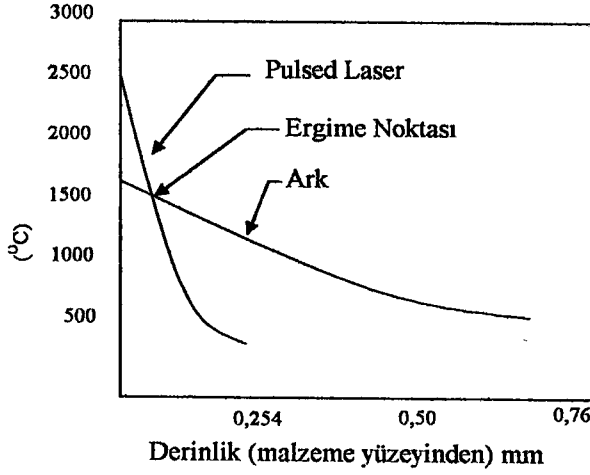
Laser kaynağı mikro-elektronik endüstrisinde hızla yerini almaktadır. Laser kaynağı günümüzde bilgisayar imalatında, elektronik aletlerin iş bağlantılarında, yüksek güç gerektiren küçük çaplı tellerin bağlantılarında farklı fiziksel özellikteki metallerin birleştirilmesinde, yüksek dirençli metallerin kaynağında, konumları nedeni ile birleştirilmeleri çok zor olan elemanların kaynağında başarı ile uygulanmaktadır (Kahraman, 1987).

Laser kaynağında birleştirme tasarımı şüphesiz sistemin özellikleri göz önüne alınarak yapılmalıdır. Bu alanda yapılan çalışmalar genelde elektronik bağlantılarda kullanılan tel bağlantılar üzerine yoğunlaştırılmıştır. Başlıca çapraz tel bağlantıları, çapraz lama bağlantıları, çapraz lama ve tel bağlantıları, paralel tel bağlantıları, paralel lama bağlantılarıdır. Pratikte bu tip birleştirmelerin genel direnç kaynağı veya lehime göre birçok avantajları vardır. Bunları şu şekilde sıralayabiliriz (Hecht, 1986):

1. Akım yolunda gereksiz metal yığılmaları yoktur.
2. Cüruf yoktur.
3. Birleşme yerlerinde ana metale yakın fiziksel özellikler görülür.
4. Kaynak operasyon ısı ile yüksek dirençli metallerinde birleştirilmesini sağlar.
5. Artan onarıma imkanı vardır.

Elektrikli aletler genellikle nem ve çevre bulaşıklarına karşı korunmak için cam, seramik gibi yalıtkanların içine yerleştirilirler. Sistemlerin üretim kolaylığı için bağlantılar laser ile, düşük enerji seviyesinde, yalıtkan çok yakın noktalarda ve yalıtkan üzerinde çatlak veya kırılma meydana gelmeden kolayca kaynatılabilirler. Levha kaynaklarında da gerekli enerji miktarı, kaynak olacak malzemenin kalınlığına eşit çaplı tel için gerekli olan enerji

miktarından yaklaşık olarak % 50 daha fazladır (Beesley, 1978). Laser ve ark kaynağında malzeme üzerinde derinliğe göre ısının yayılışı farklı durumlar göstermektedir (Şekil 2.8).

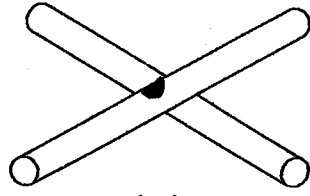


Şekil 2.7 Laser ve ark kaynağında malzeme üzerinde derinliğe göre ısının yayılışı (Aykol, 1985)

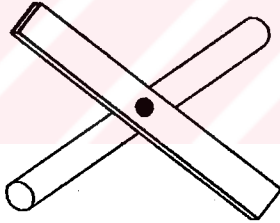
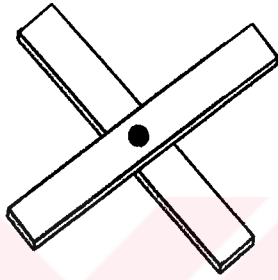
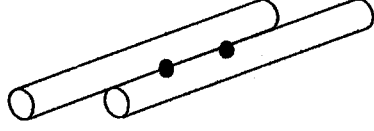
Laser kaynağının ilk çalışmalarına rastlayan 1960-1965 yıllarında; karşılaşılan en büyük problem yüksek maliyet idi. Ancak laser kaynağının diğer kaynak metotlarına göre, yeni ve daha önce bahsedilen birçok avantajlara sahip olması nedeni ile araştırmacılar bu konu üzerine eğilmiş, sistemin maliyeti düşürülmüştür. Bugün laser kaynak sistemi Avrupa ve Amerika'da ticari olarak kullanılabilen, yeterince ucuz bir kaynak elemanı olmuştur. Laser ve ark kaynağında malzeme üzerinde derinliğe göre ısının yayılışı Şekil 2.7'de gösterilmektedir.

Elektronikte ve uzay endüstrisinde kullanılan bir çok küçük cihazlarda, birbirlerine birleştirilmesi gereken birçok küçük kesitli metal parçaları vardır. Bu durumda ekonomik düşünceler, cihazlara olan yüksek güven ihtiyacı yanında ikinci planda kalmaktadır (Aykol, 1985).

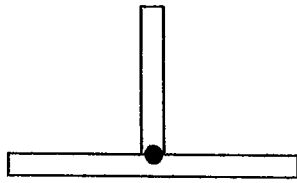
Laser kaynağı için bazı dizayn tipleri şunlardır: a) çapraz tel, b) paralel tel, c) çapraz lama ve tel, d) to bağlantısı (Şekil 2.9), bunların yanında çok daha zor konstrüksiyonların da laser kaynağı ile kaynak işleminin yapılması mümkündür.



(a)



(d)



(e)

Şekil 2.8 Laser kaynağı için bazı dizayn tipleri: (a) çapraz tel, (b) paralel tel, (c) çapraz lama ve tel, (d) to bağlantısı (Aykol, 1985)

BÖLÜM 3

METAL YAPIŞTIRMA TEKNİĞİ

3.1 Yapıştırıcılar

Metal yapıştırma bağlantısı iki metalik parçanın, yapıştırma görevini yapan ve genellikle sentetik esaslı bir yapıştırıcı yardımıyla, çözülemeyecek şekilde birleştirilmesiyle sağlanır. Yapıştırıcı, kimyasal reaksiyonlar sonucu makro moleküllerin oluşumu ile sertleşir ve gerek kendi iç mukavemeti gerekse parça yüzeylerine yapışması sonucu (adhezyon ve kohezyon kuvvetleri) dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar (Gediktaş, 1972).

Metal yapıştırma tekniği, özellikle hafif metal konstrüksiyonlar, sac levhaların takviyesi, boru, mil ve göbekli bağlantıların sağlanmasında kullanılmaktadır. İyi izolasyon özellikleri dolayısıyla da elektronik endüstrisinde kullanılmaları yaygınlaşmıştır. Hassas cihaz tekniği ve optik aletlerin üretimi de metal yapıştırmanın ağırlık kazandığı uygulama alanlarıdır. Farklı malzemelerin, örneğin; metal-organik malzeme çiftini uygun bir yapıştırıcı ile en iyi şekilde birleştirmek mümkündür (Apalak, 1998). Buna pratik bir örnek olarak fren balatalarının fren pabuçlarına yapıştırılması gösterilebilir.

Ayrıca kaynak, perçin ve cıvata ile yapıştırma kombine edildiğinde, sızdırmaz ve korozyon tehlikesi olmayan, mukavemet özellikleri iyileştirilmiş bağlantılar elde edilmektedir. Özellikle otomotiv endüstrisinde yapıştırma-nokta kaynağı kombinezonu büyük bir önem taşımaktadır (Anık, 1986).

Bir yapıştırıcı (adhesive) ASTM tarafından, “yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen malzeme” olarak tanımlanmıştır (Apalak, Z.G, 1995). Yapıştırıcının bir başka tanımı ise, “yüzeylere uygulandığında onları bir arada tutabilen ve ayrılmayı önleyen polimerik malzemedir” şeklindedir (Engin, 1997).

Yapıştırıcının birbirine yapıştırılacak benzer veya farklı malzemelerin özelliklerini değiştirmeden servis ömrü içinde onları birarada tutacak fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması istenir. Bu nedenle endüstriyel yapıştırıcılar için aşağıdaki üç faktör önemlidir (Kılık, 1987).

1. Birleştirilecek iki malzemenin yüzeyleri arasını dolduracak şekilde akıcı olmalıdır.

2. Akarken birleştirilen malzemelerin yüzeylerini tamamen ıslatmalıdır.
3. İstenilen yükleri taşıyacak mukavemette katı veya viskoz jel yapıştırma bağı oluşturmalıdır.

Genel olarak organik ve inorganik doğal yapıştırıcılar düşük mukavemetli yapışma bağına sahiptirler. Bundan dolayı yük taşıyan yapı elemanlarının birleştirilmesinde yukarıdaki şartları sağladıktan sonra daha kuvvetli yapışma bağlarına sahip plastik esaslı sentetik yapıştırıcılar kullanılmaktadır.

Endüstriyel yapıştırıcılar sıvı, pasta veya katı şekillerde olabilirler; fakat uygulamalarda en çok sıvı ve pasta şeklinde olanlar kullanılmaktadır. İki bileşene sahip olanlar normal şartlarda sertleşirken tek bileşenli olanlar ısı işlemlerle sertleşirler.

Yapıştırıcıları iki grupta incelemek mümkündür (Engin, 1997).

1. İnorganik yapıştırıcılar
2. Organik yapıştırıcılar
 - a) Tabii (doğal) yapıştırıcılar
 - b) Sentetik yapıştırıcılar

Endüstriyel yapıştırıcılar; termoplastikler, elastomerler, termosettingler ve bunların çeşitli kombinasyonlarına sahip sentetik yapıştırıcılardır. Bunlardan bazıları:

Anaerobikler: Akrilik rezin esaslı olup genelde sızdırmazlık ve kilitleme elemanı olarak, zor şartlarda ise sıvı conta malzemesi olarak kullanılırlar. Ancak çok eksenli gerilmeye maruz malzemeler için uygun değildirler.

Syanoakrilikler: Bunlarda akrilik rezin esaslı olup anaerobiklere benzemezler. Hızlı polimerleşen yapıştırıcılar olduklarından sertleşmesi birkaç saniye içinde tamamlanır. Genelde küçük plastik malzemelerin yapıştırılmasında kullanılır. Metal yapıştırılması halinde ortam nemi ve sıcaklık dikkate alınmalıdır.

Epoksiler: Epoksi rezin esaslı olup iki veya tek bileşenli olabilirler. Metal-metal birleştirmede kullanılabileceği gibi, metal-metal olmayan malzemelerin birleştirilmesinde de kullanımı uygundur (Lee, Neville, 1957).

Poliüretan: Epoksilere benzer olup genelde biri sertleştirici özellikte iki bileşenden meydana gelirler ve neme karşı hassastırlar.

Toklaştırılmış yapıştırıcılar: Tokluğu arttıran elastik (lastik) çok küçük ikinci fazın katılmasıyla elde edilmişlerdir. Akrilik ve epoksi esaslı yapıştırıcılara başarıyla

uygulanmış, kayma mukavemetlerinde çok fazla azalma olmaksızın darbe dirençlerinde ve soyulma mukavemetlerinde iyileşme sağlanmıştır. Epoksi esaslı olanlar çeşitli yapılarda verimli olabilmektedirler.

Yapıştırıcıların özellikleri çok farklı moleküler ve atomik yapılarda ortaya çıkar. Mukavemetleri ve elastisiteleri metallerdeki gibi atomik etkileşimden ziyade moleküler olarak oluşur. Sadece çatlak yayılması gevrek metallerde meydana gelen olaylara benzer olarak değerlendirilebilir. Son yıllarda, kimya endüstrisindeki önemli gelişmelerin sonucunda geliştirilen plastikler, başlangıçta diğer malzemeler için yedek olarak düşünülmüştür. Ancak yapılan çalışmalar, plastiklerin birkaç malzeme yerine kullanılabilmesi ve birçok halde de bu malzemelerden daha üstün özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Örnek olarak kısa bir zaman öncesine kadar, kereste, kağıt, lastik, deri, seramik ve diğer malzemeler için yapıştırıcı olarak sadece bitkisel, hayvansal yada mineral malzemelerden faydalanılırdı. Plastik esaslı sentetik yapıştırıcıların elde edilmesi ve bunların güçlü bir yapışma özelliğine ve dirence sahip olmaları diğerlerine göre daha avantajlı olmalarını sağladı.

Yapıştırıcı ile birleştirme, son yıllarda birçok uygulamada perçinleme, kaynak ve mekanik bağlama gibi alışılmış metotlara tamamlayıcı olabileceğini yada onların yerine kullanılabilmesini göstermiş olan bir birleştirme tekniğidir. Uçak konstrüksiyonlarında ve ahşap yapılarda, yapıştırılmış yapıların mukavemeti ve gerilme değişimlerine olan dayanımı uzun yıllardan beri bilinmektedir.

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin gelişmesi İkinci Dünya Savaşı boyunca olmuştur. Bu teknik polimerik kompozit malzemeler gibi farklı malzeme özelliklerine sahip yapısal bileşenler için de kullanılır. Doğru tasarım ve uygun yapıştırıcının tam kullanımı ile mukavemetli ve emniyetli bir şekilde metal parçaların montajı da yapılabilmektedir. Bu şekildeki bir bağlantıda metalde ve bağlantıda gerilme altında zayıflama oluşmaz. Fakat iyi sonuçlar elde etmek için kaliteyi etkileyen faktörlerin ve birleştirme bağlantılarının özelliklerinin dikkatli bir şekilde incelenmesi gerekir.

Tüm yapıştırıcılar yapıştırıldıkları malzemelerde iyi bir temas sağlayabilmek için iyileştirme evrelerinde sıvı halde olmalıdırlar. Bazı yapıştırıcılar için bu hal çözücüleri veya taşıyıcılar kullanılarak yada bu fazlar ortadan kaldırılarak iyileştirme yapılabilir. Bazı yapıştırıcılar ince film şeklinde ve yüksek sıcaklıklarda sıvılaşıırken bir kısmı da yüksek sıcaklıkta yada karıştırılarak polimerize olabilen bir yada iki bileşenli sıvı sistemlerinden meydana gelir.

Kullanılan yapıştırıcı tipine, bağlantı tasarımına, uygulama metotlarına ve son sistemin amaçlanılan işlevine bağlı olarak yapıştırıcı ile birleştirme bir veya daha fazla fayda sunabilir. Bunlardan bazıları(Gediktaş, 1972):

1. Bileşim, genişleme katsayısı, elastiklik modülü ve kalınlık gibi özellikler bakımından farklılık arz eden değişik tip malzemeler birleştirilebilir.
2. Vida, perçin gibi çıkıntılı bağlama elemanlarınca sebep olunan düzensiz yüzey hatları yapıştırıcı ile birleştirme durumunda ortadan kaldırılarak son sistemin görünüşünde iyileşme sağlanır.
3. Cıvata, vida gibi bağlama elemanları ve nokta kaynağında küçük temas alanlarında ortaya çıkan gerilme yığılmalarının azaltılması ile tüm yapıştırma alanı boyunca daha düzenli gerilme dağılımı sağlanır. Böylece ağırlık ve maliyetten tasarruf sağlanarak ince malzemelerde dayanıklı bir şekilde birleştirilebilir.
4. Gerilmelerin emilmesine, dağıtılablmesine ve iletilebilmesine müsaade eden bir çok yapıştırıcının yapışma bağlarının dinamik darbelere karşı yüksek dayanım kabiliyeti ve gerilme-uzama kabiliyeti, dolayısıyla özellikle yorulma direnci iyileşir ve titreşimlere karşı direnci ve esnekliği artar.

Yapıştırıcı tekniğinin kullanımı, tasarımı ve imal usullerini basitleştirdiğinden maliyette kazanç sağlar. Yapıştırıcı kullanımı kalitede ve kullanımda iyileşmeler ağırlıkta kazanç, daha az birleştirme elemanı kullanımı, iş üretkenliğinde bir artışta sağlayabilmektedir.

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin sınırlı olarak uygulanmasına neden olan mahzurlarından bazıları ise; bağlantı dayanımının işleme şartlarına bağlı olması, soyulma tarzında kopmalardan sakınmak için özel bağlantı tasarımı gerektirmesi ve özellikle ısı gibi olağanüstü çalışma şartlarına yapıştırıcı direncinin az olmasıdır. Ayrıca yapıştırma işlemi, beraberinde birçok karmaşık işlemi getirir. Birleştirmeden önce bileşenlerin hazırlanması, ısı ve basınç gibi özel çevre şartlarının sağlanması, özel yapıştırma yan gereçleri gerektirmesi bağlantı maliyetini arttırır (Apalak ve diğ., 1995) (Kılık, 1987). Ancak yapıştırıcıların çok kötü çevre şartlarına dayanabilmesi için uğraşmaktadır. Bu çevre şartları, çok yüksek ve düşük sıcaklıklar, yüksek vakum, ultra viyole ve X-ışınları, aktif akışkanların ve yakıtların yapıştırıcıya aksi tesirleri, sürekli yüksek oranlarda yükleme, uzun çalışma döneminde yaşlanma olarak sıralanabilir (Lee, Neville, 1957).

Yapıştırıcılar metallerin birleştirilmesinde 50 yıldır kullanılmaktadır, ancak bu geçen süre içerisinde hatırı sayılır bir deneyim kazanılmıştır. Mühendislik yapılarında yapıştırıcılar artan bir oranda kullanıma sahip olmaktadır. Getirdiği maliyet kazançlarından dolayı

gelecekte mühendislerin ve imalat hattında teknik elemanların göz ardı edemeyeceği kadar diğer birleştirme teknikleri üzerinde avantajlara sahip bir teknik olma yolundadır.

3.2 Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözülemeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantıların tümünün yerini alacağı düşünülmesi yanlıştır. Bu alışılmış birleştirme tekniklerinin her biri farklı şartlar altında kendine özgü üstünlüklere sahiptir. Değişik birleştirme usullerinin belirli avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki şekilde izah ve mukayese edebiliriz (Apalak, 1998), (Rende, 1996), (Bozacı, Kosif, Çolak, 1995).

3.2.1 Perçin bağlantıları

Perçin bağlantılarında gerilme yayılımı düzgün değildir. Perçin delikleri kesiti küçültür ayrıca çentik etkisi nedeniyle deliklerin kenarlarında kritik gerilme uçları oluşur. Bindirme perçin bağlantılarında kuvvet tam ortada etkimeydiği için, ek olarak bir eğilme momenti de ortaya çıkabilir.

3.2.2 Kaynak bağlantıları

Kaynak yoluyla parçalara uygun bir yerleştirme ve şekillendirme vererek, malzemelerden en iyi bir tarzda yararlanıp, iyi bir birleştirme yapmak mümkündür. Ancak kaynak işlemi sırasında, malzemenin ergimesi ve daha sonraki soğuma şartları, malzemelerin iç yapısındaki değişimler, iç gerilmelere ve düzgün olmayan gerilme dağılımlarına yol açar. Dolayısıyla da mukavemet değerlerinde bir azalma söz konusu olur.

Farklı malzemelerin birbirleriyle kaynak edilmesi de bir çok sorunlar doğurur. Birleştirilecek malzemelerin her ikisinin de aynı tip olması durumunda kaynak mümkün olabilmektedir. Kaynak işlemi yüksek dayanımlı çeliklere ve metal alaşımlara özellikle tatbik edilebilir. Bunların da bazılarının kaynak edilebilme kabiliyetleri oldukça düşüktür ve bu nedenle uygulamada kaynak edilemezler.

3.2.3 Lehim bağlantıları

Lehimleme ile farklı malzemeleri birleştirmek mümkündür. Ayrıca, kaynak işlemindeki kadar büyük termik zorlamalara rastlanmaz. Lehimleme sıcaklığı birleştirilen malzemenin ergime derecesinden daha düşüktür. Bununla birlikte sert lehimleme de iç yapı değişimleri ortaya çıkabilir. Lehimlemede dekapan kullanıldığı için yüzeyler iyi temizlenmezse korozyon tehlikesi doğar. Benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde, örneğin çelik ve

alüminyumun birleştirilmesinde olduğu gibi galvanik korozyon oluşabilir. Hafif metallerin lehimlenmesinde oldukça sorunludur. Lehimleme değişik tip pahalı malzemeleri gerektirir. Örneğin lehim en pahalı epoksi yapıştırıcıdan % 30 daha pahalıdır.

3.2.4 Vida ve civata ile yapılan bağlantılar

Vidaların ve civataların tespiti için uygun deliklerin matkapla açılması veya darbeye delinmesi gereklidir. Bu işlemler birleştirilecek parçaların zayıflamasına neden olur ve ara boşlukların dolgu malzemeleri ile doldurulmasını gerektirir. Ayrıca bağlantılar yüklendiği zaman uniform olmayan gerilme dağılımları ortaya çıkar, şöyle ki, delik çevresinde delinme diğer bölgelerdeki gerilmelerin kat kat üstünde bir değere erişir. Buda yapıların ağırlığının artmasına neden olan daha kalın malzemelerin kullanımını gerektirir. Düzensiz gerilme dağılımları düşük yorulma dayanımlarına da sebebiyet verir. Diğer olumsuzluklar ise kılcal ve mekanik temas korozyonu tehlikesi, yüzey düzgünsüzlüğü, tekrarlı yükler altında yumuşamadır. Ayrıca, vidalar ve civatalar ile birleştirme genellikle yavaş ve emek tüketici bir işlemdir.

3.2.5 Sıkı geçme bağlantıları

Soğuk veya sıcak presleme usulü ile birleştirme sınırlı bir uygulamaya sahiptir. Bu işlem genellikle silindirik parçaların birleştirilmesinde kullanılır. Pahalı küçük toleranslı yüzey işlemleri gerektirir. Birleştirilen parçalar neden olabilecek gerilmeler göz önüne alınarak boyutlandırılmak zorundadır.

3.2.6 Yapıştırma bağlantıları

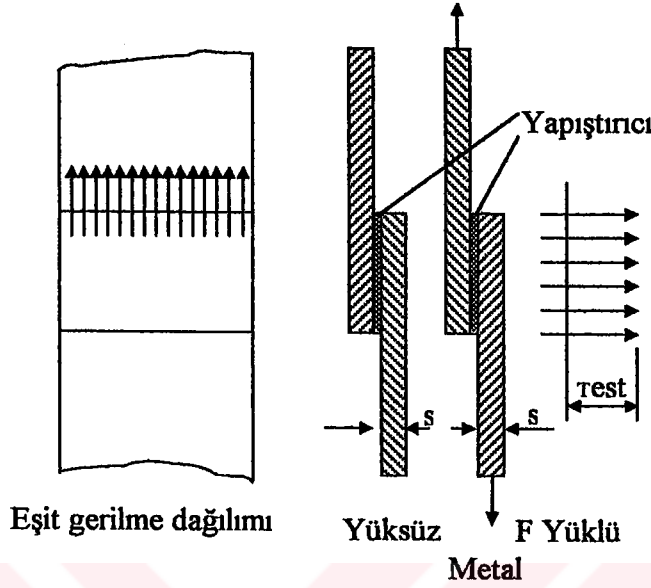
Metal yapıştırma bağlantılarında diğer bağlantılar için anılan sakıncaların birçoğu görülmez. Ancak, yapıştırma bağlantıları, diğer bağlantıların yerini alan bir bağlantı değil, onları tamamlayan ve onların uygulandığı durumlarda etkili olan bir yöntemdir.

Yapıştırma bağlantılarda, büyük bir termik ve mekanik zorlama olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer yöntemlere nazaran önemli bir avantajdır. Böylece, birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi iç gerilmeler yoktur. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere, yük yönündeki gerilme dağılımı ile yüke dik yöndeki gerilme dağılımı aynıdır.

Metal yapıştırma bağlantılarının tasarımında ki hususlar şunlardır (Cerit, 1996):

1. Yapıştırma bağlantıları her zaman büyük uygulama yüzeyi gerektirir.

2. Yapıştırma bağlantıları, esas metalin akma sınırı göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır.



Şekil 3.1 Bir yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımı (Gediktaş, 1972)

3. Yapıştırma bağlantıları mümkün olduğu kadar kayma (kesme) gerilmelerine maruz kalacak tarzda şekillendirilmelidir. Çekme zorlamaları bu bağlantı türü için uygun değildir. Eğilme ve özellikle sıyrılma zorlanmalarından kaçınılmalıdır.
4. Yapıştırma bağlantılarının dinamik mukavemeti özel bağlantı formları ile ya da kombine bağlantılarda kullanılarak önemli ölçüde yükseltilmelidir.
5. Yapıştırılan parçalar yüksek rijiditeye sahip olmalıdır.
6. Yapıştırma bağlantıları farklı metallerin birleştirilmesinde, özellikle metal ile metal olmayan malzeme birleştirilmesinde çok uygundur.
7. Yapıştırıcı kalınlığı yaklaşık olarak 0.1 mm olmalıdır. Yapıştırıcıya dolgu maddesi eklenmesi, yapıştırıcı özelliklerini değiştirir.
8. Yapıştırma bağlantıları sızdırmazlık ve izolasyon özelliklerine sahiptir.
9. Yerinde kullanılan yapıştırma konstrüksiyonları maliyetten önemli ölçüde ekonomi sağlar.

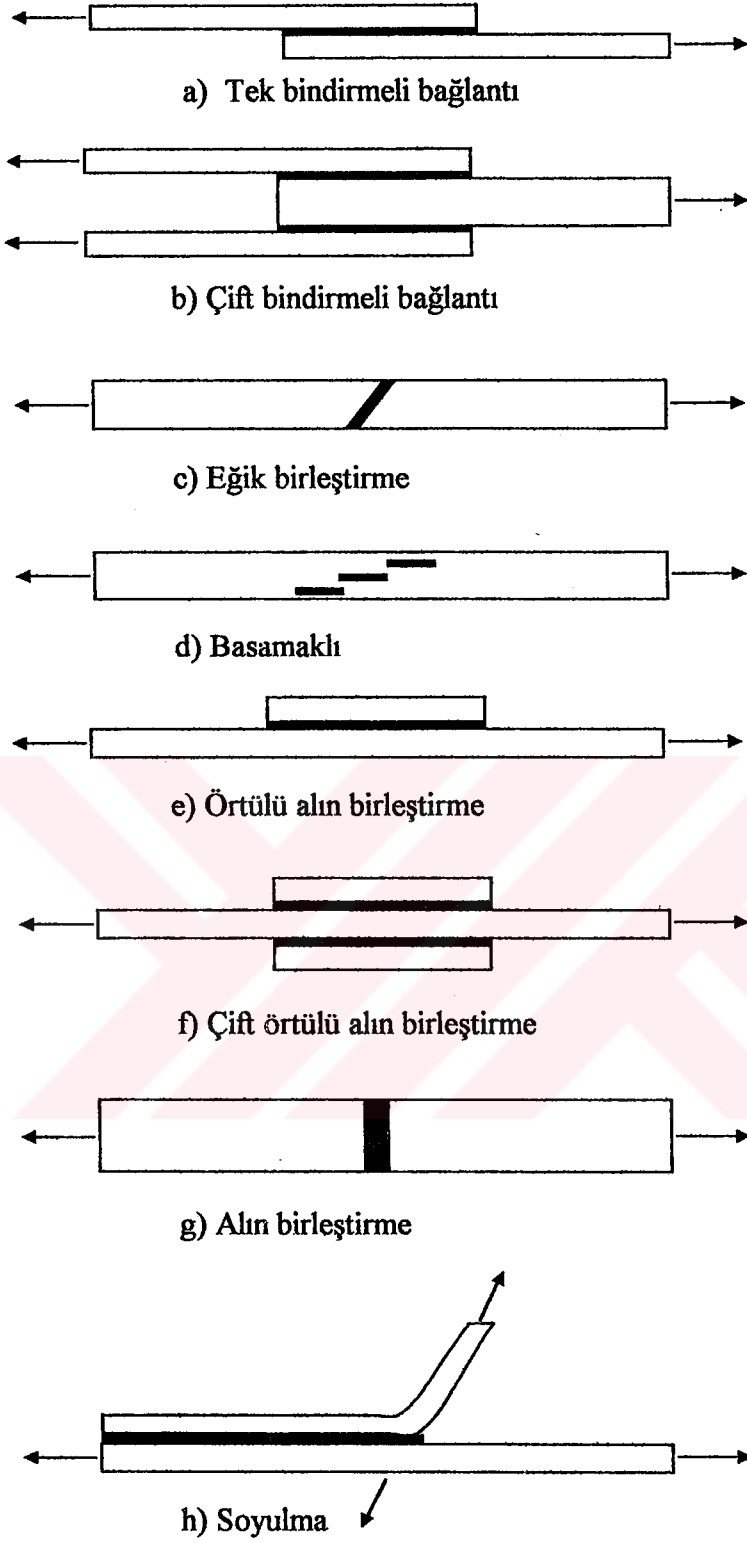
3.3 Yapıştırıcı İle Birleştirme Şekilleri

Yapısal mühendislik tasarımlarının temeli, yükleri ve dolayısıyla uygulamada karşılaşılması mümkün olan gerilmeleri tahmin edebilme yeteneğine bağlıdır. Yükleme sistemi genellikle fonksiyonlarla tanımlanır, ancak bir mühendisin becerisi mevcut olan en iyi malzemeyi uygun ve etkili bir çözüme ulaştıracak tasarım teknikleri ile birleştirilmelidir.

Şekil 3.2 günümüz mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan bazı tipik bağlantı sınıflarını göstermektedir. Pratikte oluşturulan herhangi bir bağlantı verilen yük grubunu taşıyacak şekilde tasarlanır. Yapışan malzemelerin çoğu çekme ile yüklenir. Yapıştırıcı üzerindeki ardışık yükleme, bağlantı geometrisinin bir fonksiyonudur. Şekil 3.2'a da tek bindirmeli bir bağlantı görülmektedir. Bu bağlantı şekilleri en çok yapıştırıcıları test etmede kullanılmaktadır.

Şekil 3.2'b de eğilmelerin dengelendiği bir çift bindirmeli bağlantı görülmektedir. Tek bindirmeli bağlantının bazı olumsuz yönleri bu bağlantıda görülmez. Şekil 3.2'h de gösterilen yapı ise bir çok soyulma testinin temelini oluşturur.

Şekil 3.2'c de gösterilen eğik bağlantı ile, Şekil 3.2'g de gösterilen alın birleştirmeye oranla yüzey alanı arttırılmıştır. Şekil 3.2'd de gösterilen basamaklı konstrüksiyonla yüzey alanı maksimum düzeye çıkarılmıştır.



Şekil 3.2 Uygulamada kullanılan genel yapıştırıcı bağlantıları (Engin, 1997)

3.4 Yapıştırma Bağlantılarının Mukavemetine Etki Eden Faktörler

Yüzey ön işleminin etkisi: Adhezyonun, yani metal ile yapıştırıcı arasındaki moleküler kuvvetlerin etkili olabilmesi için yüzeyin temiz, kir, yağ, oksit tabakası gibi yabancı maddelerden arınmış olması gerekir. Bu tabakalar uygun bir yöntemle temizlenmelidir.

Yüzey ön işlemi, efektif malzeme yüzeyinin (yapıştırıcı ile örülmüş yüzey) büyütülmesini de hedef alır. Dolayısıyla her yüzey ön işlemi pürüzlendirme işlevini de içerir. Uygun bir pürüzlendirme, her zaman yapıştırma mukavemetini yükselten bir etki yapar.

İş parçalarının mukavemete etkisi: İş parçalarının, yani yapıştırılacak malzemenin mukavemeti de yapıştırma bağlantısının mukavemetini etkileyen bir konudur. Bir malzemenin (metal) mukavemeti yükseldikçe, genişmesi azalır. Zorlamaya maruz ve büyük genişmeye sahip malzemelere nazaran daha çabuk bir ayrılmaya yol açar. Genel olarak yapıştırıcı mukavemeti ile iş parçası mukavemetinin birbirine çok yakın olması en uygun çözümdür.

Yapıştırıcının etkileri: Yapıştırıcının sertleşmesi sırasında büzülme oluşur. Eğer bu büzülme çok büyükse, dış yüklerin karşılanmasını önleyecek oranda iç gerilmelere yol açabilir. Bu açıdan düşük büzülme gösteren yapıştırıcılar metal yapıştırma için tercih edilirler. Epoksi buna bir örnektir (Lee, Neville, 1957).

Bunun yanında yapıştırıcı tipinin yani sertleştirici, ivmelendirici ve katalizörlerin yapışma mukavemetine etkisi çok büyüktür. Sıcak sertleşen yapıştırıcılar metal yapıştırma için tercih edilirler. Epoksi buna bir örnektir (Lee, Neville, 1957).

Sertleşme şartlarının etkileri: sertleşme işleminde sıcaklık, zaman ve bazı durumlarda da basınç etkilidir. Sertleşme şartları genellikle yapıştırıcı imalatçısı tarafından verilir. Bunlara uyulmaması halinde yapıştırıcının, dolayısıyla yapıştırma, bağlantısının özellikleri kötüleşir. En düşük sertleşme sıcaklığı seçilirse, sertleşme süresinin uzun tutulması gerekir. Buna karşılık yüksek sertleşme sıcaklıkları, çok kısa sertleşme sürelerine yol açar.

Bağlantı formunun etkisi: Bağlantı formunda tüm mukavemette önemli ölçüde etki eder. Sıyırılma, kesme, çekme türü zorlamalarda en iyi mukavemet değerlerini vermesine karşılık, pratikte hazırlama ve uygulama kolaylıkları açısından basit bindirmeli bağlantılar, en uygun bağlantı formunu oluşturur.

Bindirme uzunluğunun mukavemete etkisi: Bir yapıştırma bağlantısında, artan bindirme uzunluğu ile taşınabilir yük artar. Ancak bu artma lineer değildir.

Yapıştırma bağlantısına etki eden zorlama türünün etkisi: Yapıştırma bağlantılarının, dış yüklere karşı gösterdiği mukavemet değerleri, çeşitli zorlama türlerinde yüksek mukavemetten alçak mukavemete doğru olmak üzere sırasıyla şöyle bir durumdadır; çekme (basma), kesme, eğilme, darbeli zorlama, sıyırılma (Engin, 1997).

Diğer faktörler: İşletme sıcaklığı, yapıştırıcının kuluçka süresi (bileşenlerin karıştırılmasından sertleşmenin başlangıcına kadar geçen süre), sertleşme süresi, hava sıcaklığı ve nemi, yapıştırıcının iyi saklanması ve depolama şartları yapıştırma mukavemetini etkileyen şartları oluşturur.

3.5 Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilme Halleri

Yapışma bağlantısının zayıflaması ve davranışının incelenmesi, hem yapışma mekanizmasını anlamayı, hem de bağlantıdaki gerilme ve deformasyon hallerini anlamayı gerektirir. Yapışma mekanizması yapıştırıcı polimerlerin kimyasal ve fiziksel özellikleriyle ilgilidir. Mekanik deformasyon ve gerilme analizi ise, bağlantının geometrisinin, yükleme ve sınır şartlarının ve mekanik özelliklerinin bilinmesi varsayımlarına bağlıdır. Gerilme analizinin sonuçları genellikle makromekanik hassasiyetteki mukavemet ve zayıflama mekanizmalarını açıklar. Yapıştırıcı tabakasındaki bu zayıflık iki şekilde oluşur:

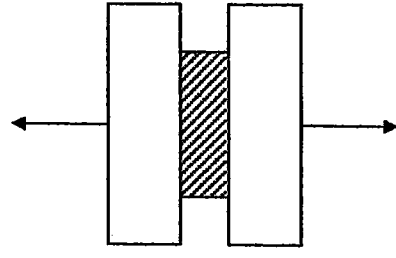
1. Yapıştırıcı ve yapışan malzemeler arasındaki ara yüzeyde meydana gelen yapıştırıcı zayıflaması.
2. Yapıştırıcıda yada yapışan malzemelerde meydana gelen aşınma zayıflaması.

Yapıştırıcı bağlantılarında karşılaşılan dört ana gerilme tipi mevcut olup sırasıyla:

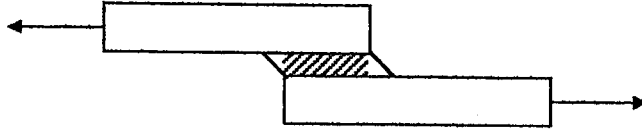
1. Çekme (tensile)
2. Kayma (shear)
3. Yarıma (cleavage)
4. Soyulma (peel)

şeklinde sınıflandırılır. Bu gerilme tipleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Şekil 3.3 a'da görüldüğü gibi çekme yüklemesinde kuvvetler yapıştırıcı düzlemine çevreseldir ve tüm alan üzerine düzgün bir şekilde dağılmıştır. Yapıştırıcı tabakası dahil tüm bağlantı aynı zamanda gerilme altındadır ve bağlantının tüm kısımları eşit olarak yükü paylaşır. Uygulamada çekme gerilmesinin mevcut tek gerilme olduğundan kesinlikle emin



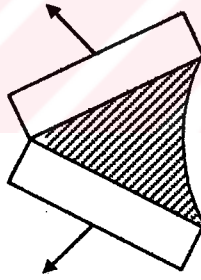
a) Çekme gerilmesi



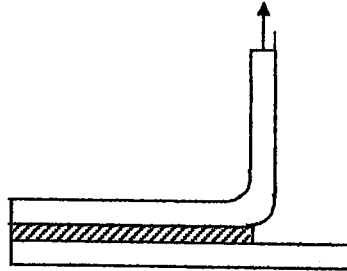
b) Çekme ve kayma



c) Burulmalı kayma gerilmesi



d) Soyulma gerilmesi



e) Yarıлма Gerilmesi

Şekil 3.3 Yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme tipleri (Engin,1997)

olunamaz ve uygulanan yük eksenden kaçık ise gerilme dağılımı düzensiz olur, dolayısı ile bağlantı kopmaya meyilli olur. Düzgün olmayan gerilme dağılımından kaçınmak için yapıştırılan malzemelerin kalın olması ve yük altında da çökmeye meyletmemesi gerekir.

Şekil 3.3 b ve c'de yapıştırıcı tabakası çekme ve burulmalı kayma gerilmeleri etkisindedir ve bağlantının tümü boyunca gerilme düzenli bir şekilde dağılmıştır. Yapışma alanının kopmaya karşı en dirençli olan ekonomik bağı sağlaması için gerilmelerin yapıştırıcı düzlemine paralel olması gerekir. Uygulamada sağladığı kolaylıktan dolayı bu tip bağlantılar çok sık kullanılır.

Şekil 3.3 e'de görüldüğü gibi eksenden kaçık olan çekme yüklemesi veya momentin bir neticesi olarak gerilme dağılımı düzenli değildir ve yarıma gerilmeleri bağlantının bir kenarında yığılır. Çekme ve kayma yüklemelerinin çok daha geniş bir yapışma alanı gerektirmesi nedeniyle bu tip bağlantılar tavsiye edilmez.

Şekil 3.3 d'de gösterilen soyulma yüklemesinde yapışma bölgesinin kenarındaki ince bir hatta gerilmeler yığılır ve bağlantı bölgesi ister geniş olsun ister dar olsun, gerilme bağlantıda kopma oluşabilecek şekilde yapıştırıcı hattı sınırına yerleşir. Yarıma tipi bağlantıda daha az miktarda yapıştırıcı, yük dayanımına katkıda bulunacaktır ve uygulamalarda bu son iki bağlantı tipini kullanmaktan kaçınılmalıdır.

Ancak farklı tip bağlantıların bileşiminden başka, uygulamada bağlantıların birden fazla gerilmeye maruz kalması nedeniyle, bağlantı tasarımında ilave etmenler ortaya çıkar. Bazen yapıştırılan malzemenin şeklini koruyamaması ikinci bir gerilme oluşmasına neden olacaktır ve bu durumlarda da bağlantı tasarımı oldukça önemlidir.

3.6 Yapıştırıcı Seçimi ve Kullanılması

Çeşitli maksatlar için kullanılan yapıştırıcıların esasını genel olarak "suni reçineler" teşkil eder. Bunların içinde kimyasal bakımdan fenol, epoksi, akril reçineleri, doymamış poliester reçineleri en fazla kullanılanlardır (Gediktaş, 1972). Bunlar piyasada imalatçı firmaların koydukları özel isimlerle tanınırlar. Tablo 3.1'de önemli yapıştırıcılar gösterilmektedir.

Yapıştırıcının seçimi, bağlantının statik ve dinamik mukavemetlerine bağlı olup, sıcaklığın ve korozyonun etkilerine karşı da iyi dayanım göstermesi söz konusudur. Yapıştırma-nokta kaynağında kullanılacak yapıştırıcının ayrıca bazı özelliklerinin bulunması da istenir (Anık, 1986) (Engin, 1997).

Yapıştırıcı sıvı ya da pasta (macun) tipinde olmalı ve aralığa nüfuz etmesi için yeter derecede bir akıcılığa sahip bulunmalıdır. Yapıştırıcılar çok ince, yani düşük viskoziteli de

olmamalıdır ki, parçaların düşmesi veya devrilmesi gibi hallerde makinayı ve civarını akarak kirletmesin.

Yapıştırıcı reçine, bileşenleri karışımından sertleşmenin başlangıcına kadar (20 °C'de) yeterli bir zaman toleransına sahip bulunmalıdır. Ancak bu zaman aralığında nokta kaynağı yapılabilmektedir. Zira, sertleşen yapışkan bir izolatör tabaka gibi etki yapmaktadır. Büyük parçaların kaynağı esnasında, parçaları ısıtmak bu süreyi kısaltır ve soğutmak da süreyi uzatır.

Yapıştırıcılar, çözücü madde içermemeli, yanıcı ve parlayıcı olmamalı, iç yapı değişikliklerine sebebiyet vermemelidir. Uygun olmayan dolgu maddeleri bazı zorluklar doğurur. Örneğin, kuvarz unu yapıştırıcıyı yakıcı yapabilir ve grafitte karbonlaşma dolayısıyla malzemeyi gevrekleştirir. Yapıştırıcı tabakanın elektrik direncini yükselten mineral dolgu maddelerine karşın, Al, Cu, Fe ve Zn gibi metalik dolgu malzemeleri, kontakt direncini düşürerek kaynak kabiliyetini iyileştirir.

Dolgu malzemesinin yapıştırıcıya gereğinden fazla miktarda ilavesi, esas metal ile karışarak kaynak noktasının (çekirdeğinin) taşıma mukavemetini düşürür.

Yapıştırıcı maddenin sertleşmesi (katılaşması) uygun bir sıcaklık-zaman akışında gerçekleşmelidir. Nokta kaynağında parçadan geçen ısı, kaynak noktasının etrafında, yapıştırıcının sertleşmesine yol açmamalıdır. Aksi takdirde o bölgede başka noktaların kaynağı yapılamaz. Sıcakta katılaştıran yapıştırıcılarda bu tehlike yoktur. Fakat, vagon inşasında olduğu gibi büyük parçalarda kullanılması katılaşma için, gerekli ısı donanımları yönünden güçlük arz eder. Soğukta katılaştıran yapıştırıcı maddeler, kaynak işleminin ilk fazında katılaşma yönünde bir eğilim göstermez (Anık, 1986).

Yapıştırıcılar katılaşmak için yüksek bir basma kuvveti gerektirmemelidir, zira bu kuvvet reçinenin üstüne yalnız kaynak noktasının katılaşması süresinde etki yapar. Böylece polikonderizasyon ile sertleşen (katılaştıran) yapıştırıcılar ayrılır, çünkü kabarcıklı ve düşük mukavemetli bir yapışkan tabakası oluşur. Buna karşın, polimerizasyon cinsi yapıştırıcılar (mesela, doymamış poliester ve poliadisyonesashı yapıştırıcılar, yani epoksi kökenli yapıştırıcılar), reaksiyon ürünler meydana gelmeden katılaşabilirler. Burada nokta kaynağı için gerekli kontakt basıncı yeterli olur.

Çizelge 3.1 Önemli yapıştırıcılar (Gediktaş, 1972)

Kimyasal Yapı	Ticari İsmi	Genel Özellikler ve Kullanıldığı Yer
Epoksi reçinesi	Epilox Araldit Epoxy	İki bileşenli, uzun sertleşme süresi Madenlerin, duroplastların, keramiklerin yapıştırılması için
Poliester reçinesi	Akemi Mökodur Vestopal	İki bileşenli, uzun sertleşme süresi Madenlerin, duroplastların, seramiklerin 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	Desmodur- Desmocoll	İki bileşenli Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için
Siyonakrilat- Monomer	Eastman 910 Tiox Kl	Tek bileşenli, çok çabuk sertleşir Madenlerin, plastiklerin ve elastomerlerin yapıştırılması için
Epoksi+Thiokol	Polisulfid- Likit-polimer	İki bileşenli Çeşitli malzemelerin yapıştırılması ve sızdırmazlık için
Epoksi+Poliamid	Versamid Leifa-Met	İki bileşenli Madenlerin ve plastiklerin yapıştırılması için
Seramik karışımları	Ceramic UJ 1067	Yüksek uygulama sıcaklığı Madenlerin yapıştırılması için

Yapıştırıcıyı, optimal yayılma bakımından her iki parçaya da sürmek gerekir. Yapışkan tabaka, düzgün ve homojen bir kalınlıkta olmalıdır (0.1 ila 0.2 mm gibi). Çok kalın yapışkan tabaka, kaynak işlemini zorlaştırır ve yapıştırma bağlantısının mukavemetini düşürür. Çok ince tabakalar ise; ufak düzensizliklerde, birleştirme hatları meydana getirir. Yapıştırıcı, el ile kullanılan bir fırça veya mala yardımıyla, veyahut da püskürtme tabancaları ile sürülebilir.

Yapıştırma işlemi klima kontrollü odalarda yapılmalıdır. Odanın sıcaklığı 20 ila 25 °C ve rutubeti de % 65'e kadar olmalıdır. Yüksek nem miktarı, yapıştırma bağlantısının mukavemetini ve yaşlanma dayanımını düşürür (Anık, 1986).

BÖLÜM 4

YAPIŞTIRMA VE NOKTA KAYNAĞININ KOMBİNASYONU

4.1 Parça Yüzeyinin Hazırlanması

Yapıştırma-nokta kaynağında bilinen iki teknolojinin mevcut olduğu daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bunlardan birincisinde saçlara önce nokta kaynağı yapılır. Daha sonra düşük viskoziteli yapıştırıcı enjektör iğnesine benzeyen özel bir alet ile aralığa püskürtülür ve yapıştırıcı kapiler kuvvet tesiriyle aralığa yayılır. İkinci usulde ise birleştirilecek saçlara önce yapıştırıcı sürülerek yapıştırılır ve sonra da nokta kaynağı uygulanır (Anık, 1986).

Her iki usulde de, yüksek mukavemetli kaynak noktaları ve yapıştırma bağlantısının sağlanması için uygun bir yüzey hazırlamaya ihtiyaç vardır. Birleştiricilerin yüzeylerinin pisliklerden arındırılması, her iki usulde de, bilhassa yapıştırma bağlantısından istenen özellikler yönünden, çok önemlidir. Örneğin, çelik saçların nokta kaynağı işleminden önce paslanmayı önleyici yağlarla yağlanması, nokta kaynağına olumsuz bir etki yapmaz. Soğuk haddelenmiş saçlarda, belirli bölgelerin kaba bir şekilde pastan arındırılması yeterlidir. Eğer imalatta normal dışı bir tozlanma ya da rutubet söz konusu değilse, bir dereceye kadar yüzeyi hazırlamadan da kaynağına geçilebilir. Ancak alüminyum ve alaşımlarında meydana gelen oksit tabakasının kimyasal ve mekanik usullerle temizlenmesi gerekir. Yüzeyler temizlendikten sonra, belirli süreler içerisinde hemen kaynağına geçilmezse, yeniden oksit tabakası meydana gelir.

Yapıştırıcının iyi bir yapışma mukavemeti sağlayabilmesi için, parça yüzeylerinin temiz olması gerekir. Yüzeyde bulunan çok az miktardaki bir yağ, toz ve gres tabakası ile rutubet adhezyonu imkansız hale sokar. Bu bakımdan, yapıştırma-nokta kaynağı, yapıştırma işleminden sonra, hazırlanan kısımlar iyice korunmalı ve mümkün mertebe kısa süre zarfında kaynak işlemine geçilmelidir. Bu açıdan bakılırsa, işletmelerde parçaların yüzey hazırlanmasına tabi tutulmasına ihtiyaç göstermeyen yapıştırıcıların geliştirilmesi gerekmektedir. Böyle yapıştırıcılar da geliştirilmiştir ve bunlarla iyi bir yapışma dayanımına da erişilmektedir. Poliviniklorür kökenli yapıştırıcılar bu bakımdan iyi sonuçlar vermektedir.

Yapıştırılacak ve nokta kaynağı yapılacak yüzeylerin fiziksel durumu da önemlidir ve pürüzlü olmaması gerekir. Nokta kaynağında pürüzlü yüzeyler temas direncini azaltır. Yapıştırma-nokta kaynağında ise, kaynak bölgesinde kalan yapıştırıcılar sıcaklığın etkisiyle buharlaşarak patlayıp, kaynağın dışarı akmasına yol açar ve iki sacın arasından erimiş metal dışarı akar.

Kimyasal ve mekanik usullerle sağlanan uygun bir yüzey pürüzlülüğü, iyi bir birleşme dayanımı sağlar. Çelik saçların yüzeylerinin 100 no'lu zımpara kağıdı ile zımparalanması veya 0.2 ila 0.5 mm çaplı korund tanelerle püskürtülerek hazırlanması nokta kaynağı için uygun sonuçlar vermektedir. Çelik saçların yüzeylerinin kimyasal çözeltilerle dağlanması (alaşimsız çelikler için sülfürik asit ve oksalat asidi çözeltisi, paslanmaz çelikler için de nitrik asit ve flüor asidi çözeltileri gibi) da iyi birleştirmeler sağlamaktadır. Alüminyum saçlar da yapıştırma için en yüksek mukavemet yüzeyin kimyasal olarak özel ayıraçlarla dağlanmasında elde edilmektedir. Özel dağlama ile alüminyum malzemenin yüzeyinde yapıştırma için uygun bir pürüzlülük sağlanmakta, fakat bu pürüzlülük kontakt direncini yükselttiğinden (yaklaşık 0.2 ila 0.9 mΩ) yapıştırmayı müteakip uygulanan nokta kaynağı iyi netice vermemektedir. İyi bir yapıştırma-nokta kaynağı bağlantısı için de sulandırılmış nitrik asit ve flüor asidi karışımı veya sulandırılmış soda çözeltisinin kullanılması yeterlidir. Asidik çözeltiler daha küçük temas direnci (0.02 ila 0.10 mΩ) nokta kaynağı için ve alkali çözeltilerde iyi yapıştırma sağladığından yapıştırma için iyi sonuçlar vermektedir. Yapıştırıcı maddenin, metal yüzeyinde iyi bir tutunma vermesi ve yüzeyi iyice ıslatması gerekir.

4.2 Yüzeyine Yapıştırıcı Sürülmüş Saçların Kaynağı

Nokta kaynağının uygulanabilmesi için, yapıştırıcı tabakanın, noktanın bulunduğu bölgeden uzaklaştırılması gerekir. Zira bu tabaka bir izolatör görevi yapmaktadır. Ara tabaka yok edilince, yüzey profillerinin çıkıntıları metalik köprüler oluşturur ve kaynak akımının geçmesini sağlar. Yapıştırıcıyı yüzeyin girintili kısımlarından tamamen yok etmek mümkün olmadığı için, yapışkan ara tabakalı nokta kaynağında temas direnci, parlak ve düz saçlara nazaran daha büyüktür. Bu açıdan, girintili yüzeye sahip saçlarda, yapıştırıcı artıklarının aşırı sıcaklıkla kavrulmasını, buharlaşmasını ve sıçramasını önlemek üzere, parlak saçlara göre, kaynak şartlarında aşağıdaki değişiklikler öngörülür.

Ön presleme zamanı yüksek ve elektrot kuvveti büyük seçilmelidir ki, temas direnci yeterli derecede düşük tutulabilsin. Elektrot kuvvetini yükseltmek için uygulanan programda, ön presleme süresi esnasında yüksek bir elektrot kuvveti, akım uygulandığı süreden itibaren

de (akım süresi) daha düşük bir elektrot kuvveti uygulanır. Kaynak noktasını çevreleyen yapıştırıcı tabakalarına zarar vermemek için, kaynak zamanının kısa tutulması uygundur. Yapıştırıcının akım süresinin ilk fazında kavrulmasını önlemek için, kaynak akımının yükseltilmesi, ayarlanarak geciktirilebilir. Elektrot uçları genellikle küreseldir (50 ila 100 mm çaplı). Böylece basınç tam ortadan etkir ve yapıştırıcı madde düzenli bir şekilde çevreye doğru akar.

Çizelge 4.1’de, arasında yapıştırıcı tabaka bulunan çelik sacların nokta kaynağına ait veriler sunulmuştur. Bu değerler oldukça kaba verilmiş kıymetlerdir. Bu kıymetler esas malzemenin bileşimine, yüzey durumuna ve uygulanan ön işlemlere, yapıştırıcının cinsine, sürülen tabakanın kalınlığına ve dolgu malzemesinin miktarına göre değişebilir.

Çizelge 4.1 Arasında yapıştırıcı tabaka bulunan çelik sacların nokta kaynağına ait veriler (Ank,1986)

Verinin cinsi	Sac kalınlığı						
	0.9mm+0.9mm		1mm+1mm	2mm+2mm			3mm+3mm
Elektrot kuvveti (kN)	2.3	5.0	3.0	2.0	4.5	5.5	7.2
Kaynak süresi (periyot)	7	4	8	12	5	12	12
Kaynak akımı (kA)	8.5	12	8.7	5	12	12	18
Elektrodun uç çapı veya bombelik yarıçapı (mm)	5.0	5.0	5.0	R75	5.0	5.0	8.0
Nokta çapı (mm)	4.5	5.7	4.5	5.6	7	6	7.6

4.3 Yapıştırma-Nokta Kaynağı Bağlantılarının Özellikleri

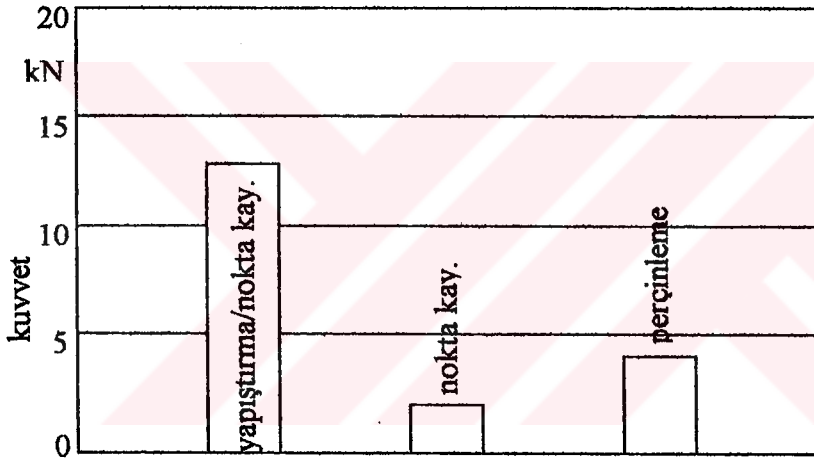
4.3.1 Makaslama-çekme mukavemeti

Kullanışlılık oranı (birleştirmenin maksimum makaslama-çekme yükünün “kopma yükünün” sac kesitine oranı), artan bindirme genişliği (l) ile yükselir. Alüminyum alaşımlarında $l/s=20$ değeri için esas malzemenin tüm mukavemeti kullanışlı hale gelir.

Yalnız yapıştırmaya nazaran, nokta kaynağı ve yapıştırma bağlantısı, iki sıralı nokta düzeninde, mukavemet açısından bir avantaj teşkil etmektedir. Buna mukabil, tek sıralı nokta düzeninde, yalnız nokta kaynağına nazaran 2.5 misli dolayında bir mukavemet artışı

görülür. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi yönünden; nokta çapına (d) oranla hayli büyük bir deney parçası genişliği (B) seçmek gerekir. $B=(5/15)d$. Nokta sıralarında ise, nokta aralığı $a=(5/15)d$ olmalıdır. Yan etkiler ihmal edilirse, çelikte minimum nokta aralığı $a=3d$ ve alüminyumda ise $a=5d$ civarında alınmalıdır. Bu şartlar altında tek sıralı yapıştırma-nokta kaynağı bağlantılarında (çelik sacların), esas malzemenin mukavemetine erişilebilir. Alüminyumda ise, alaşım tipine bağlı olarak, esas malzeme mukavemetinin % 50-80'ine, iki sıralı nokta kaynağında % 70-100'üne erişmek mümkündür (Anık, 1986). Tekrarlanan deneyler, çok sıralı nokta kaynağı ve yapıştırma nokta kaynağı bağlantılarının mukayeseli olarak düşük bir bağlantı mukavemeti verdiğini göstermektedir.

4.3.2 Kafadan çekme mukavemeti



Şekil 4.1 Perçinlenmiş, nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış 1.5 mm kalınlığındaki Al, Zn, Mg, Cu, 1,5 sacların kafadan çekme deneyindeki mukavemetleri. Epoksi kökenli yapıştırıcı kullanılmıştır (Anık, 1986)

Nokta kaynağı yapılmış, perçinlenmiş, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış 1.5 mm kalınlığındaki Al, Zn, Mg, Cu 1,5 saclarına ait bağlantıların kafadan çekme deney sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Burada epoksi kökenli yapıştırıcı kullanılmıştır. 645 mm^2 'lik çekme kesitinde ve tam ortada nokta kaynağı yapılmış yapıştırma-nokta kaynağı bağlantısında, tek sıralı ve yalnız nokta kaynağı yapılmış bağlantılara nazaran 10 misli daha yüksek bir çekme kuvveti uygulanabilmektedir. Yani, yalnız nokta kaynağı ve yalnız yapıştırmaya nazaran yapıştırma-nokta kaynağında yük taşıma kabiliyeti artmaktadır.

4.3.3 Sıyırılma (sıyırma) mukavemeti

Sıyırılma şeklinde uygulanan zorlama, toplam birleşme yüzeyine etkimez; zira çizgisel şekilde konsantre edilmiş bir kuvvet etkisi mevcuttur. Yapıştırma ve nokta kaynağının uygulandığı kombine bağlantı, yalnız nokta kaynağı yapılmış bağlantıya nazaran daha yüksek bir sıyırılma mukavemeti verir. Yalnız yapıştırılmış bağlantılar ise, sıyırılmaya karşı özel bir hassasiyet gösterirler (Engin, 1997). Bu bakımdan yapıştırma-nokta kaynağı kombinasyonu yapıştırmanın yerine emniyetli bir şekilde kullanılabilir.

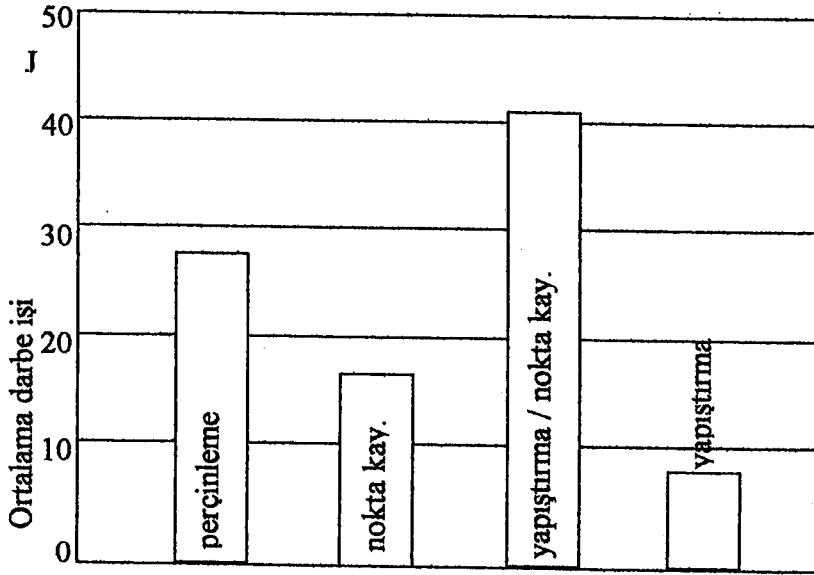
4.3.4 Yüksek ve alçak sıcaklıklardaki mukavemet

Yapıştırma-nokta kaynağı yapılmış bağlantılarda, yalnız yapıştırma yapılmış bağlantılara nazaran ısıya karşı daha iyi bir mukavemet elde edilmektedir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, yüksek sıcaklığa dayanıklı yapıştırıcıların kullanılması halinde, 300 °C'ye kadar uzun sürede mukavemetin korunduğu göz önünde tutulmalıdır. Sıcaklığa dayanma açısından en iyi sonuç, yalnız nokta kaynağı yapılmış bağlantılardan alınmaktadır.

Yapıştırma-nokta kaynağı yapılmış bağlantıların düşük sıcaklıklardaki davranışları, yapıştırıcının tipine bağlıdır. Epoksi esaslı yapıştırıcılarla yapıştırılmış 1.8 ve 3.8 mm kalınlığındaki AlCuMnZn sacların kombine bağlantılarında (yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış) -253 °C'ye kadar (sıvı hidrojenin sıcaklığı) elde edilen makaslama-çekme mukavemetleri, oda sıcaklığında elde edilen değerlerle aynıdır (Anık, 1986).

4.3.5 Darbeye karşı mukavemet

Darbeye karşı mukavemet açısından yapıştırma-nokta kaynağı bağlantısı, nokta kaynağı, yapıştırma ve perçinlemeye nazaran daha iyi değerler vermektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Perçinlenmiş, nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış ve yapıştırılmış-nokta kaynağı yapılmış Al, Cu, Mg sacların ortalama darbe mukavemetleri. Epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır (Anık, 1986)

4.3.6 Dinamik mukavemet

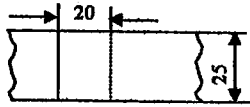
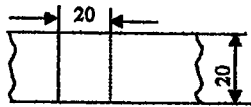
Yapıştırma-nokta kaynağı kombinasyonu, yalnız yapıştırmaya nazaran % 10-30 daha yüksek bir mukavemet gösterir. Bu açıdan, yapıştırma-nokta kaynağı bağlantıları, yapıştırmada olduğu gibi bindirme kenarından değil, noktanın kenarından kırılır. Yalnız nokta kaynağı yapılmış birleştirmelerle karşılaştırıldığında, yapıştırma-nokta kaynağı bağlantıları, daha yüksek bir titreşim mukavemetine sahiptirler. Tek sıralı nokta kaynağı bağlantılarında bu oran 1.5 ila 2.5 katına ve iki sıralı nokta kaynağı birleştirmelerinde de 2 ila 3 katına, üç sıralı nokta kaynağında da 2.5 ila 3 katına çıkar.

Sonuçlara deney parçasının formu da tesir etmektedir. Çok noktalı 1 ve 2 mm'lik derin çekme saçlarına uygulanan titreşimli çekme deneyinde, nokta mesafesine bağlı olarak sürekli mukavemet 40 ila 70 N/mm² arasında değişmiştir. Aynı araştırmalar, vagon inşasında kullanılan çok noktalı ve 3 mm kalınlığındaki AlZnMg saclarına uygulandığında, titreşimli çekme mukavemeti 30 N/mm² olarak bulunmuştur. Yalnız nokta kaynağında ise bu değer 20 N/mm²'dir. Titreşimli eğme deneyinde $\sigma_u/\sigma_o=-1.0$ elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Uçak inşasında kullanılan 1 mm kalınlığındaki Al, Cu, Mg₂ (kaplı) saclarına uygulanan deneylerde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. 64 mm genişliğindeki saclar kimyasal yolla temizlenmiş, 32 mm bindirme boyunda epoksi esaslı yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve sekiz

noktadan kaynak edilmiştir. $\sigma_0=105 \text{ N/mm}^2$ ($\sigma_u/\sigma_0=0.2249$) gerilme değerinde, yapıştırılmış ve kaynak edilmiş parçalarda yük değişim sayısı $5,7 \cdot 10^4$ ve $5,8 \cdot 10^4$ değerinde kalmış, fakat kombine bağlantılarda ise bu değer $1,4 \cdot 10^5$ 'e ulaşmıştır.

Çizelge 4.2 Nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış bağlantıların titreşimli eğme mukavemetlerinin karşılaştırılması (Anık, 1986)

Malzeme	St 12 09			AlCuMg		
Sac kalınlığı mm	2 + 2			1.5 + 1.5		
Numune formu						
Ön işlem	kum püskürtme			Dağlanmış		
Yapıştırıcı tipi	epoksi reçine			Epoksi reçine		
Nokta çapı mm	≈ 5...6			≈ 5		
Nokta kaynağı	*			*		
Yapıştırma		*			*	
Yapıştırma-nokta kaynağı			*			*
Titreşimli eğme mukavemeti N/mm^2	80	160	165	60	70	80

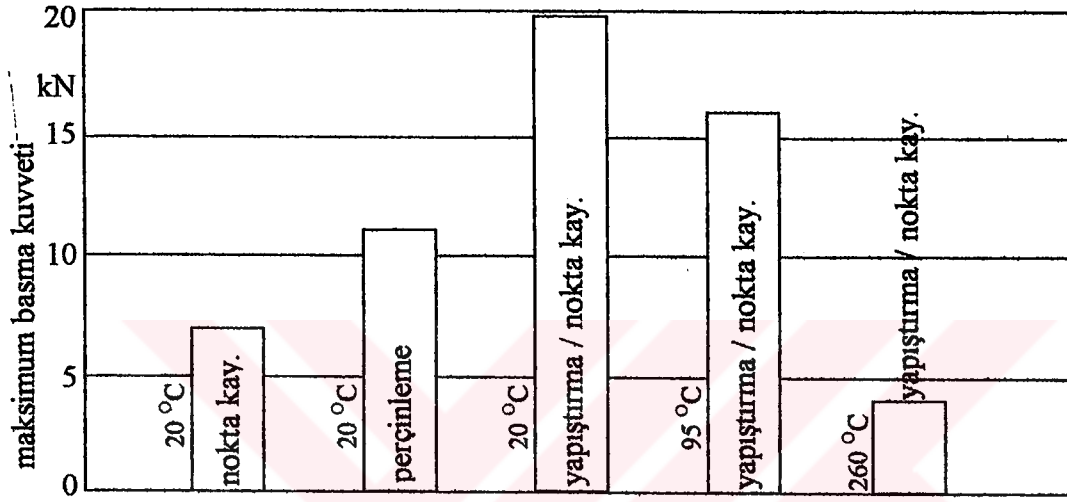
4.3.7 Kararlılık (stabilite)

Yapılmış araştırmalar, burkulma yükü (stabilite) açısından, kombine birleştirmelerin nokta kaynağı ve perçinlemeye nazaran üstünlük sağladığını göstermiştir. Nokta kaynağı ve yapıştırmada, homojen olmayan yük taşıma özelliği, bilhassa birleştirme yerindeki kabarmalar şeklinde kendini gösterir. Bunu ortadan kaldırmak için, nokta kaynağında kısa mesafeli yani çok noktalı kaynak yapmak gerekir. Halbuki kombine birleştirmelerde ise, yapıştırmada olduğu gibi bu mahzur yoktur (Şekil 4.3).

4.3.8 Yaşlanma ve korozyon

Nokta kaynağında çeşitli şekillerde rastlanan korozyon olayı (aralık korozyonu, kontakt korozyonu gibi), kombine birleştirmelerde minimuma inmiştir ve hemen hemen yok gibidir. Nokta kaynağının aksine kombine bağlantılarda hafif metaller kolay elokse edilebilmektedir. Yalnız yapıştırıcının eloksal banyosunun asitlerine karşı mukavim olması

gerekir. Yapıştırıcının yaşlanması nedeniyle, uzun süreli zorlamalarda, yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi, kombine bağlantılarda da mukavemet azalır. Bu bağlantının karşılaştığı ortamın cinsine (rutubetli hava, su, asit, yağ v.s.) ve yapıştırıcı malzemesine bağlıdır. Sıcakta sertleşebilen yapıştırıcılar, soğukta sertleşenlere nazaran daha iyidir. Katkı maddeleri kimyevi maddelere karşı dayanıklılığı azaltır. Tekrarlanan yaşlanma deneyleri, kombine usulün, az da olsa bir üstünlüğe sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.3 Çeşitli muayene sıcaklıklarında perçinlenmiş, nokta kaynağı yapılmış, yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış AlZnMgCu 1,5 alaşımı hafif yapı profillerinde stabilite. Burada epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmıştır (Anık, 1986)

Genel bir sonuç olarak denilebilir ki; kombine edilmiş yapıştırma ve nokta kaynağı usulü, üretim tekniği ve konstrüksiyon bakımından önemli avantajlara sahiptir. Nokta kaynağına nazaran dayanım bakımından daha iyidir. Bu özellikle dinamik yüklerde daha belirgindir. Korozyon davranışı ve sağlamlığı daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu usulün verimli olduğu yerler, bilhassa hafif konstrüksiyonlar (uçak ve roket imali), demiryolu ve karayolu taşıtlarının imalidir. Bunların dışında iyi bir mukavemet, korozyona karşı dayanıklılık ve sessiz çalışma istenen özel alanlarda da bu yöntem uygulanabilir.

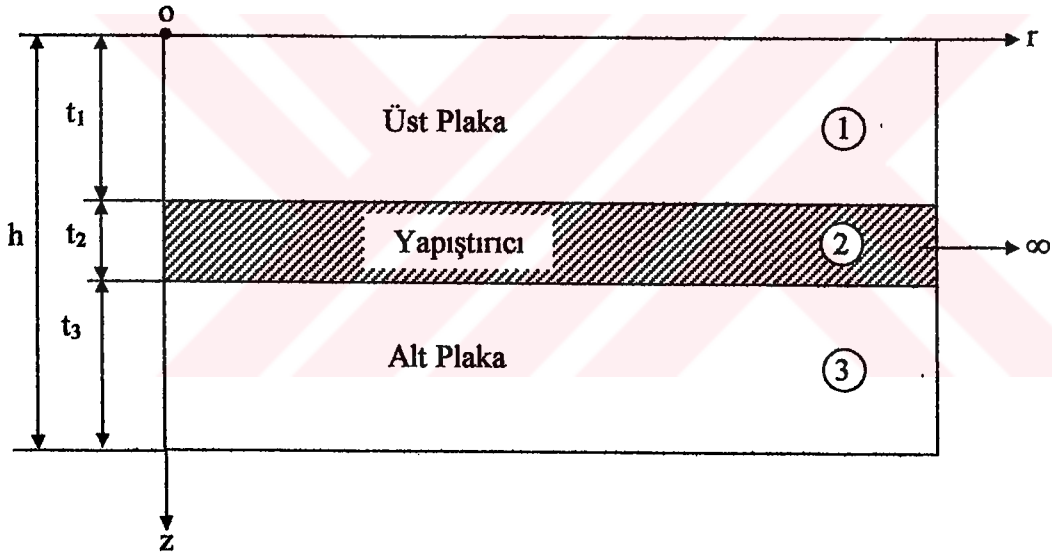
BÖLÜM 5

BULGULAR

5.1 Laserle Kaynak İşlemi

5.1.1 Problemin geometrisi

Bu çalışmada model olarak, üstte t_1 (2 mm) kalınlığında bir metal plaka, orta kısımda t_2 (0.2 mm) kalınlığında yapıştırıcı tabaka ve altta t_3 (2 mm) kalınlığında ikinci metal plaka alınmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 Problemin geometrik tanımı

Çalışmada kullanılan malzemelerin (alüminyum, titanyum, çelik ve epoksi türü yapıştırıcı) termodinamik özellikleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Kullanılan malzemelerin termodinamik özellikleri

Özellik	Malzemenin Adı			
	Çelik	Alüminyum	Titanyum	Epoksi
Ergime noktası °K	1892	933	1950	453
Kaynama noktası °K	3160	2767	3350	600
Yoğunluk kg/m ³	7780	2707	4570	1264
Özgül ısı J/kg.°K	460	896	523	1046
Isı iletim katsayısı W/m.°K	80.3	204	20.4	0.179
Absorbsiyon katsayısı 1/m	6.16 10 ⁷	13 10 ⁷	4.38 10 ⁷	5.5 10 ⁷

5.1.2 Isı transferi modeli

Laserle ısıtma işlemi esnasında ısı iletiminin neden olduğu ısı transferi denklemi Yılbaş ve Apalak (Yılbaş ve Apalak, 1987) tarafından;

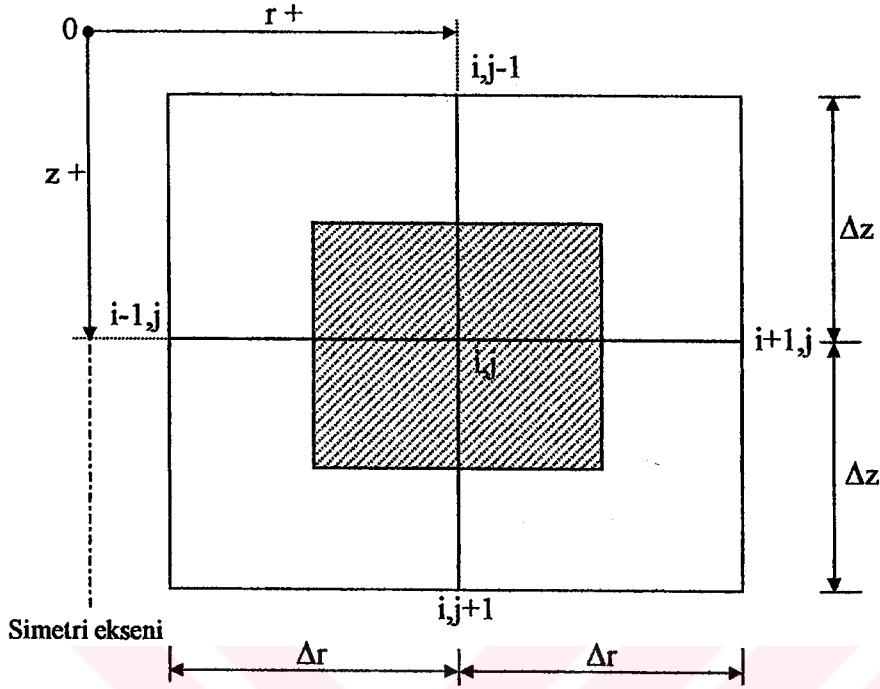
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + I_0(r, t) \delta \exp(-\delta(z - z_0)) \quad (5.1)$$

şeklinde verilmektedir.

Isıl sınır şartları:

- a) $r = 0$ da $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$
- b) $z = 0$ da $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
- c) $z = h$ da $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
- d) $r \rightarrow \infty$ da $T = T_a = 298 \text{ °K}$
- e) $z = t_1$ de $\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_1 = \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_2$

$$f) \quad z = t_1 + t_2 \quad \text{de} \quad \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_2 = \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_3$$



Şekil 5.2 Sonlu fark denklemleri için hücre elemanı

Sonlu farklar metodunun probleme uygulanabilmesi için, ileri farklar metodu kullanılarak, fark denklemlerinden;

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta z)^2} \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta r)^2} \quad (5.4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \cong \frac{1}{(i\Delta r)} \frac{T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n}{\Delta r} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho C_p} I_0(r, t) \delta \exp(-\delta(z - z_0)) \quad (5.6)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\alpha}{k} I_0(r, t) \delta \exp(-\delta(z - z_0)) \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\Delta t} = & \alpha \left(\frac{T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta z)^2} \right) + \alpha \left(\frac{T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n}{(\Delta r)^2} \right) \\ & + \frac{\alpha}{(i\Delta r)} \left(\frac{T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n}{\Delta r} \right) + \frac{\alpha}{k} I_0(i\Delta r, n\Delta t) \delta \exp(-\delta(j\Delta z - z_0)) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$z = j\Delta z$$

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{n+1} = & T_{i,j}^n + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n - 2T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} (T_{i+1,j}^n + T_{i-1,j}^n - 2T_{i,j}^n) \\ & + \frac{\alpha\Delta t}{i(\Delta r)^2} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{\alpha\Delta t}{k} I_0(i\Delta r, n\Delta t) \delta \exp(-\delta(j\Delta z - z_0)) \end{aligned} \quad (5.10)$$

(5.10) denklemi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{n+1} = & T_{i,j}^n \left(1 - 2\frac{\alpha\Delta t}{(\Delta z)^2} - 2\frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \left(1 - \frac{1}{i} \right) \right) + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n) \\ & + \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \left(T_{i+1,j}^n \left(1 + \frac{1}{i} \right) + T_{i-1,j}^n \right) + \frac{\alpha\Delta t}{k} I_0(i\Delta r, n\Delta t) \delta \exp(-\delta(j\Delta z - z_0)) \end{aligned} \quad (5.11)$$

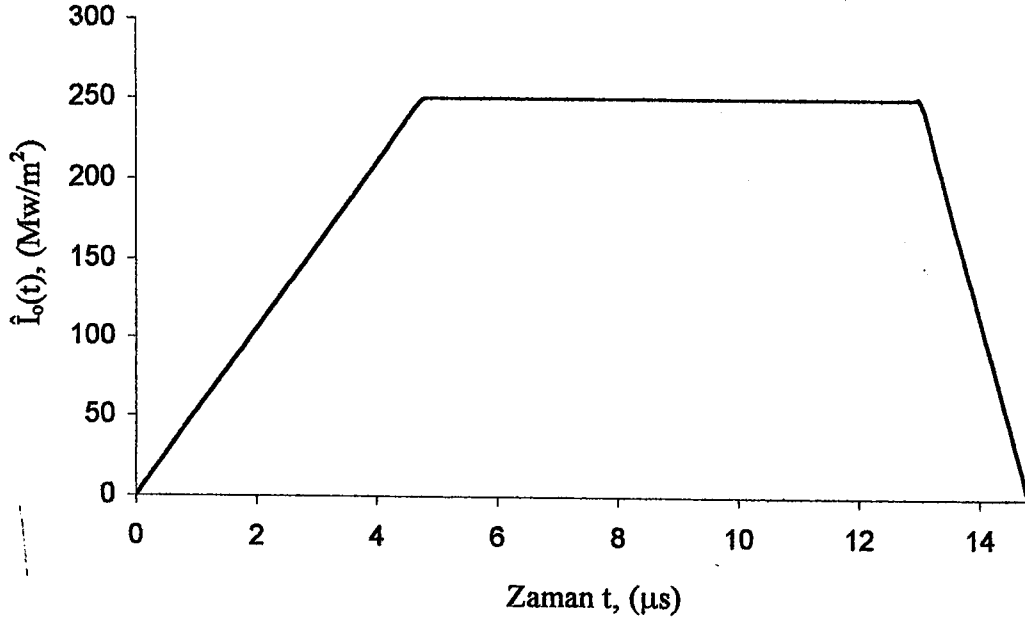
$$P_z = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (5.12.a)$$

$$P_R = \frac{\alpha\Delta t}{(\Delta r)^2} \quad (5.12.b)$$

$$\begin{aligned} T_{i,j}^{n+1} = & T_{i,j}^n \left(1 - 2P_z - 2P_R \left(1 - \frac{1}{i} \right) \right) + P_z (T_{i,j+1}^n + T_{i,j-1}^n) \\ & + P_R \left(T_{i+1,j}^n \left(1 + \frac{1}{i} \right) + T_{i-1,j}^n \right) + \frac{\alpha\Delta t}{k} I_0(i\Delta r, n\Delta t) \delta \exp(-\delta(j\Delta z - z_0)) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$T_{i,j}^n = T_{i,j}^{n+1}$$

$t+\Delta t$ anındaki sıcaklıklar $T_{i,j}^{n+1}$, $T_{i,j}^n$ sıcaklık vektörüne atanır.



Şekil 5.3. Laser gücünün en büyük değişimi (Yılbaş ve Apalak, 1987)

$$I_o(r, t) = \hat{I}_o(t) \exp\left(-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (5.14)$$

Burada;

R : Laser nokta yarıçapı = 30µm = 30.10⁻⁶ m

I_o : Laser çıkış gücü, Mw/m²

İ_o : Maksimum laser güç şiddeti, Mw/m²

r : Radyal mesafe, m

Yukarıda, problemin geometrisi izah edilmiş ardından ısı transferi modeli oluşturulmuştur. Sonlu farklar metodu kullanılarak oluşturulan bu ısı transferi modeline uygun olarak ve bahsedilen sınır şartlarını kullanmak suretiyle bir Fortran programı yazılmıştır. Yapıştırıcı olarak epoksi türü bir yapıştırıcı, metal plaka olarak sırasıyla çok ince alüminyum, titanyum ve çelik plakalar için çözüm yapılmıştır. Bu malzemeler için Çizelge 5.1'de verilen termodinamik özellikler kullanılmış, laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. Proses esnasında kullanılan laser gücünün değişimi Şekil 5.3'te görülmektedir.

Fortran'da yazdığımız, sıcaklık dağılımını hesaplamamızı sağlayan Heat2d.For adlı programımızın akış şeması, Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bu program yardımı ile hesaplanan,

farklı zamanlarda ki sıcaklık dağılımı aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 5.5-6-7). Laser nokta kaynağı esnasında çok dar bir alanda plaka ve yapıştırıcı sıcaklıkları ani yüksek değerlere erişmektedir. Bu yüzden, malzemenin kaynak yapılan kısmı kısa zamanda ergiyerek sıvı faza, hemen sonra buhar fazına geçmektedir. Analizlerde faz değişimleri dikkate alınmamıştır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum plakalarda, istenilen kaynak derinliğine (2.6 mm) ulaşma süresi 0.203 μ s bulunmuştur. Laser ile kaynak işlemine başlar başlamaz ışının uygulandığı bölgede alüminyum plaka hızlı bir şekilde ergimeye ve hemen ardından buharlaşmaya başlamıştır. Bunun neticesinde yüzeyden itibaren bir delik şekli oluşumu gözlenmiştir. Zamanın 0.08 μ s olduğu anda delik derinliği, yaklaşık olarak birinci plakanın yarısına ulaşmıştır (Şekil 5.5.A). Zamanın 0.17 μ s olduğu anda delik derinliği birinci plakada tamamlanmıştır. Yani birinci plakada tamamen bir delik oluşumu gerçekleşmiştir. 0.18 μ s'de epoksi yapıştırıcı tabakasında, çok hızlı bir ilerleme meydana gelmiştir. Bunun temel nedeni epoksi yapıştırıcının termodinamik özelliklerinin (Çizelge 5.1), metal plakaların termodinamik özelliklerinden çok farklı olmasıdır. Yapıştırıcının ısı iletkenliği çok düşük seviyelerdedir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise, yapıştırıcı tabakasının kalınlığının, plaka kalınlıklarının 1/10'u kadar olmasıdır (Şekil 5.1). Yapıştırıcı tabakası geçildikten sonra, birinci plakadaki şekilde delik oluşumu devam etmiştir. 0.195 μ s süresinde yaklaşık olarak 2.5 mm derinliğe ulaşan delik oluşumu, 0.203 μ s'de 2.6 mm derinliğe ulaşmıştır (Şekil 5.5.B). Laser ışını bu andan itibaren kesilmiş ve alüminyum plakaların laserle kaynak işleminin delme etabı tamamlanmıştır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik plakalarda, istenilen kaynak derinliğine (2.6 mm) ulaşma süresi 0.65 μ s olarak bulunmuştur (Şekil 5.6.B). 0.52 μ s'de delik derinliği yaklaşık olarak birinci plaka kalınlığına ulaşmak üzeredir. 0.55 μ s'de ise delik derinliği birinci plaka kalınlığına ulaşmış ve yapıştırıcı tabakasına geçilmiştir (Şekil 5.6.A). 0.57 μ s'de yapıştırıcı tabakasında delik oluşumu tamamlanmıştır. 0.60 μ s'den itibaren ikinci plakada delik oluşumu aynen birinci plakaya benzer şekilde oluşmaya başlamıştır. 0.65 μ s'de laserle kaynak işleminin delme etabı tamamlanmış ve bu andan itibaren laser ışını kesilmiştir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş titanyum plakalarda, istenilen kaynak derinliğine (2.6 mm) ulaşma süresi 0.82 μ s olarak bulunmuştur (Şekil 5.7.B). Alüminyum ve çelik plakalarda meydana gelen delik oluşumu, titanyum plakaların kaynağında da benzer şekilde olmuştur. 0.50 μ s'de delik derinliği yaklaşık olarak birinci plaka kalınlığına ulaşmıştır (Şekil 5.7.A).

0.57 μ s'de yapıştırıcı tabakasında başlayan delik oluşumu, 0.65 μ s'den itibaren ikinci plakada başlamıştır. 0.82 μ s'de istenilen kaynak derinliğine ulaşılması nedeni ile laser ışını kesilmiş ve titanyum plakalarda laserle kaynak işleminin delme etabı tamamlanmıştır.

Bu kaynak prosesleri ile, yapıştırıcı ile birleştirilmiş çok ince, alüminyum, çelik ve titanyum plakaların, farklı zamanlarda meydana gelen sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Üç malzeme içerisindeki sıcaklık dağılımları da benzer olup, Gaussian bir dağılım gözlenmiştir. Laser nokta kaynağı esnasında analizi yapılan tüm bağlantılarda, çok dar bir alanda plaka ve yapıştırıcı sıcaklıkları ani yüksek değerlere erişmektedir. Bu yüzden, malzemenin kaynak yapılan kısmı kısa zamanda ergiyerek sıvı faza, hemen sonra buhar fazına geçmektedir. Malzemenin buharlaşması nedeni ile daha üst kısımlarda ergimiş halde bulunan metalin aşağıya doğru akması beklenir. Bu metal akışının yapıştırıcı tabakası boyunca da sürmesi, birinci plaka ile ikinci plaka arasında bir metal köprü oluşturması gerekir. Laser ışınının kesilmesi ile birlikte, katılma prosesi başlamalıdır. Fakat bu çalışmada katılma prosesi incelenmemiştir. Kaynak prosesi sonunda, buharlaşma nedeni ile metal yüzeyinde bir boşluk oluşumu beklenir.

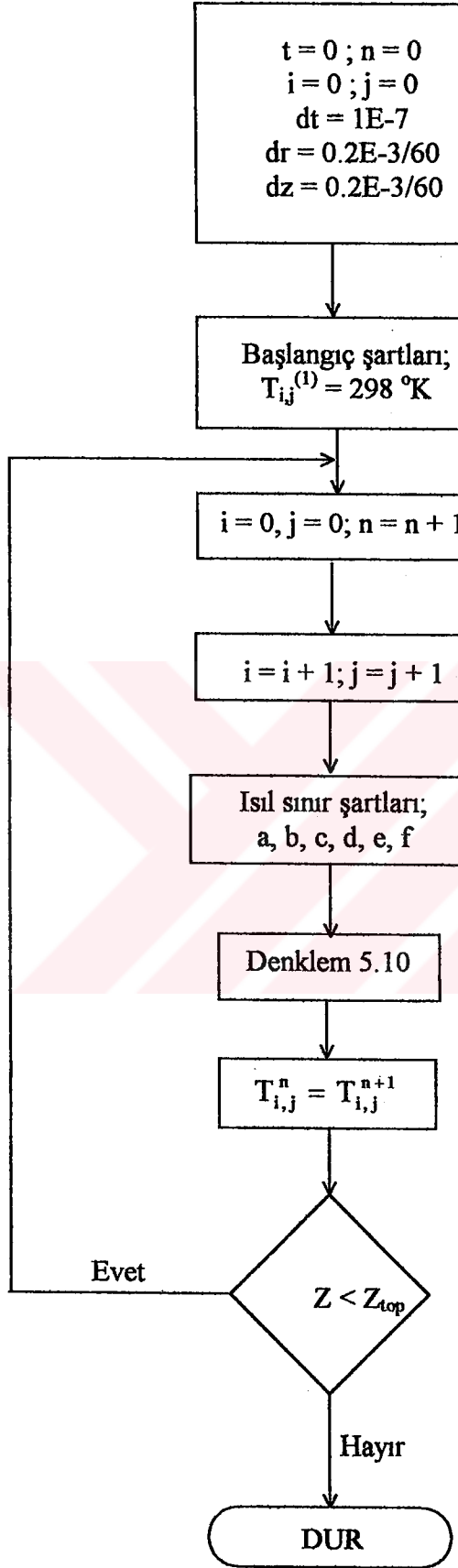
Her üç bindirme bağlantısında, kullanılan metallerin özellikle ergime ve buharlaşma sıcaklıklarına (Çizelge 5.1) bağlı olarak, istenilen kaynak derinliğine (2.6 mm) ulaşma süresinin değiştiği görülmektedir. En düşük ısı değerlere sahip olan alüminyum'un (0.203 μ s), en kısa zamanda kaynak işlemi tamamlanmakta olup, çelik (0.65 μ s) ve titanyum (0.82 μ s) onu takip etmektedir.

Grafikler incelendiğinde, her üç bindirme bağlantısında da, radyal sıcaklık dağılımının ilerlemesinin çok dar bir alanda kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, laser ışınının, laser nokta yarıçapı kadar olan bölgeye doğrudan uygulanmasıdır. Derinlikte ise sıcaklık dağılımı hızlı gelişmekte ve yüksek değerler almaktadır.

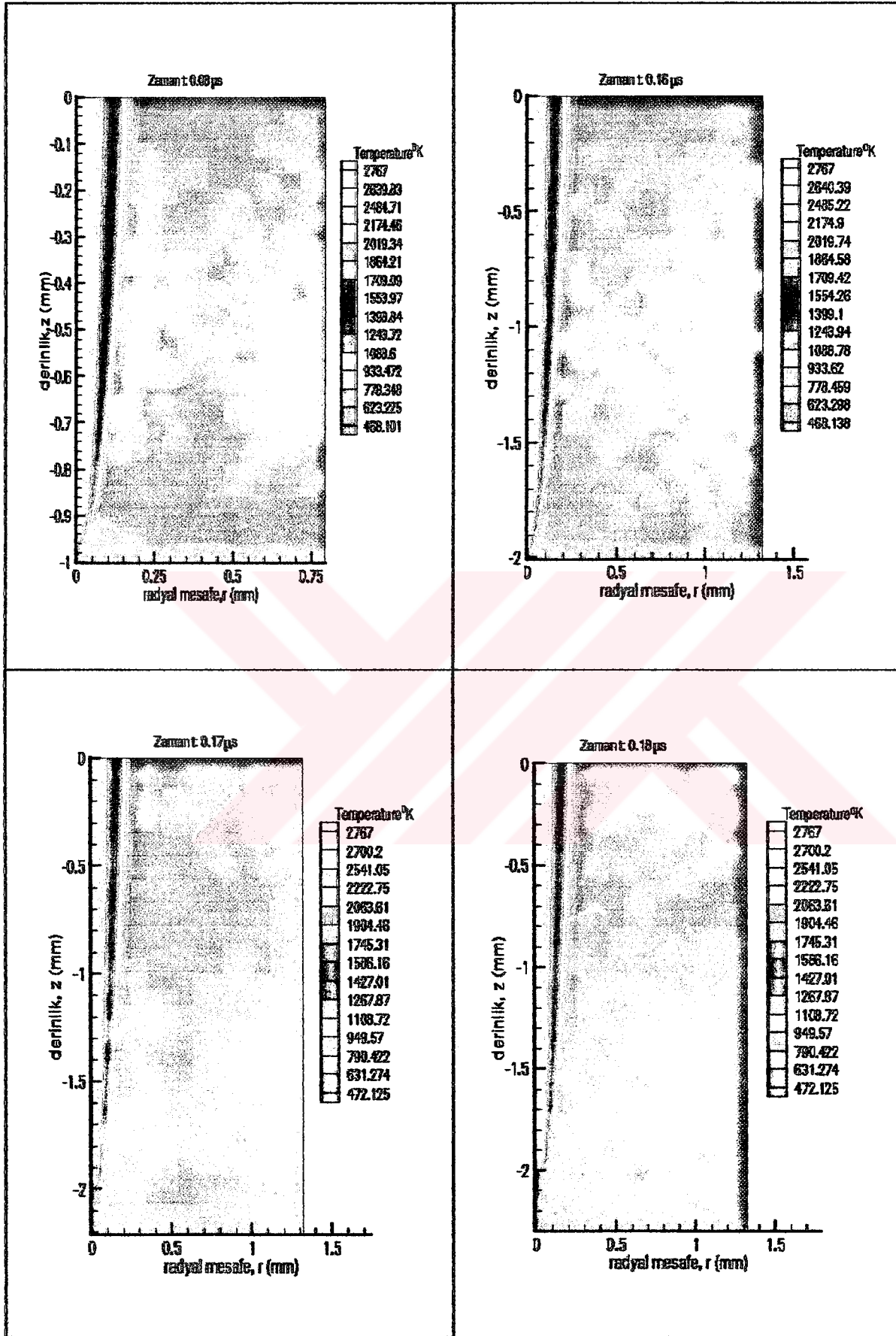
Her üç tip bindirme bağlantısında epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılmıştır. Tüm analizlerde, epoksi yapıştırıcı kısmında ise sıcaklık dağılımında radyal ilerlemenin çok düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, epoksi yapıştırıcının ısı iletim katsayısının metallere göre çok düşük değerlerde olmasıdır. Epoksi yapıştırıcının ergime ve buharlaşma sıcaklığının çok düşük değerlerde olması nedeniyle, yapıştırıcı kalınlığı boyunca hızlı bir ilerleme olduğu görülmektedir.

Analizi yapılan bu bağlantılarda, epoksi yapıştırıcı tabakasından sonra metal olan alt plakalarda sıcaklık dağılımı birinci plakalardaki dağılıma benzer şekilde devam etmektedir.

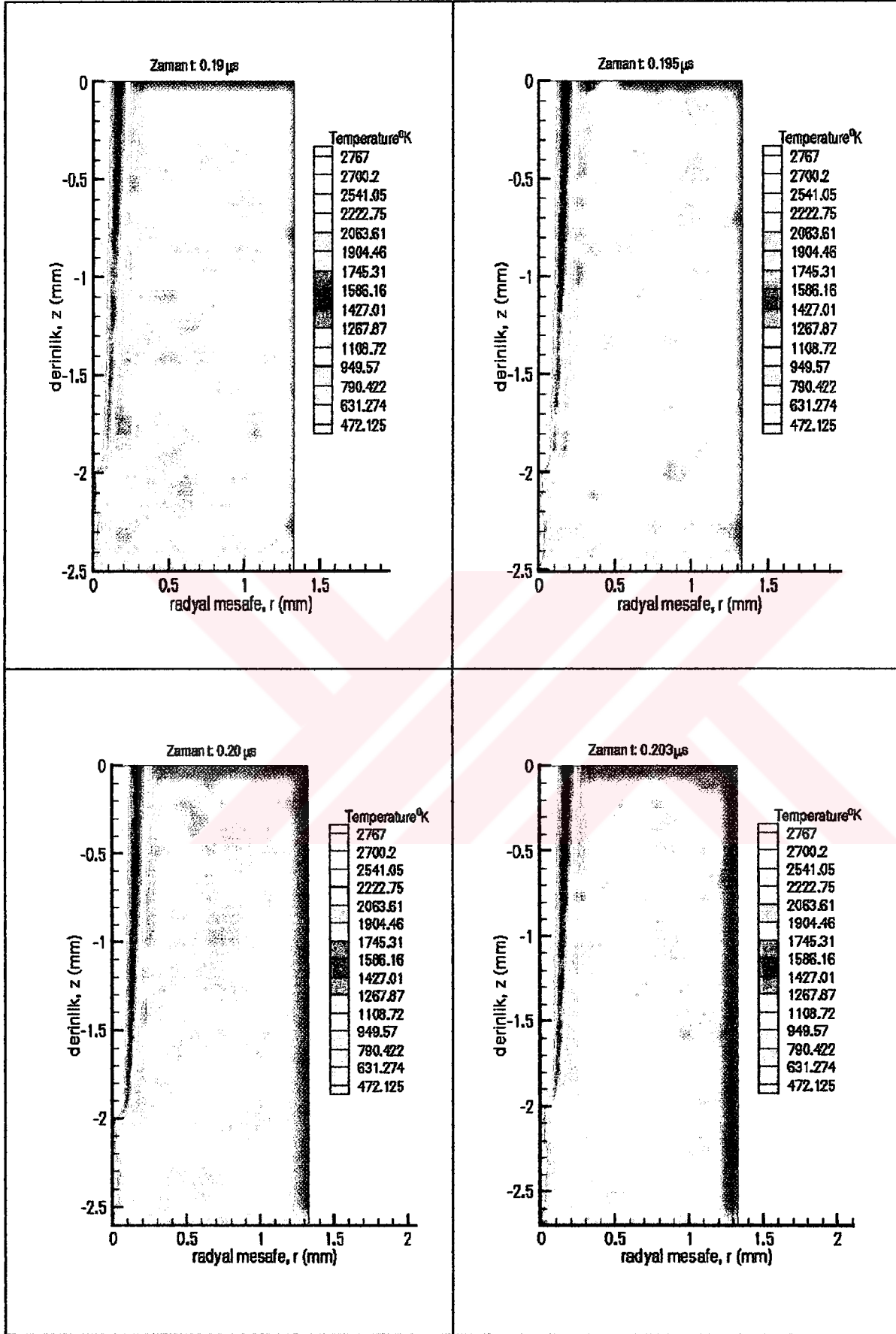
HEAT2D.FOR



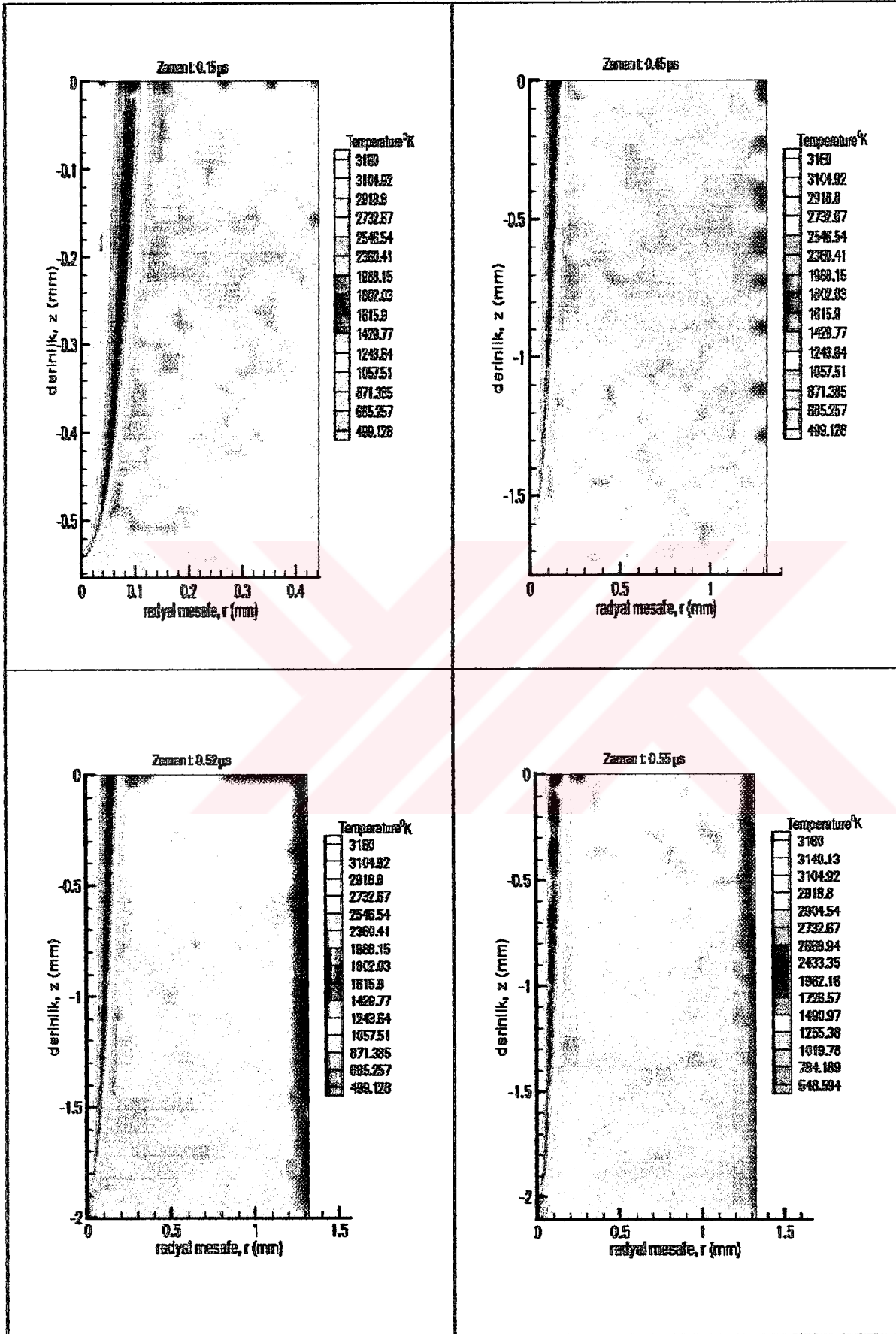
Şekil 5.4 Heat2d.for programına ait akış şeması



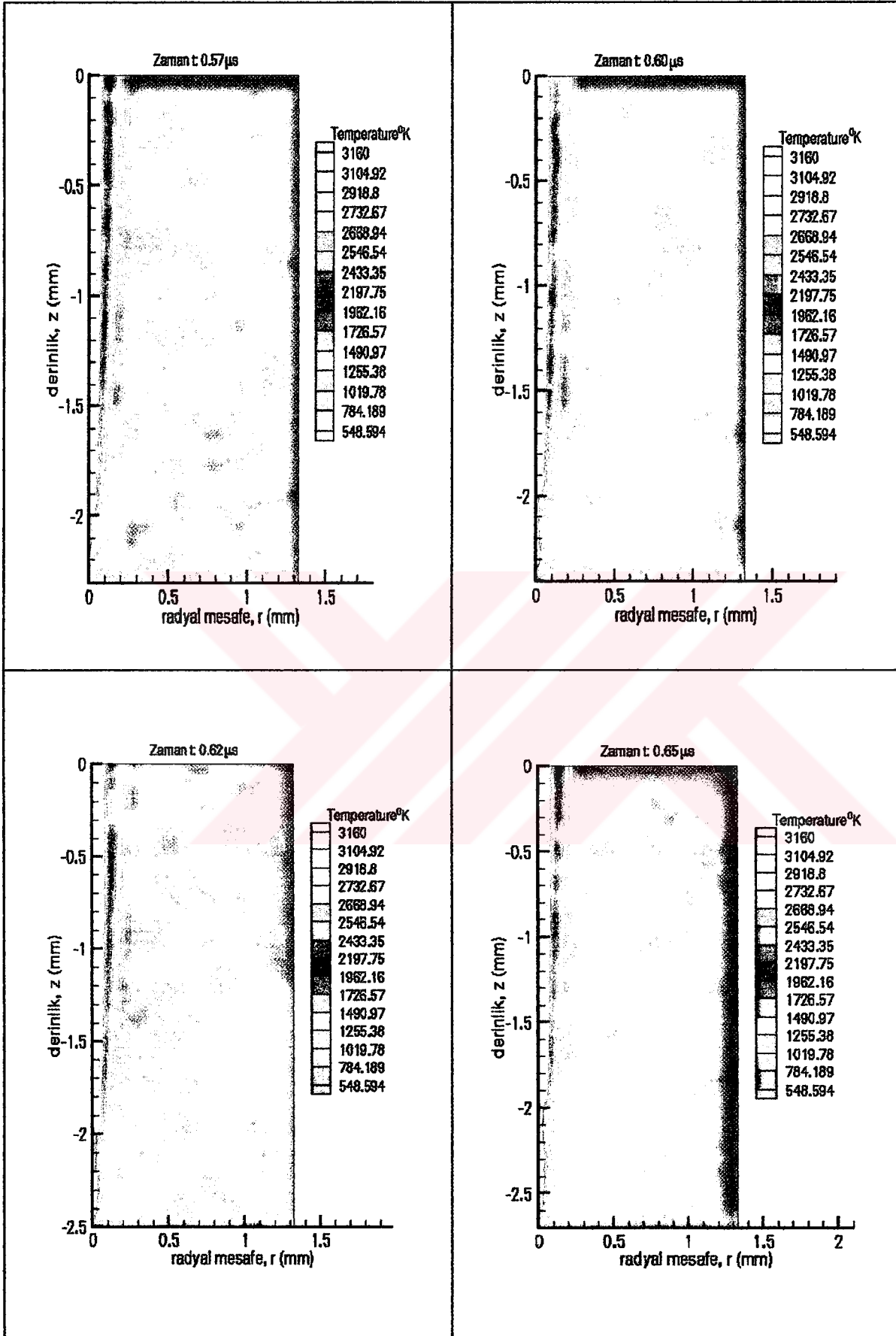
Şekil 5.5.A Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı



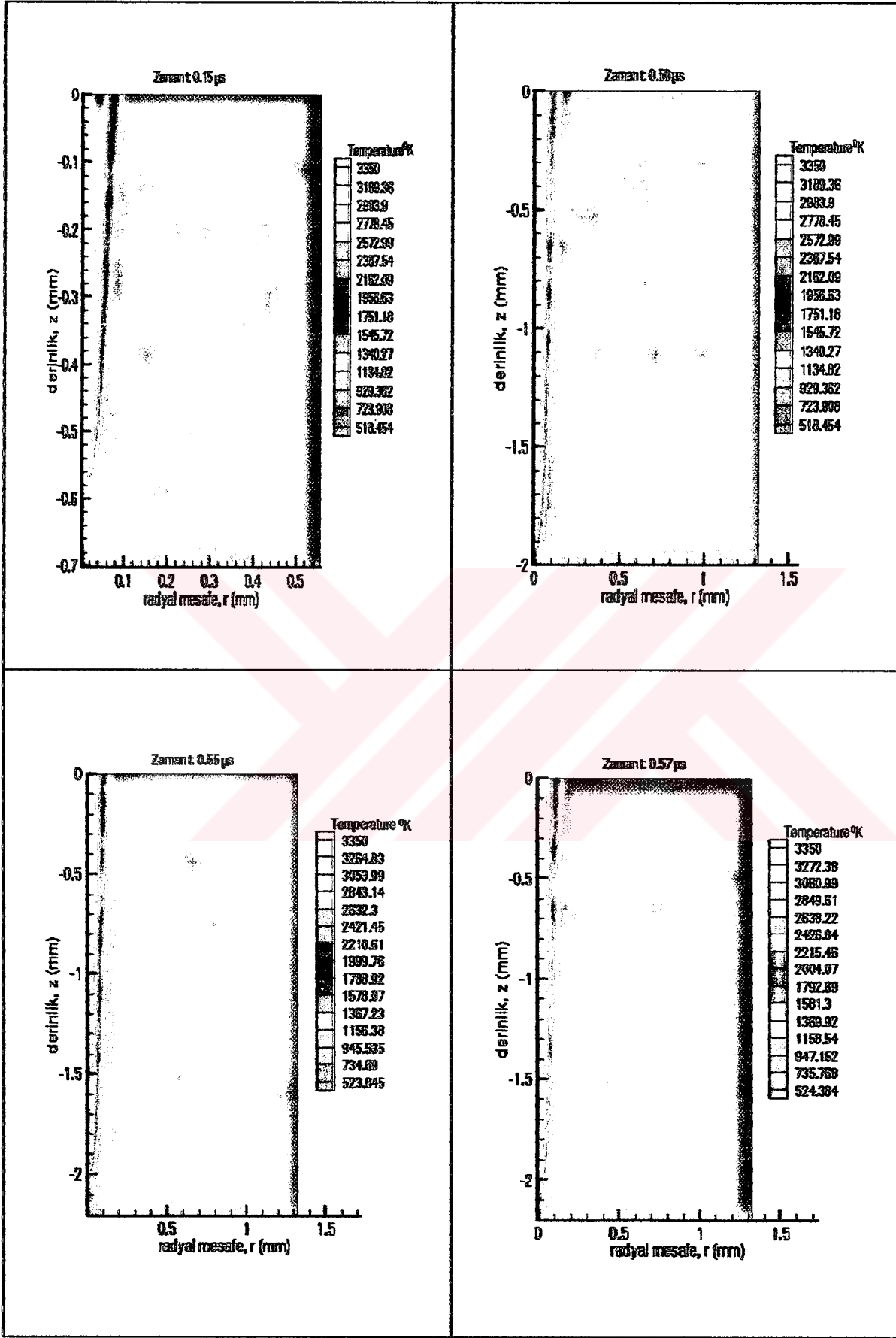
Şekil 5.5.B Yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı



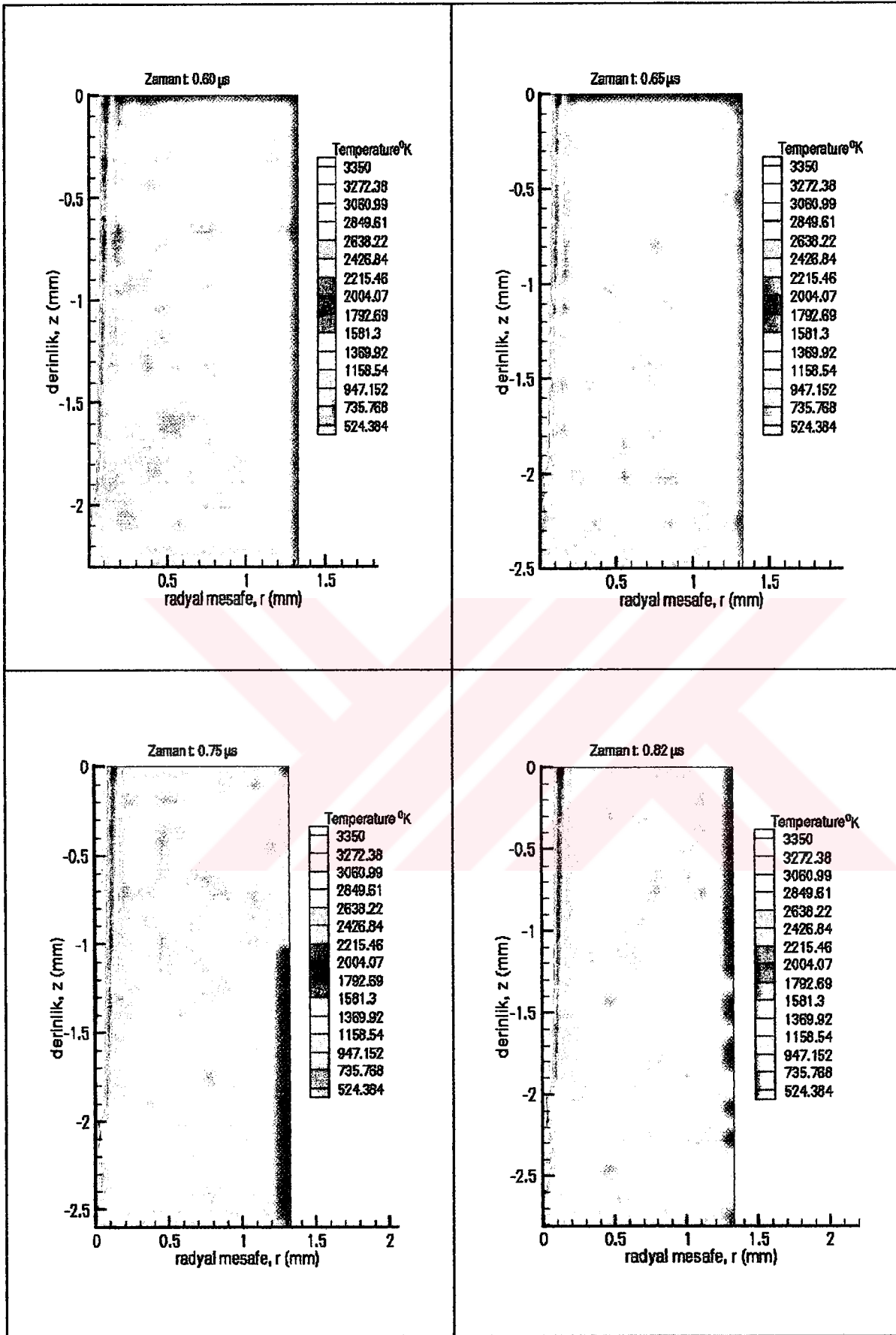
Şekil 5.6.A Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı



Şekil 5.6.B Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çelik bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı



Şekil 5.7.A Yapıştırıcı ile birleştirilmiş titanyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı



Şekil 5.7.B Yapıştırıcı ile birleştirilmiş titanyum bağlantıda farklı zamanlarda sıcaklık dağılımı

5.2 Isıl Gerilme ve Şekil Değişirme Problemi

5.2.1 Bir bindirme bağlantısının elasto-plastik gerilme analizi

Yük altındaki yapıştırıcı bağlantılarında gerilme ve şekil değişirme ile orantılı olarak gerilmelerin revize edilmiş analizi gerçekleştirilmiştir. Burada yapıştırıcının elastik davranışa uyduğu kabul edilmiştir ve bu durum Hook Kanunu olarak adlandırılmaktadır. Bu lineer davranış düşük gerilme seviyelerinde belki de doğrudur ve genellikle matematik modelin karmaşıklığı minimize edilir. Bununla birlikte pratikte, özellikle yüksek gerilme seviyelerinde gerilme-şekil değişirme davranışı çoğu yapıştırıcılarda Hook Kanunu'dan dikkate değer şekilde sapma gösterir.

Düşük gerilme seviyeleri içinde kesin bir sınır olmamakla birlikte gerilme, şekil değişirme ile doğru orantılıdır (lineer) ve gerilme-şekil değişirme eğrisinin eğimi Young Modülü'nü verir. Bununla birlikte, kesin bir gerilme seviyesinin üzerinde (akma gerilmesi) akmanın başlaması ile gerilme-şekil değişirme ilişkisi non-lineer'dir.

Sertleştirilmiş malzemeler için Ramberg-Osgood denklemi yazılacak olursa (Liu,1976);

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}^e + \bar{\varepsilon}^p \quad (5.15)$$

ve

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{E} + \left(\frac{\bar{\sigma}}{B} \right)^n \quad (5.16)$$

burada;

$\bar{\varepsilon}$ = toplam şekil değişirme, (m/m)

$\bar{\varepsilon}^e$ = elastik şekil değişirme, (m/m)

$\bar{\varepsilon}^p$ = plastik şekil değişirme, (m/m)

σ = eşdeğer gerilme = $\frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_{ij} \sigma_{ij}$, (N/m²; Pa)

E = elastikliğin young modülü, (N/m²; Pa)

B = malzemeye ait sabit

n = şekil değişirme fonksiyonu

Yapıştırıcı tabakasının öndeki iki köşesinde bu gerilmelerin çok yüksek olduğu revize edilmiş analiz ile ispatlanmıştır. Bağlantıda, çoğu zaman yoğunlaşmış olan bu gerilmelerin

ortalaması alınır. Eğer yapıştırıcı kullanılmışsa yüksek gerilme seviyelerinde elastik olmayan davranış gösterebilir, yoğunlaştırılan bu noktadaki gerilmelerin azaltılabilmesi ile bağlantı daha güvenli hale getirilebilir. Yapıştırıcı tabakasının önündeki bu köşelerde başlayan ve plastik şekil değişimine uyan bu lineer olmayan deformasyon max. gerilmelerin azalmasına neden olur (Liu,1976).

Gerilme analizinin lineer olmayan ve elastik olmayan bu davranışı da içermesi gerekmektedir. Malzemelerin yapılmış olan bağlantılarının gösterecekleri davranışlarının önceden tanımlanması bu yöntemle yapılır. Bu bölümde elasto-plastik gerilme analizi sonlu elemanlar metodu ile yapılmıştır.

5.2.1.1 Plastisitenin temel kavramları

5.2.1.1.1 Akma yüzeyi ve akma kriteri

Genellikle akma kriteri, dikkate alınan nokta altındaki gerilmenin durumuna tam olarak bağlı olacaktır ve bu nedenle bu noktadaki gerilme tensörünün dokuz elemanlı fonksiyonu vardır. Gerilme tensörünün simetrik alınmasından sonra bağımsız elemanlar altıya düşürülür.

Deney gerçek varsayılarak gerçekleştirilir, gerilme yeterli olursa akma meydana gelebilir ve genel akma kriteri;

$$F(\sigma_{ij}) = K \quad (5.17)$$

burada σ_{ij} gerilmenin durumunu gösterir ve K bilinen bir sabittir.

Denklem (5.17) altı boyutlu gerilme alanı içinde bir yüksek yüzeyi göstermektedir ki o akma yüzeyi olarak adlandırılır ve bir gerilme durumu gösteren bu yüzey üzerindeki tek noktada şekil değiştirme başlar.

5.2.1.1.2 Von Mises akma kriteri

Eğer denklem 5.17 genel akma şartı ise, von Mises akma kriteri incelenen alan için ifade edilecek olursa;

$$\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 \right] = \sigma_o^2 \quad (5.18)$$

burada σ_0 akma yüzeyinin başlangıcı için tekdüze aksenal olmayan gerilme içerisindeki akma gerilmesidir.

Uygunluk için, biz eşdeğer gerilmeyi $\bar{\sigma}$ olarak tanımlarsak;

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(S_{ij}S_{ij})^2} \quad (5.19)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.20)$$

burada $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{kk}$ = kopma gerilmesi ve bu nedenle von Mises akma kriteri tekrar yazılacak olursa,

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \quad (5.21)$$

Tek gerilimde akma gerilmesinin değeri bir noktadan uzanarak eşdeğer gerilme olduğu zaman, akmanın meydana gelişinin gösterimi bu şekildedir.

5.2.1.1.3 Prandtl-Reuss akmanın kontrol edilmesi

Prandtl-Reuss'a göre, yüklemelerin aniden olması durumunda şekil değişimi artar, demek ki aniden yüklemelerde gerilmedeki sapma orantılı olarak;

$$\frac{d\varepsilon_x^P}{S_x} = \frac{d\varepsilon_y^P}{S_y} = \frac{d\varepsilon_z^P}{S_z} = \frac{d\gamma_{xy}^P}{\tau_{xy}} = \frac{d\gamma_{yz}^P}{\tau_{yz}} = \frac{d\gamma_{zx}^P}{\tau_{zx}} = d\lambda \quad (5.22)$$

veya

$$d\varepsilon_{ij}^P = S_{ij}d\lambda \quad (5.23)$$

denklemdaki $d\lambda$ sıfırdan farklı orantı sabitidir, S_{ij} kopma gerilmesidir ve $\gamma_{ij}^P = 2\varepsilon_{ij}^P$ ise mühendislik kopma gerilmesidir.

Eğer plastik şekil değişimindeki diferansiyel artış $d\bar{\epsilon}^P$ eşdeğerli olarak tanımlarsak,

$$\begin{aligned}
 d\bar{\epsilon}^P &= \sqrt{\frac{2}{3}} (d\epsilon_{ij}^P \cdot d\epsilon_{ij}^P)^{\frac{1}{2}} \\
 &= \left[\frac{\sqrt{2}}{3} (d\epsilon_x^P - d\epsilon_y^P)^2 + (d\epsilon_y^P - d\epsilon_z^P)^2 + (d\epsilon_z^P - d\epsilon_x^P)^2 \right. \\
 &\quad \left. + 6(d\gamma_{xy}^P)^2 + 6(d\gamma_{yz}^P)^2 + 6(d\gamma_{zx}^P)^2 \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{5.24}$$

Prandtl-Reuss denklemi tekrar yazılacak olursa,

$$d\lambda = \frac{d\epsilon_x^P}{S_x} = \dots = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}^P}{\sigma} \tag{5.25}$$

Denklem (5.22) ve (5.25) 'de yer alan akmalar $d\lambda$ yok edilirse, Prandtl-Reuss gerilme-şekil değiştirme bağıntısı,

$$d\epsilon_{ij}^P = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}^P}{\sigma} S_{ij} \tag{5.26}$$

bu bağıntı eleman formunda ifade edilirse,

$$d\epsilon_x^P = \frac{d\bar{\epsilon}^P}{\sigma} \left[\sigma_x - \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) \right] \tag{5.27}$$

$$d\gamma_{zx}^P = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}^P}{\sigma} \tau_{zx} \tag{5.28}$$

veya matris formunda

$$\{d\varepsilon^P\} = \left\{ d\varepsilon_x^P \ d\varepsilon_y^P \ d\varepsilon_z^P \ d\tau_{xy}^P \ d\tau_{yz}^P \ d\tau_{zx}^P \right\} \quad (5.29)$$

$$= \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\} d\varepsilon^P \quad (5.30)$$

burada,

$$\left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \right\} = \left\{ \frac{3S_x}{2\sigma} \ \frac{3S_y}{2\sigma} \ \frac{3S_z}{2\sigma} \ \frac{3\tau_{xy}}{\sigma} \ \frac{3\tau_{yz}}{\sigma} \ \frac{3\tau_{zx}}{\sigma} \right\} \quad (5.31)$$

5.2.1.2 Elasto-plastik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

Bir elasto- plastik malzeme için eşdeğer gerilme $\bar{\sigma}$ ve eşdeğer şekil değiştirme arasındaki bağıntı aksenel olmayan gerinim testi ile tespit edilebilir, akma gerilmesinin değeri tek gerinim içinde uzayan nokta için σ_0 , akmanın meydana gelmesiyle eşdeğer gerilme σ ile gösterilir. Eğer ilave olunarak arttırılan eşdeğer gerilmenin değeri plastik şekil değişimine yerleştirilebilir ve bir nokta boyunca toplam şekil değişimi $\bar{\sigma}$ - ε eğrisi üzerinde ikiye bölünebilirse bu iki parça elastik ve plastik şekil değişimi olarak adlandırılabilir (Liu,1976).

$$\bar{\varepsilon} = \varepsilon^e + \varepsilon^P \quad (5.32)$$

Bir noktadaki toplam şekil değiştirme şu şekilde ifade edilebilir.

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^P\} \quad (5.33)$$

plastik şekil değişimindeki ve elastik şekil değişimindeki artmaların toplamı toplam şekil değiştirme şeklinde gösterilebilir.

Eşdeğer gerilmedeki artış, zincir kuralı ile gösterilebilir.

$$\{d\bar{\sigma}\} = \left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\}^T \{d\sigma\} \quad (5.34)$$

burada

$$\{d\sigma\} = \left\{ d\sigma_x \ d\sigma_y \ d\sigma_z \ d\tau_{xy} \ d\tau_{yz} \ d\tau_{zx} \right\} \quad (5.35)$$

Hook Kanunu'nda, artık şekil değişimi $\{d\varepsilon\}$, aynı şekilde artık gerilme $\{d\sigma\}$,

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\varepsilon^e\} = [D] (\{d\varepsilon\} - \{d\varepsilon^p\}) \quad (5.36)$$

burada $[D]$ elastik gerilme-şekil değiştirme matrisidir bu önceki bölümlerde gösterilmişti.

denklem (5.29)'dan şunu bulabiliriz.

$$H^1 = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} = \text{eşdeğer gerilme-eşdeğer plastik şekil değiştirme eğrisi eğimi} \quad (5.37)$$

ve

$$d\varepsilon^p = \frac{1}{H} \left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\}^T \{d\sigma\} \quad (5.38)$$

denklem (5.14) ve denklem (5.10) ile birlikte denklem (5.16) da yerine koyarsak,

$$d\varepsilon^p = \frac{\left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\}^T [D]}{H^1 + \left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\}^T [D] \left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\}} \cdot \{d\varepsilon\} \quad (5.39)$$

$$= [W] \{d\varepsilon\} \quad (5.40)$$

Gerilme-şekil değiştirme bağıntısındaki bu artma Hook Kanunu'na benzer fakat bunun orantı sınırı üzerinde geçerliliğini sağlaması için bunun yerine, denklem (5.40) ve (5.30)'un denklem (5.36)'da yerine konulması ile elde edilen yeni bağıntı şöyledir;

$$\{d\sigma\} = \left([D] - [D] \left\{ \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma} \right\} [W] \right) \{d\varepsilon\} \quad (5.41)$$

$$= [D]_{ep} \{d\varepsilon\} \quad (5.42)$$

Bu tam plastik davranış, elastik için önemsizdir. $H^I=0$, denklem (5.42)'de hala geçerlidir.

$[D]_{ep}$ matrisi genellikle 3 boyutludur ve simetrik durumdadır.

5.2.1.2.1 Düzlem şekil değiştirme durumu

Düzlem şekil değiştirme şartı için, $\varepsilon_z = 0$, $\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$ ile $\tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ fakat $\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y) \neq 0$.

Gerilme-şekil değiştirme matrisi $[D]_{ep}$, $d\sigma_z, dy_{yz}$ ve $d\tau_{zx}$ satırlarının silinmesi ile sağlanabilir. Denklem (5.42)'in $[D]_{ep}$ matrisine, karşılık olan $d\varepsilon_z = 0$, $dy_{yz} = dy_{zx} = 0$ kolonlarının matrisi genellikle 3 boyutludur ve ilave olarak bu sağlama Yamada tarafından yapılmıştır.

$$\{d\sigma\} = [D]_{ep} \{d\varepsilon\} \quad (5.43)$$

veya

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1+\mu} \begin{bmatrix} \frac{1-\mu}{1-2\mu} \frac{S_x^2}{P^*} & \frac{S_x S_y}{P^*} & 0 \\ \frac{\mu}{1-2\mu} \frac{S_x S_y}{P^*} & \frac{1-\mu}{1-2\mu} \frac{S_y^2}{P^*} & 0 \\ -\frac{S_x \tau_{xy}}{P^*} & -\frac{S_y \tau_{xy}}{P^*} & \frac{1}{2} \frac{\tau_{xy}}{P^*} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.44)$$

simetrik

burada,

$$P^* = \frac{2}{3}(\bar{\sigma})^2 \left(1 + \frac{H^I}{3G}\right)$$

$$S_x = \frac{1}{3}[(2-\mu)\sigma_x - (1+\mu)\sigma_y]$$

$$S_y = \frac{1}{3}[-(1+\mu)\sigma_x + (2-\mu)\sigma_y]$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2]^{\frac{1}{2}}$$

5.2.1.2.2 Düzlem gerilme durumu

Denklem (5.25) Prandtl-Reuss hatırlanır ve genişletilerek verilirse;

$$d\lambda = \frac{3 d\bar{\varepsilon}^P}{2 \bar{\sigma}} = \frac{3 d\bar{\sigma}}{2 \bar{\sigma} H'} \quad (5.45)$$

Plastik kısım ve elastik kısma bağlı olarak toplam şekil değiştirmedeki artma $\{d\varepsilon\}$. Bu ifade verilirse,

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} \quad (5.46)$$

Düzlem gerilme durumu için, $\sigma_z = 0$, $\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0$, (5.45) ve (5.46) denklemleri birlikte yeniden yazılırsa,

$$d\varepsilon_x = S_x d\lambda + \frac{1}{E} (d\sigma_x - \mu d\sigma_y) \quad (5.47)$$

$$d\varepsilon_y = S_y d\lambda + \frac{1}{E} (d\sigma_y - \mu d\sigma_x) \quad (5.48)$$

$$d\gamma_{xy} = 2\tau_{xy} d\lambda + 2\left(\frac{1+\mu}{E}\right) d\tau_{xy} \quad (5.49)$$

ve

$$d\lambda = \frac{9 S_x d\sigma_x + S_y d\sigma_y + 2\tau_{xy} d\tau_{xy}}{4 H'(\bar{\sigma})^2} \quad (5.50)$$

Denklem (5.49)'da $d\lambda$ yerine denklem (5.50) konulur ve gerilmedeki artmalar için, çözüm yapılırsa şunu elde ederiz,

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{Q} \begin{bmatrix} S_y^2 + 2B & & \\ -S_x S_y + 2\mu B & S_x^2 + 2B & \\ \frac{S_x + \mu S_y}{1+\mu} \tau_{xy} & -\frac{S_y + \mu S_x}{1+\mu} \tau_{xy} & \frac{R}{2(1+\mu)} + \frac{2H'}{9E} (1-\mu)\bar{\sigma}^{-2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5.51)$$

simetrik

burada

$$B = \frac{2H^1}{9E} (\bar{\sigma})^2 + \frac{\tau_{xy}^2}{1+\mu} \quad (5.52)$$

$$R = S_x^2 + 2\mu S_x S_y + S_y^2 \quad (5.53)$$

$$Q = R + 2(1-\mu^2)B \quad (5.54)$$

$$\bar{\sigma} = [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5.55)$$

$$S_x = \frac{1}{3}(2\sigma_x - \sigma_y) \quad (5.56)$$

$$S_y = \frac{1}{3}(-\sigma_x + 2\sigma_y) \quad (5.57)$$

5.2.1.3 Büyük şekil değiştirme parametresi H^1 üzerine bazı düşünceler

Elasto-plastik problemlerin çözümü için büyük şekil değiştirme parametresi H^1 'ın değerlendirilmesi gerekecektir. Matris içinde eşdeğer gerilme eşdeğer plastik şekil değiştirme eğrisinin eğiminde H^1 'ın değerlendirilmesi gereklidir bundan önce hiçbir problemin çözümüne girilmemelidir.

H^1 'ın bir ölçme ile tanımlanabilmesi, $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}^p$ eğrisinin deneysel olarak tespit edilmesine bağlıdır. Bununla birlikte bu değer açıkça kullanılması zordur ve bizim şimdiki amacımız için gerçekçi değildir. Biz gerilme ve şekil değiştirme arasındaki matematiksel bağıntıyı yaklaşık olarak araştırmaktayız. Ayrıca toplam şekil değişimini iki ayrı kısım içine, elastik ve plastik olmak üzere almak istemekteyiz, gerilme ile plastik şekil değişimi arasında kullanılan bağıntıdan H^1 'ın sade denklemini anlamına gelecek olan değeri bulunabilir;

$$H^1 = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}^p} \quad (5.58)$$

Bundan sonra ikisi içinde matematiksel model kullanılır.

5.2.1.3.1 Ramberg-Osgood Model

Eğer eşdeğer gerilme ve eşdeğer şekil değiştirme eğrisi Ramberg-Osgood denklemi ile ifade edilmek istenirse,

$$\varepsilon = \frac{\bar{\sigma}}{E} + \left(\frac{\bar{\sigma}}{B}\right)^n = \bar{\varepsilon}^e + \bar{\varepsilon}^p \quad (5.59)$$

eşitlikte yer alan,

- E = elastisitenin Young modülü (Pa)
- $\bar{\sigma}$ = eşdeğer gerilme (Pa)
- B = malzemeye ait sabit (Pa)
- n = büyük şekil değiştirme parametresi

Plastik kısmın toplam şekil değiştirmesi,

$$\bar{\varepsilon}^p = \left(\frac{\bar{\sigma}}{B}\right)^n \quad (5.60)$$

$\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}^p$ eğrisi için H^1 'in eğimi ifade edilirse,

$$H^1 = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}^p} = \frac{B^n}{n(\bar{\sigma})^{n-1}} \quad (5.61)$$

burada şimdiki gerilme aşaması olarak bilinen durum değerlendirilmemiştir.

Her bir iterasyon için H^1 'in yeniden hesaplanması ile proses doğru olarak hesaplanabilir.

5.2.1.3.2 Elastik-lineer büyütülmüş model

Bir çok durumda orantı sınırından sonra $(\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon})$ eğrisinde düz çizgi hızla kapanır. Demek ki biz Young modülü'nün küçük bir parçasında H^1 'in yaklaşık olarak doğrusal davranış gösterdiğini varsayıyoruz.

Proses boyunca her bir iterasyondan sonra kullanılan H^1 'in yaklaşık olarak değişmediği anlamına gelmektedir.

H^1 'in sırasıyla değerleri (0.05E, 0.1E, 0.25E ve 0.5E) yapıştırıcı malzemesinin farklı davranışlarının incelenmesi ile düzenlenmiştir ve bu çalışma için bu değerler seçilmiştir.

5.2.1.4 Elasto-plastik problemlerin çözümü

Başlangıç gerilmesi veya Newton-Raphson metodu birarada değiştirilerek kullanılan bu çalışmada proses doğru olarak hesaplanmıştır. Bir lineer olmayan (non-linear) problemin çözümü için bir sıra tahmin yapılır ve yaklaşık bu metotla çözülür (Owen, 1980).

Hesaplamanın ilk aşamasında, yüklemenin artması esnasında akma davranışı, çözümde elastik probleme özgü olarak şekil değiştirmenin artması $\{\Delta\epsilon\}$ tespit edilir ve bu gerilme artışına karşılık olarak her nokta için düzenlenmelidir (Liu,1976).

Doğrusal değişen gerilmedeki artış $\{\Delta\sigma\}$ genellikle aşılacaktır, bu lineer olmayan davranışta gerilmenin artmasının izah edilmesine uygundur. İhtiyaç duyulan düzende, birinci gerilme sisteminin başlatılması için başlatma kuvvetleri, $\{\Delta\sigma'\}-\{\Delta\sigma\}$ 'dir.

Yapıda ilave olunan deformasyonda (değiştirilemeyen özellikler nedeni ile) bu başlangıç kuvvetleri müsaade edildiği kadar bir sonraki aşamaya taşınır. Birinci aşamadaki bu gerilme artışları, lineer olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin yönlendirdiği artışlara izin verebilir. Limit değere yaklaşılması ile birlikte başlangıç kuvvetleri dengeleninceye kadar bütün proses tekrar edilir, bundan sonraki yüklemde artış tatbik edilir. Bu proses yapıda toplam yükleme yapılarına kadar devam eder.

Çözümün süreçlerini aşağıdaki adımlarla özetleyebiliriz (Liu,1976).

1. Elastik çözüm önceki bölümlerde tartışılmıştı, yapıda başlangıçtaki şekil değiştirme yükleme ile orantılı olarak açıklanabilir P_0 .
2. Kalan yük henüz bölünmeden yük artmalarının tatbik edilmesi,

$$\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$$

3. P_0 yüküyle başlayan, gerilme $\{\sigma\}_0$ ve şekil değiştirme $\{\epsilon\}_0$ elastik çözümden bulunur.
4. Yapıya uygulanan ilk yük artışı ΔP_1 , gerilmenin elastik artışına $\{\Delta\sigma'\}_1$ eklenir ve eşdeğer şekil değiştirme artışı $\{\Delta\epsilon'\}_1$ tayin edilir.
5. Gerilme ve şekil değiştirme yeniden yazılırsa

$$\{\sigma'\} = \{\sigma\}_0 + \{\Delta\sigma'\}_1 \quad (5.62)$$

$$\{\epsilon'\} = \{\epsilon\}_0 + \{\Delta\epsilon'\}_1 \quad (5.63)$$

Denklem (5.17)'in anlamı akma şartının birleştirilen her bir nokta için durdurulmasıdır. Eğer $F\{\sigma'\} - K < 0$ ise meydana gelen elastik şekil değişiminin değiştirilmesi sadece proses durdurulduğunda olur. Eğer $F\{\sigma'\} - K \geq 0$ ise akmanın ve plastik şekil değişiminin değiştirilmesi prosesidir.

6. Doğru gerilme artışına karşılık olan şekil değiştirme artışı tahmin edilebilir.

$$\{\Delta\sigma\}_1 = [D]_{ep} \{\Delta\varepsilon\}_1 \quad (5.64)$$

ifadesiyle $[D]_{ep}$, denklem (5.18), (5.19) veya (5.24) ile birlikte gerilme $\{\sigma'\}$ tahmin edilebilir.

7. Başlangıç kuvvetlerinin dengelenmesine karşılık olan gerilme değerlendirilirse

$$\{\Delta\sigma''\}_1 = \{\Delta\sigma'\}_1 - \{\Delta\sigma\}_1 \quad (5.65)$$

8. Pratik gerilme ve şekil değiştirmeye karşılık olarak,

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} + \{\Delta\sigma''\}_1 \quad (5.66)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon'\} + \{\Delta\varepsilon\}_1 \quad (5.67)$$

ve bir sonraki iterasyonda kullanıcı için gerekli ise H^1 yeniden yazılır.

9. Başlangıç kuvvetleri ile dengelendiğinde bunlara karşılık olan düğüm kuvvetleri tahmin edilebilir. Her bir eleman için şu şekilde verilebilir,

$$\{\Delta R_1\} = \int_v [B]^T \{\Delta\sigma''\}_1 d(\text{vol.}) \quad (5.68)$$

burada yer alan $[B]$ matrisi düğümlerdeki yer değiştirmelerin süresi içinde, şekil değiştirmelerin belirlenmesi içindir.

10. Kullanılan $\{\Delta R_1\}$, adım dörtten dokuz kadar tekrarlanır ve yeni yüklemelerin artırılması ile $\{\Delta R_2\}, \{\Delta R_3\}, \dots$ vb. düğüm kuvvetleri tahmin edilir bu işlem istenen sınıra değin yakınsanır ve son gerilme $\{\sigma\}_1$ ve şekil değiştirme $\{\varepsilon\}_1$ dir.

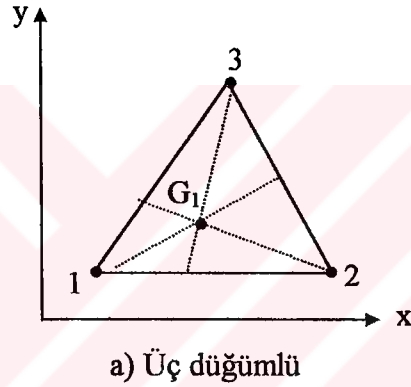
11. Kullanılan $\{\sigma\}_1$ ve $\{\epsilon\}_1$ yeni başlangıç değerleridir ve yeni yükleme artışı ΔP_2 'ye eklenir.

12. Adım dörtten onbir'e kadar tekrarlanan adımlarla toplam yük P yapıya tatbik edilir.

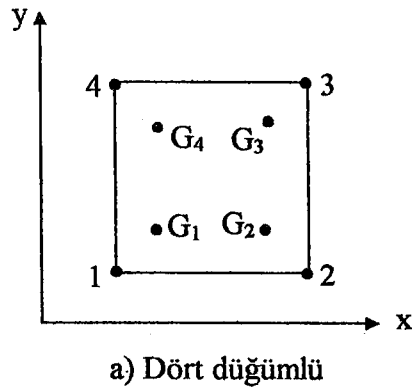
Yardımcı bir not olarak, kullanılan elastik özellikler orijinalinden değiştirilmeden $[D]_{ep}$ matrisi çözümün iterasyonları esnasında kullanılabilir.

5.2.1.5 Kullanılan sonlu eleman tipleri

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek bu geometrik yapıya en uygun gelecek elemanlar seçilmelidir. Seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etme oranında, elde edilecek neticeler gerçek çözüme yaklaşmış olacaktır.



Şekil 5.8 Yerel koordinatlarda iki boyutlu kenarları düz simpleks ve parabolik üçgen sonlu eleman modeli (Engin, 1997)



Şekil 5.9 İki boyutlu kenarları düz simpleks ve parabolik dikdörtgen sonlu eleman modeli (Engin, 1997)

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da gösterilen sonlu eleman modelleri, elasto-plastik gerilme analizinde kullandığımız sonlu eleman modelleridir.

5.2.1.6 Bu tamamlayıcı noktalarda düğüm noktalarının gerilmelerinin hesaplanması

Elasto-plastik analize başlamadan önce her bir iterasyon için denge başlangıç kuvvetlerine karşılık olan düğüm kuvvetleri hesaplanmalıdır bunu ifade edersek,

$$\{\Delta R\} = \int_V [B]^T \{\Delta \sigma\} d(\text{vol.}) \quad (5.69)$$

Bu integrasyonda nümerik analiz tamamlanmamıştır. Denklem (5.32)’de kullanılan (3×3) Gaussian alanı hesaplama formülünün anlaşılabilmesi, şu açıklama ile yapılır,

$$\{\Delta R\} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 H_i H_j [B(\xi_i, \eta_j)]^T \{\Delta \sigma(\xi_i, \eta_j)\} \quad (5.70)$$

burada,

H_i, H_j = Gaussian alan hesaplama ağırlık katsayısı

$[B(\xi_i, \eta_j)]^T$ = nokta integrasyonunda (ξ_i, η_j) , $[B]^T$ matrisinin değerlendirilmesi

$\{\Delta \sigma(\xi_i, \eta_j)\}$ = nokta integrasyonunda (ξ_i, η_j) , gerilmedeki artmanın $\{\Delta \sigma\}$ değerlendirilmesi

Revizyon yapılan kısımlarda dokuz ve onuncu adımlarda tanımlanmalıdır, iteratif yöntemin yakınsanması ve akma şartının kontrol edilmesi için tüm iterasyon aşamalarında noktalardaki integrasyonlarda gerilmelerin yeniden yazılması ve o nedenle tahmin edilmesini isteriz. Noktalardaki integrasyonda gerilmelerin tümüne ihtiyaç duyulduğunda bu çok uygundur. Bu çalışma da, diğer bir çok problemlere benzer, bununla birlikte düğüm noktalarındaki gerilmeler bizi daha çok ilgilendirir. Böylece düğüm noktalarındaki gerilmelerde noktaların integrasyonunda gerilmeleri değiştirmek gereklidir. Bu değişim değişik bir yöntemle yapılabilir, en küçük kareler metodu kullanılarak tek bir hücredeki gerilme değeri ile komşu eleman arasında düğüm noktalarında sağlanır.

Çizelge 5.2 Dörtgen sonlu eleman tipindeki Gauss integrasyon noktaları, konumları ve ağırlıkları (Rao, 1989)

n	Konumları (η_i, ξ_j)		Ağırlıklar (W_i, W_j)
	$i, j = 1, \dots, n$ (n=düğüm sayısı)		
4	(η_1, ξ_1) (η_2, ξ_2) (η_3, ξ_3) (η_4, ξ_4)	$-0.577350269189626, -0.577350269189626$ $+0.577350269189626, -0.577350269189626$ $+0.577350269189626, +0.577350269189626$ $-0.577350269189626, +0.577350269189626$	$W_i = 1.0000000000000000$
8	(η_1, ξ_1) (η_2, ξ_2) (η_3, ξ_3) (η_4, ξ_4) (η_5, ξ_5) (η_6, ξ_6) (η_7, ξ_7) (η_8, ξ_8)	$-0.774596669241483, -0.774596669241483$ $0, -0.774596669241483$ $+0.774596669241483, -0.774596669241483$ $+0.774596669241483, 0$ $+0.774596669241483, +0.774596669241483$ $0, +0.774596669241483$ $-0.774596669241483, +0.774596669241483$ $-0.774596669241483, 0$	$W_i = 0.5555555555555555$ $W_j = 0.8888888888888888$
12	(η_1, ξ_1) (η_2, ξ_2) (η_3, ξ_3) (η_4, ξ_4) (η_5, ξ_5) (η_6, ξ_6) (η_7, ξ_7) (η_8, ξ_8) (η_9, ξ_9) (η_{10}, ξ_{10}) (η_{11}, ξ_{11}) (η_{12}, ξ_{12})	$-0.861136311594053, -0.861136311594053$ $-0.339981043584856, -0.861136311594053$ $+0.339981043584856, -0.861136311594053$ $+0.861136311594053, -0.861136311594053$ $+0.861136311594053, -0.339981043584856$ $+0.861136311594053, +0.339981043584856$ $+0.861136311594053, +0.861136311594053$ $+0.339981043584856, +0.861136311594053$ $-0.339981043584856, +0.861136311594053$ $-0.861136311594053, +0.861136311594053$ $-0.861136311594053, +0.339981043584856$ $-0.861136311594053, -0.339981043584856$	$W_i = 0.347854845147454$ $W_j = 0.652145154862546$

En küçük kareler metodu kullanılan bu yöntemde değişim yapılmaktadır bu kadar bir düzgün tek gerilme değeri iki komşu eleman arasındaki düğüm noktalarında sağlanmaktadır.

En küçük kareler metodu ile düğümlerdeki gerilmeler düzgünleştirildiğinde bilinmeyen değeri her bir eleman içindeki nokta için şu şekilde ifade edilebilir,

$$g(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^n \tilde{N}_i \tilde{\sigma}_i \quad (5.71)$$

burada \tilde{N}_i , (ξ, η) koordinatların bir fonksiyonu ve bu düğüm i de düzgün şekil fonksiyonudur, $\tilde{\sigma}_i$ düğüm i de düzgünleştirilmiş düğüm gerilmesi ve n elemanlardaki düğümlerin numarasıdır. Önceki kullanılan sonlu elemanlar analizinde geliştirilen N_i fonksiyonundan farklı olarak \tilde{N}_i fonksiyonu yapılabilir (Bu çalışmada $\tilde{N}_i = N_i$ seçilmiştir).

Dörtgen sonlu eleman tipindeki Gauss integrasyon noktaları, konumları ve ağırlıkları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir

Düzgün ve düzgün olmayan gerilmeler arasındaki hata eleman içinde herhangi bir nokta için verilecek olursa,

$$e(\xi, \eta) = \sigma(\xi, \eta) - g(\xi, \eta) \quad (5.72)$$

burada düzgün olmayan gerilmeler bir eleman içinde herhangi bir noktada gerilme-yer değiştirme bağıntısından elde edilebilir.

$$\sigma(\xi, \eta) = [D][B]\{u\} \quad (5.73)$$

burada $[D]$ elastiklik matrisi, $[B]$ gerilme- yer değiştirme matrisi ve $\{u\}$ elemanlar için düğüm yer değiştirmeleridir. Bu problem şimdi düzgün olmayan gerilmelerin belirlenmesine uyar. $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p$ ile beraber fonksiyon minimize edilirse,

$$X = \sum_{j=1}^{ne} \iint e(\xi, \eta)^2 \det[J] d\xi d\eta \quad (5.74)$$

burada p düğüm noktalarının toplam sayısı, "ne" ise toplam eleman sayısıdır.

X olarak yazılacak olursa,

$$i = 1, 2, \dots, p \quad \text{için} \quad \frac{\partial X}{\partial \sigma_i} = 0 \quad (5.75)$$

Her bir eleman için, Denklem (5.75)'in geliştirilmesiyle, düzgünleştirilmiş düğüm gerilmeleri $\tilde{\sigma}_i$ için matris denklemi yazılabilecektir.

$$\begin{bmatrix} \iint \tilde{N}_1 \tilde{N}_1 d\xi d\eta & \dots & \iint \tilde{N}_1 \tilde{N}_n d\xi d\eta \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \iint \tilde{N}_n \tilde{N}_1 d\xi d\eta & \dots & \iint \tilde{N}_n \tilde{N}_n d\xi d\eta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\sigma}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\sigma}_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \iint \tilde{N}_1 \sigma d\xi d\eta \\ \vdots \\ \iint \tilde{N}_n \sigma d\xi d\eta \end{Bmatrix} \quad (5.76)$$

5.2.2 Kullanılan malzemelere ait gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \epsilon$) eğrileri

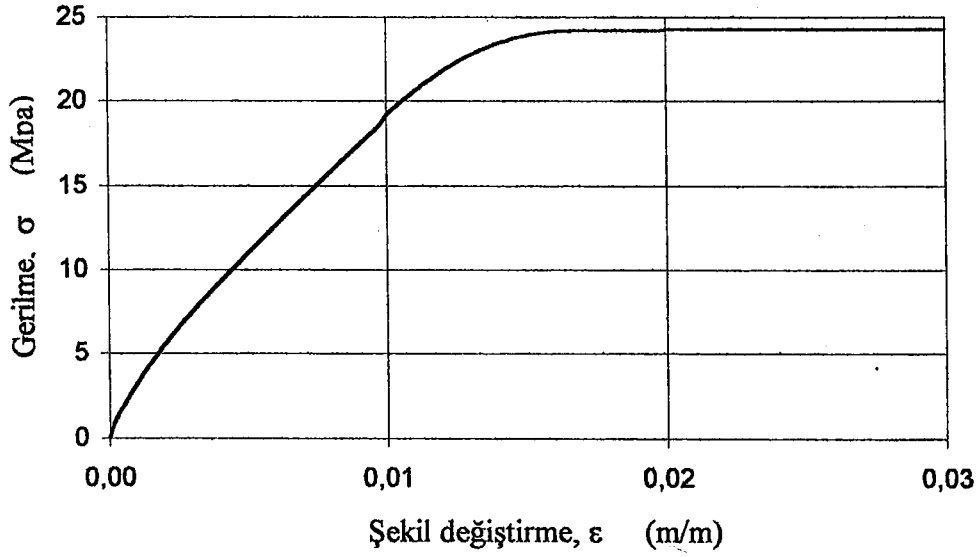
Laser nokta kaynağı yapılan yapıştırıcı ile birleştirilmiş, alüminyum, titanyum ve çelik plakaların daha önce Çizelge 5.1’de verilen termodinamik özelliklerin kullanılması ile elde edilen sıcaklık dağılımları tespit edilmiş ve bu sonuçlar daha önce gösterilmişti.

Isı analizinin ardından gerçekleştirdiğimiz, lineer olmayan gerilme analizinde alüminyum, titanyum, çelik ve epoksi yapıştırıcının kullanılan mekanik özellikleri ise Çizelge 5.3’de gösterilmektedir.

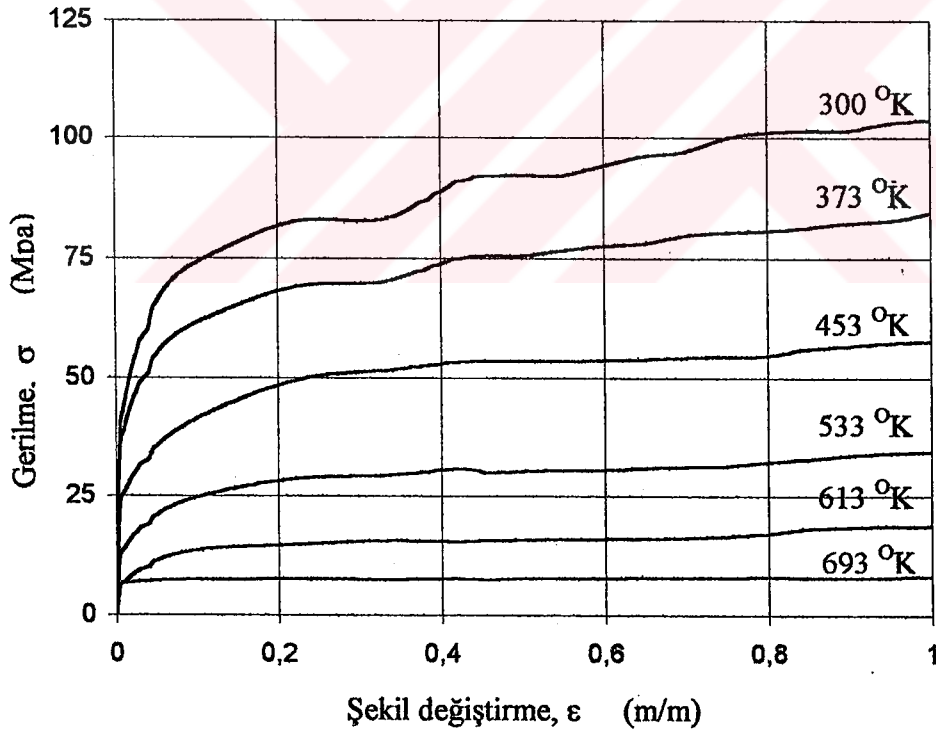
Çizelge 5.3 Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Özellik	Malzemenin Adı			
	Çelik	Alüminyum	Titanyum	Epoksi
Young modülü, E GPa	200	100	116	5.33
Poison oranı, ν	0.29	0.22	0.34	0.34
Isıl genleşme katsayısı, α $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$	12.6	24	8.9	60

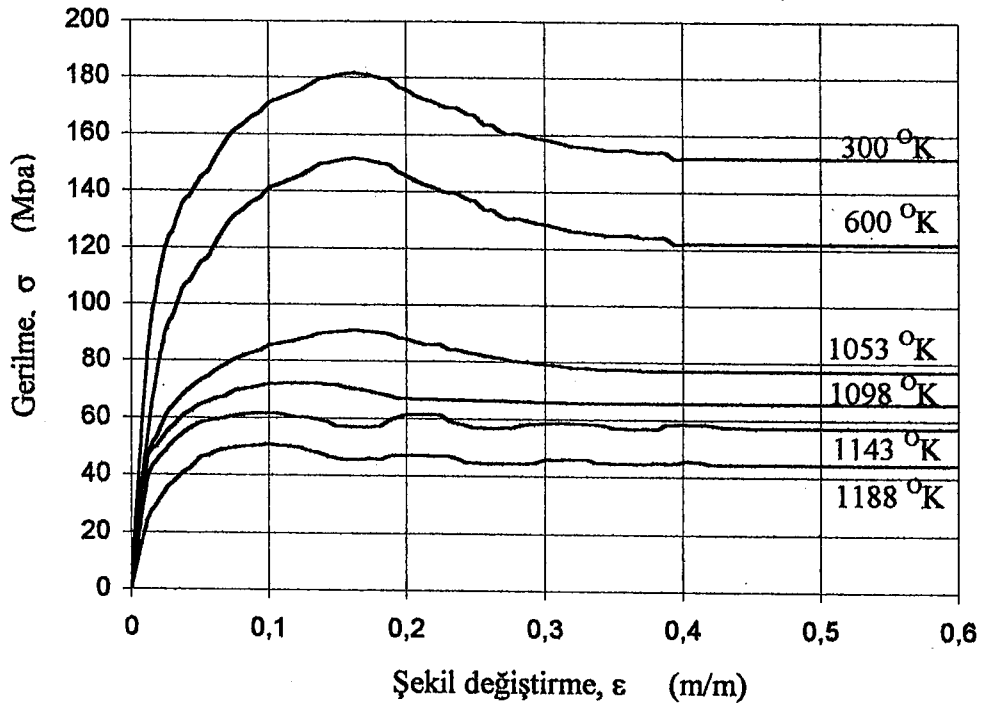
Daha önceki bölümlerde gerilme-şekil değiştirme arasındaki bağıntılardan ayrıntılı olarak bahsedildi. Şekil değişimi üzerinde malzemenin o anki sıcaklığının büyük etkisi vardır. Bizim problemimizde de çok yüksek sıcaklıklar olması nedeni ile gerçekçi bir çözüm yapabilmek için oda sıcaklığının çok üzerindeki sıcaklıklarda da şekil değiştirmenin bilinmesi gerekmektedir. Analizler alüminyum, titanyum ve çeliğin, deneysel gerilme-şekil değiştirme ($\sigma - \epsilon$) neticelerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Alüminyum, titanyum, çelik ve epoksi yapıştırıcıya ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklar için aşağıda gösterilmektedir Şekil (5.10), (5-11), (5-12) ve (5-13).



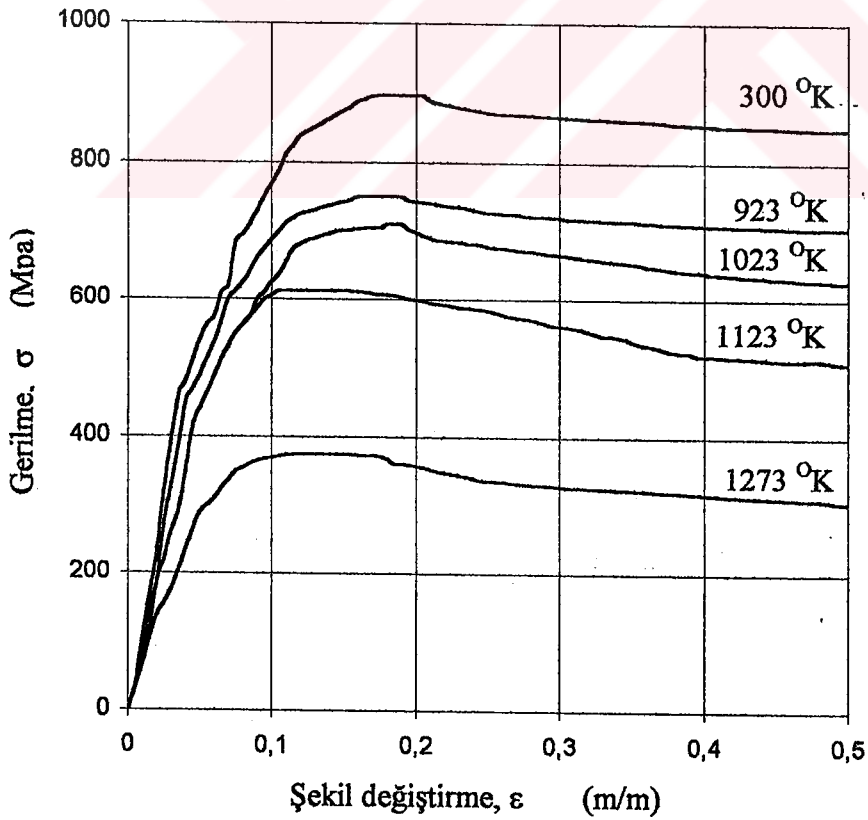
Şekil 5.10 Epoksi türü yapıştırıcıya ait gerilme şekil değiştirme eğrisi (Lee ve Neville, 1957)



Şekil 5.11 Alüminyum % 99.99 ait gerilme şekil değiştirme eğrileri (Ohichada,2000), (Boyer,1990)



Şekil 5.12 Yüksek karbonlu çeliğe ait gerilme şekil değiştirme eğrileri (Boyer, 1990)



Şekil 5.13 Titanyum alaşımına ait gerilme şekil değiştirme eğrileri (Yongqing ve diğ. 1999), (Boyer, 1990)

5.2.3 Elasto-plastik gerilme analizinde elde edilen neticeler

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş çok ince metal plakaların laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı, sonlu farklar metodunu kullanarak geliştirilen Fortran programı (Şekil 5.4) ile bulunmuştur.

Bu bindirme bağlantısının elasto-plastik gerilme analizinde ise, bu tür problemlerin çözümünde etkili bir metot olan non-lineer sonlu eleman metodu kullanılmıştır. Bütün elasto-plastik gerilme analizleri genel amaçlı sonlu eleman yazılımı olan ANSYS^[R] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ANSYS^[R] akış şemasında (Şekil 5.14) görüldüğü gibi Heat2d dosyasında yer alan sıcaklık değerleri, ANSYS^[R] ortamına aktararak gerilme ve şekil değiştirmeler hesap edilmiştir. Daha önce bahsedilen lineer olmayan (non-linear) gerilme analizi metodu kullanarak problemin elasto-plastik analizi yapılmıştır.

Alüminyum, titanyum ve çeliğin mekanik özelliklerinin (Çizelge 5.3) farklı olması yanında, her üç bindirme bağlantısında aynı tür epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu bindirme bağlantıları için analizlerin neticeleri grafik olarak:

1. Von Mises gerilme dağılımları,
2. Von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları,
3. Von Mises elastik şekil değiştirme dağılımları,
4. Eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları, esas alınarak değerlendirilmiştir.

Problemin tüm geometrisinin yukarıda belirtilen davranışlarının tespit edilmesi yanında, sadece yapıştırıcı tabakasının da alüminyum, titanyum ve çelik bindirme bağlantılardaki davranışı analiz edilmiştir. Sistemden bağımsız olarak yapıştırıcı tabakasının adı geçen durumlar için grafikleri, önemli görülen bölgelerinin de büyütülerek çizilmesi suretiyle ayrıca gösterilmiştir.

Aşağıda yer alan grafiklerde elastik şekil değişimi gösterilmemiştir. Elastik şekil değişimi Denklem (5.32)'den, $\bar{\epsilon}^e = \bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}^p$ şeklinde bulunabilir. Isı analizinden, istenilen kaynak derinliğine (2.6 mm) ulaşma süresinin, alüminyum bağlantıda 0.203 μ s, çelik bağlantıda 0.65 μ s ve titanyum bağlantıda 0.82 μ s olduğunu tespit etmiştik. Bu sürelerin farklı olmasının temel nedeni malzemelerin termodinamik özellikleridir (Çizelge 5.1). Bu çalışmada sadece laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen ısıl gerilmeler hesap edilmiştir. İstenilen bu kaynak derinliğine ulaşıldıktan sonra laser ışını kesilecek ve kaynak yapılan bölge soğumaya başlayacaktır. Bundan sonra kaynak yapılan bu bölgede

katılaşmanın da etkisiyle artık gerilmeler oluşacaktır. Fakat bizim bu çalışmamızda katılaşma prosesi esnasında ortaya çıkan artık gerilmeler incelenmemiştir.

Ekte sırasıyla alüminyum, çelik ve titanyum bindirme bağlantılarına ait grafikler verilmiştir. Bu grafikler üzerinde şu değerlendirmeleri yapmak mümkün olacaktır;

Alüminyum bindirme bağlantısının gerilme ve şekil değiştirme analizi neticesinde, en yüksek von Mises gerilme değeri ilk plaka kalınlığı boyunca 57.3 MPa civarında iken ergime ve buharlaşmanın yapıştırıcı tabakasından hızla ikinci plakaya geçmesi ile birlikte 66.6 MPa değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.15). Gerilme artışı, zamana ve kaynak derinliği artımına bağlı olarak artmakta ve kaynak prosesi sonunda en yüksek değere ulaşmaktadır.

Alüminyum bindirme bağlantısında meydana gelen von Mises toplam şekil değiştirme değeri proses süresince artarak, 0.203 μs 'de, 0.0778 değerine ulaşmıştır (Şekil 5.16). Gerilmede olduğu gibi sıcaklık değerinin en yüksek olduğu bölgelerde toplam şekil değiştirme miktarı en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Elastik şekil değiştirme birinci plaka boyunca 0.00105 değerinde iken, delik oluşumunun yapıştırıcı tabakasına ulaşmasıyla 0.00278 değerine ulaşmakta, ikinci plaka ile birlikte aniden artarak 0.00604 değerine yükselmektedir. Eşdeğer plastik şekil değiştirme, elastik şekil değiştirme gibi büyük bir alana yayılım göstermemekle birlikte benzer şekilde delik bölgesinde olmaktadır. Eşdeğer plastik şekil değiştirme 0.0798 değerine ulaşmaktadır (Şekil 5.17).

Yapıştırıcı tabakasinda oluşan gerilmeler, arka uç olarak adlandırdığımız kısımda soyulma gerilmeleri şeklinde başlamaktadır. Delik derinliğinin artması ile birlikte delik bölgesi tarafında olan uçta en yüksek gerilmeler oluşmaktadır (Şekil 5.18). Benzer şekilde en yüksek plastik şekil değiştirme (Şekil 5.20) ve toplam şekil değiştirmeler (Şekil 5.19) bu kısımda olmakla birlikte, elastik şekil değiştirmenin tüm yapıştırıcı tabakasinda olduğu görülmektedir.

Çelik bindirme bağlantısında, zamanın ve delik derinliğinin artmasına bağlı olarak von Mises gerilme değerinin 154 MPa olduğu görülmektedir (Şekil 5.21). Von Mises toplam şekil değiştirme 0.1040 (Şekil 5.24), von Mises elastik şekil değiştirme 0.0060 ve eşdeğer plastik şekil değiştirme 0.1050 (Şekil 5.23) değerinde olmaktadır. En büyük şekil değiştirmeler delik civarında oluşmaktadır.

Çelik bindirme bağlantısında yer alan yapıştırıcı tabakasinda oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarının alüminyum bindirme bağlantısında yer alan gerilme ve şekil

değiştirme dağılımları ile benzer karakteristik özellikleri gösterdiğini söylemek mümkündür.

Titanyum bindirme bağlantısında, meydana gelen en yüksek von Mises gerilme değeri 486 MPa'dır (Şekil 5.27). Von Mises toplam şekil değıştirme değeri 0.0617 (Şekil 5.28), von Mises elastik şekil değıştirme 0.0060 ve eşdeğer plastik şekil değıştirme 0.0446 (Şekil 5.29) değerine ulaşmaktadır. Gerilme ve şekil değıştirmelerdeki artmanın delik derinliği ve zamana bağlı olarak arttığı titanyum bindirme bağlantısında da görölmektedir.

Titanyum bindirme bağlantısında yer alan yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilme ve şekil değıştirmelerin dağılımları, alüminyum ve çelik bindirme bağlantısındakine benzer şekilde oluşmuştur.

Her üç bindirme bağlantısı incelendiğinde, Heat2d dosyasından alınan sıcaklık değerlerinin gerilme ve şekil değıştirme dağılımlarını etkileyen temel etken olduğu görölmektedir. Bunun yanında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri ikinci önemli etken olarak görölmektedir.

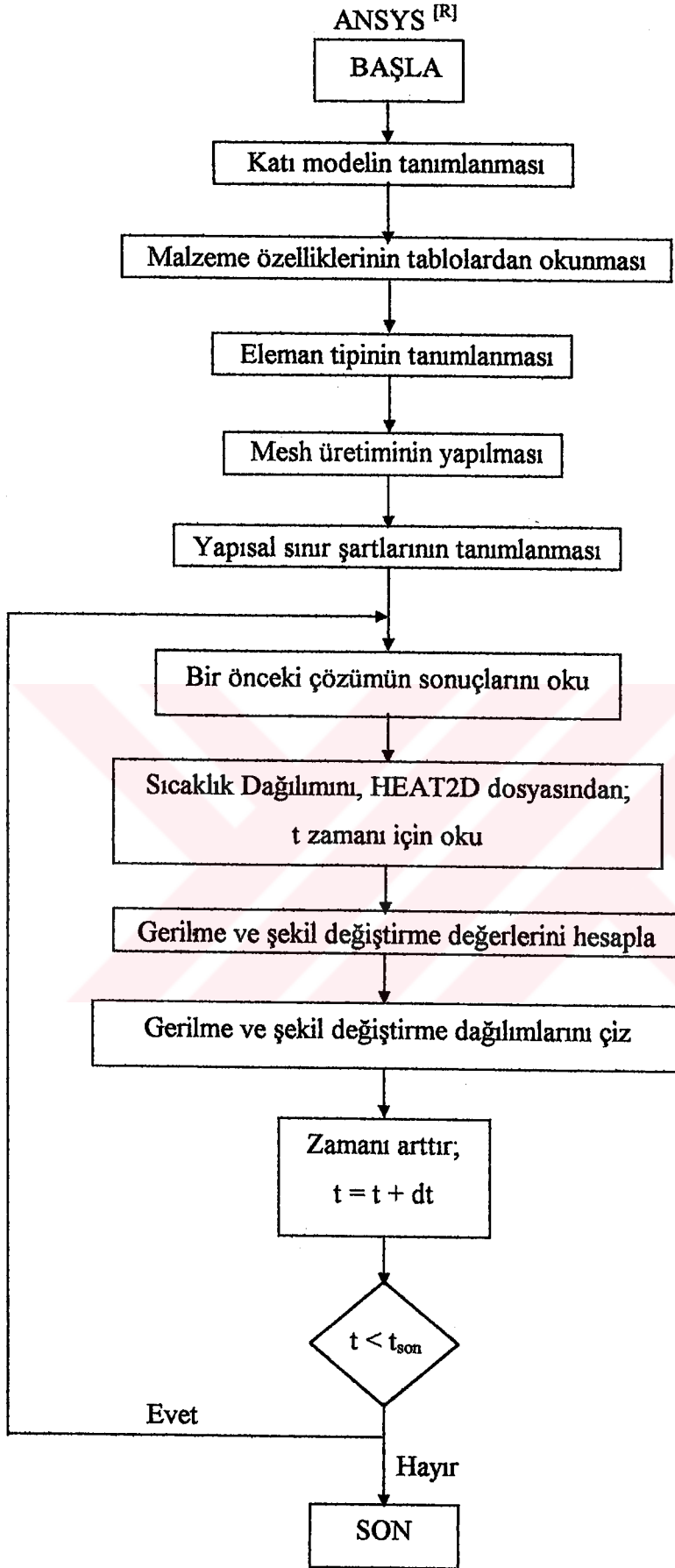
Gerilme ve şekil değıştirme değerlerinin en yüksek olduğu bölge delik civarıdır yani sıcaklığın en fazla olduğu kısımdır. En yüksek değerlere kaynak işleminin sonunda ulaşılmaktadır.

Analizler neticesinde alüminyum bağlantıda 66.6 MPa olan von Mises gerilme değeri, çelik bağlantıda 154 MPa ve titanyum bağlantıda 486 MPa değerine ulaşmıştır bir başka deyişle en yüksek gerilme titanyum bağlantısında, en düşük gerilme alüminyum bağlantısında meydana gelmektedir. Her üç metalin, poison oranlarına bakıldığında (Çizelge 5.3), titanyumun en yüksek değere (0.34), çeliğin daha küçük değere (0.29) ve alüminyumun en küçük değere (0.22) sahip olduğunu görmek mümkündür.

Von Mises toplam şekil değıştirme miktarı, alüminyum bağlantısında 0.0778, çelik bağlantısında 0.1040 ve titanyum bağlantısında 0.0617 değerindedir. En yüksek von Mises toplam şekil değıştirme çelik bindirme bağlantısında meydana gelirken en düşük toplam şekil değıştirme değeri titanyum bağlantısında olmaktadır.

Von Mises elastik şekil değıştirme değerinin, her üç bindirme bağlantısında 0.0060 civarında değer aldığı görölmektedir.

Eşdeğer plastik şekil değıştirme değerleri, alüminyum bağlantısında 0.0798 çelik bağlantısında 0.1050 ve titanyum bağlantısında 0.0446'dır. En büyük plastik şekil

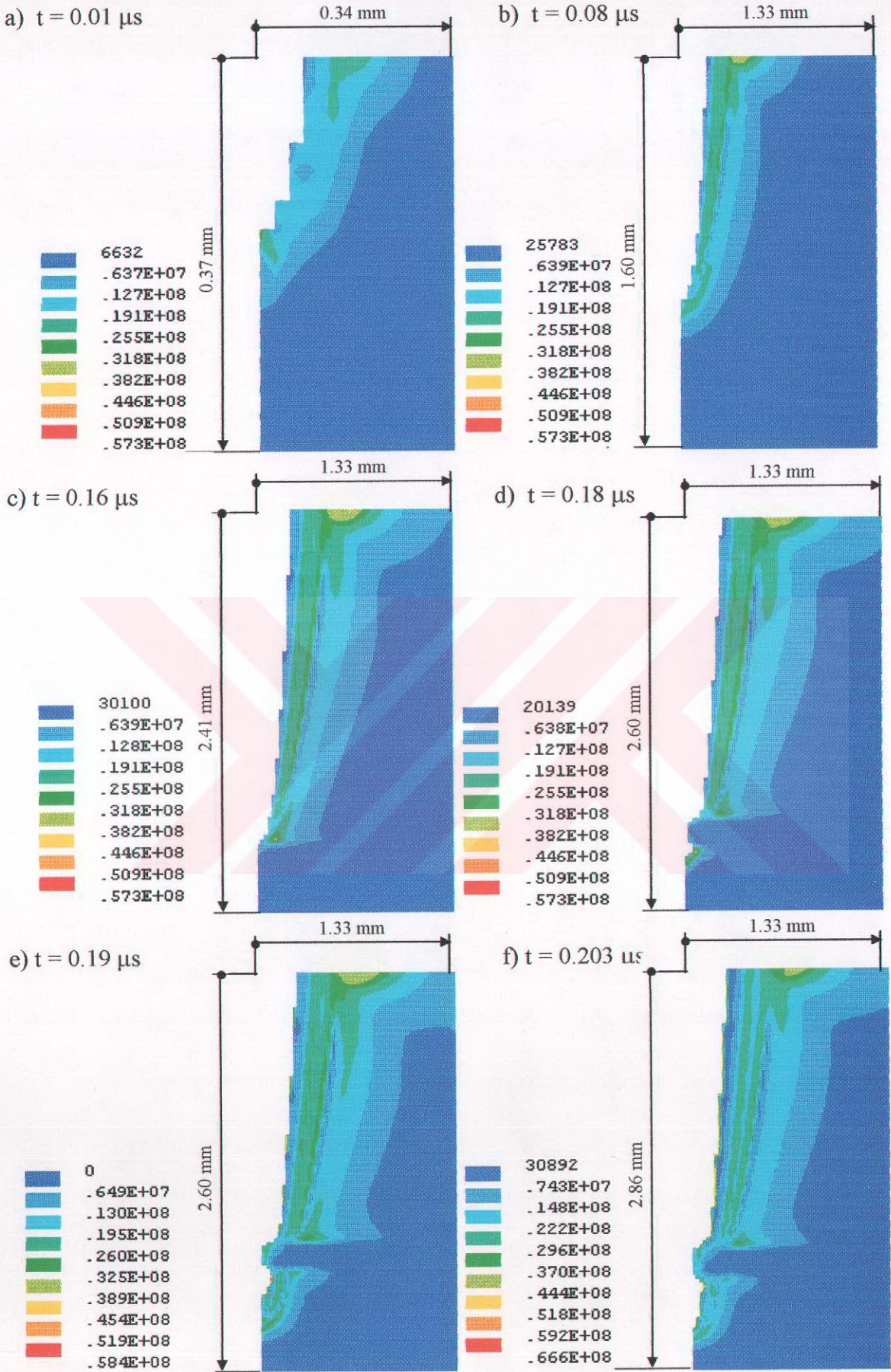


Şekil 5.14 ANSYS [R] programına ait akış şeması

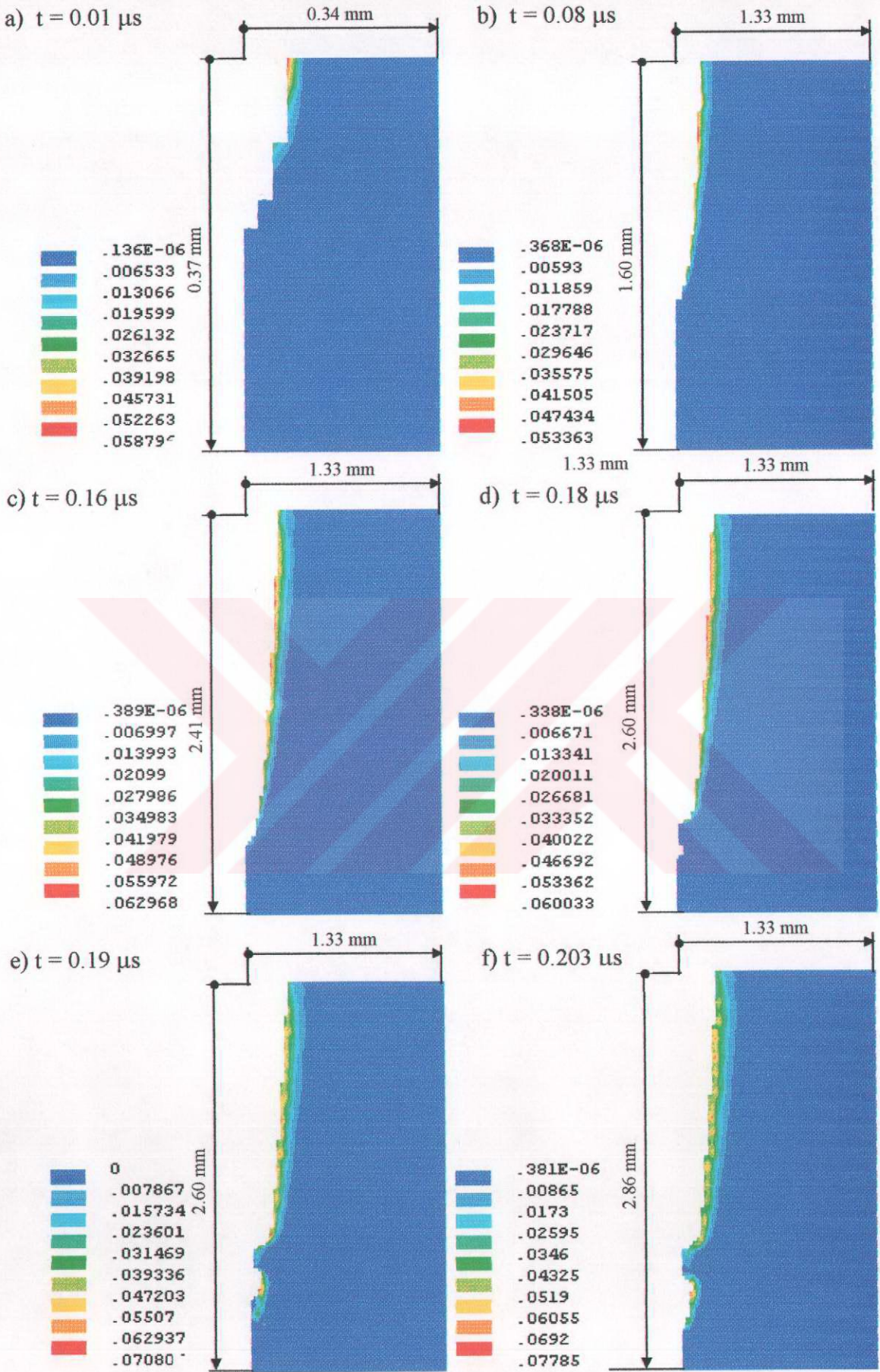
değiştirme elik bağlantısında meydana gelirken, en küçük plastik Şekil değiştirme titanyum bağlantısında oluşmuştur.

Her  bindirme bağlantısında aynı tür yapıştırıcının kullanılması yani aynı mekanik özelliklerin etkili olması nedeniyle, yapıştırıcı tabakalarında hesaplanan gerilme ve Şekil değiştirme değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur.

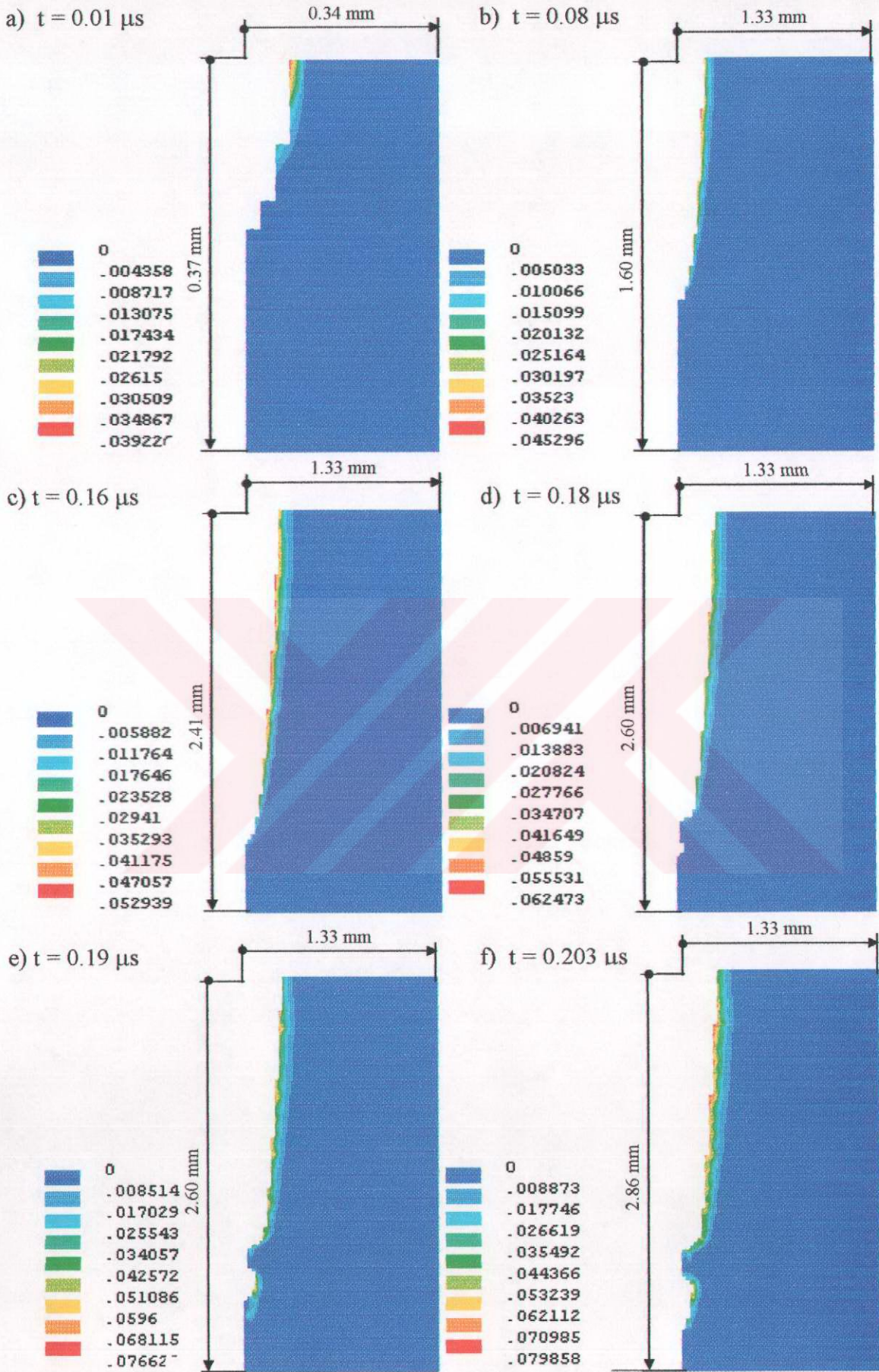




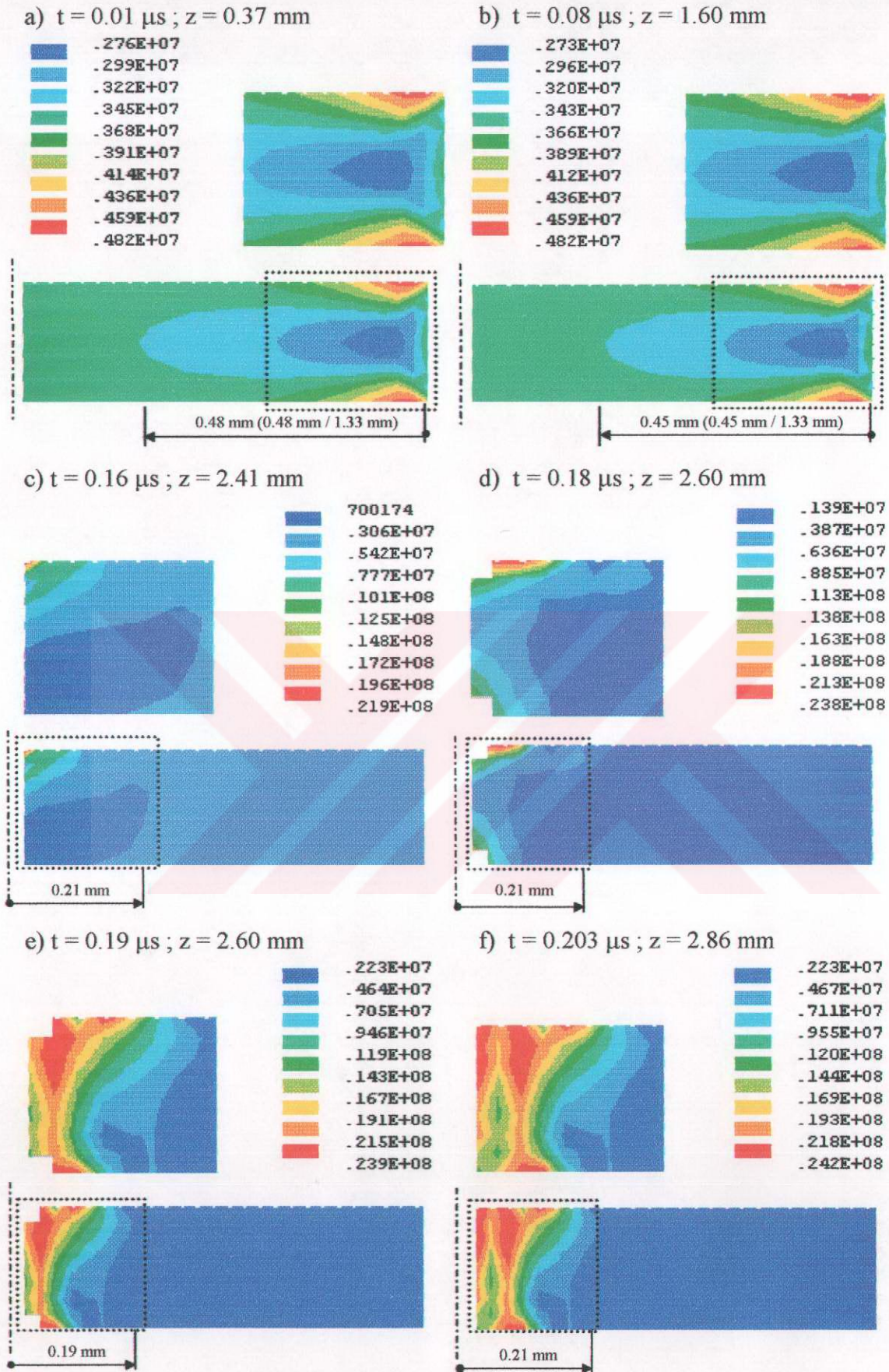
Şekil 5.15 Alüminyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa)



Şekil 5.16 Alüminyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları (m/m)

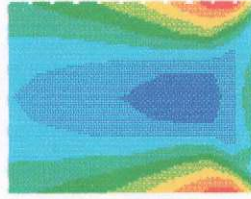


Şekil 5.17 Alüminyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları (m/m)

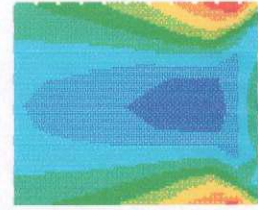
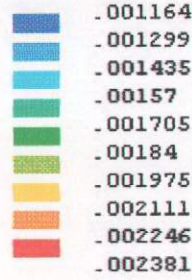


Şekil 5.18 Alüminyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa)

a) $t = 0.01 \mu s$; $z = 0.37 \text{ mm}$



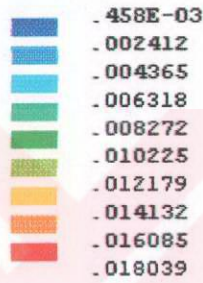
b) $t = 0.08 \mu s$; $z = 1.60 \text{ mm}$



0.59 mm (0.59 mm / 1.33 mm)

0.56 mm (0.56 mm / 1.33 mm)

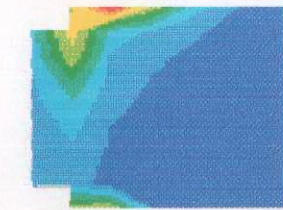
c) $t = 0.16 \mu s$; $z = 2.41 \text{ mm}$



0.10 mm

0.13 mm

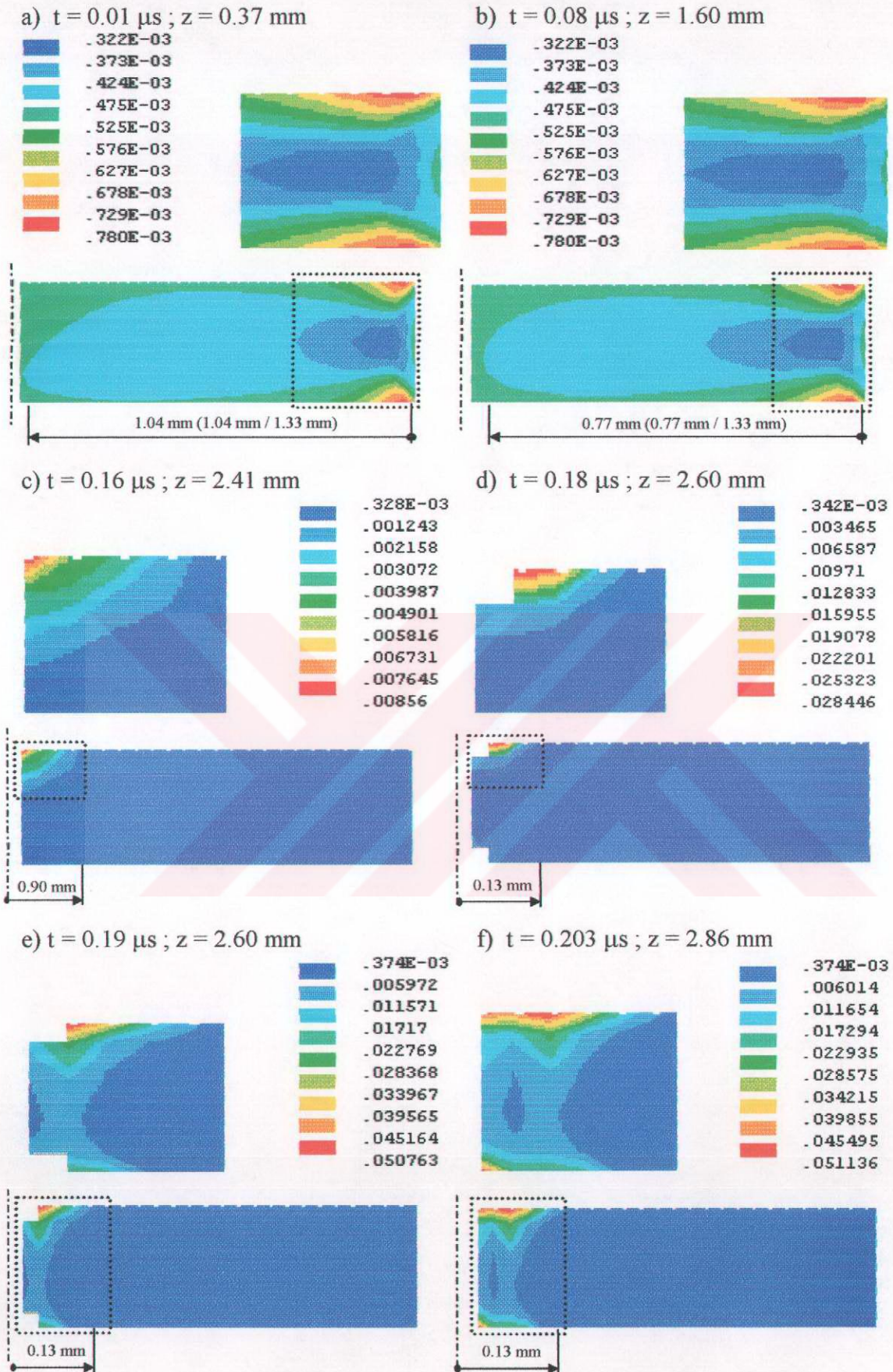
e) $t = 0.19 \mu s$; $z = 2.60 \text{ mm}$



0.13 mm

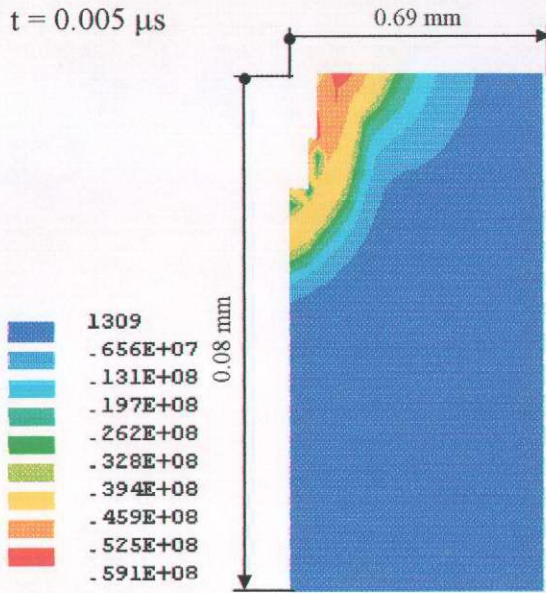
0.16 mm

Şekil 5.19 Alüminyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları (m/m)

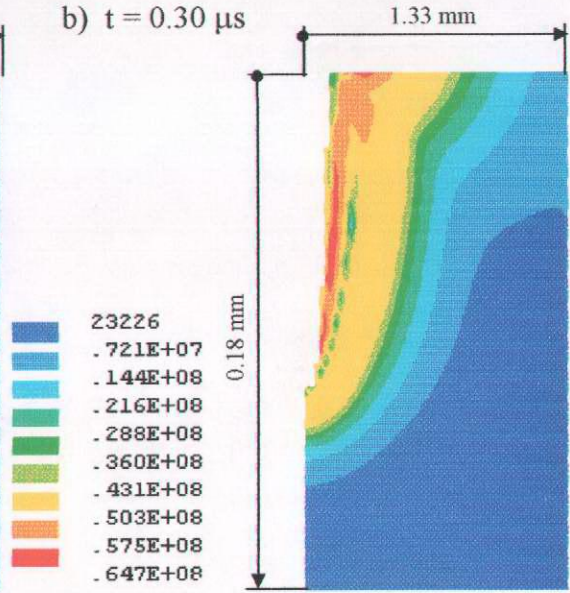


Şekil 5.20 Alüminyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları (m/m)

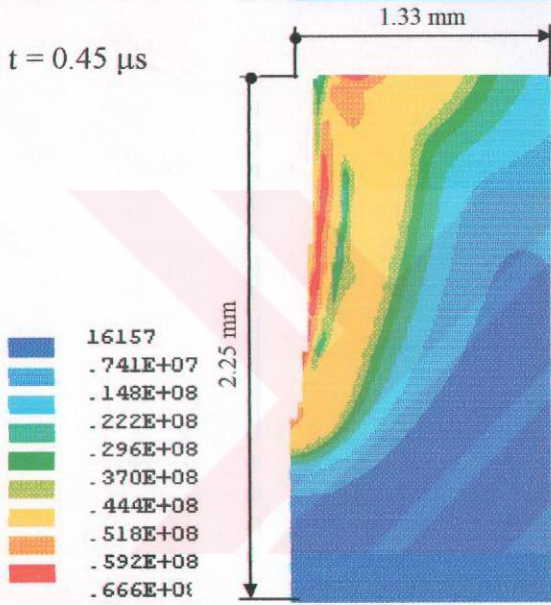
a) $t = 0.005 \mu s$



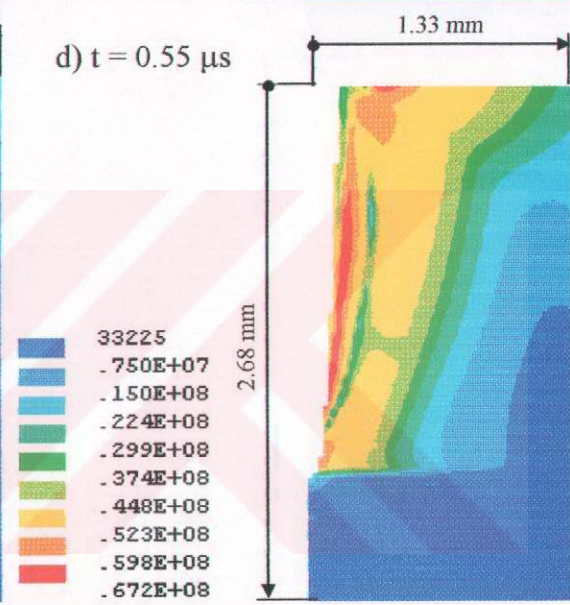
b) $t = 0.30 \mu s$



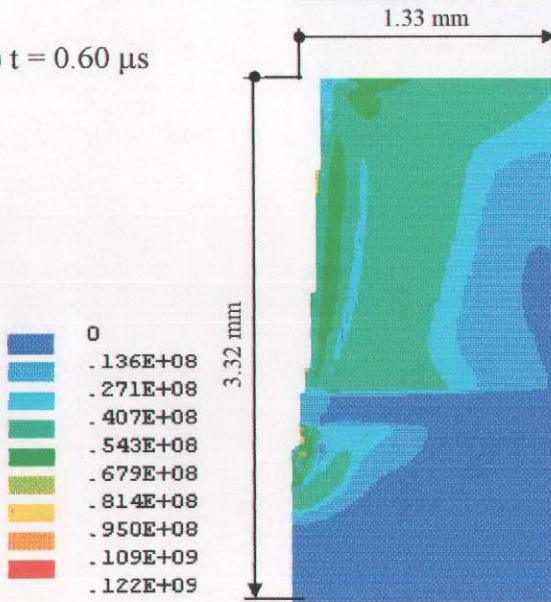
c) $t = 0.45 \mu s$



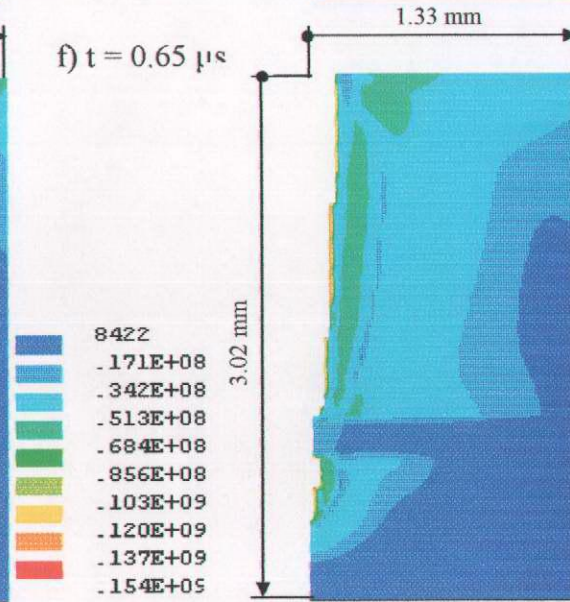
d) $t = 0.55 \mu s$



e) $t = 0.60 \mu s$

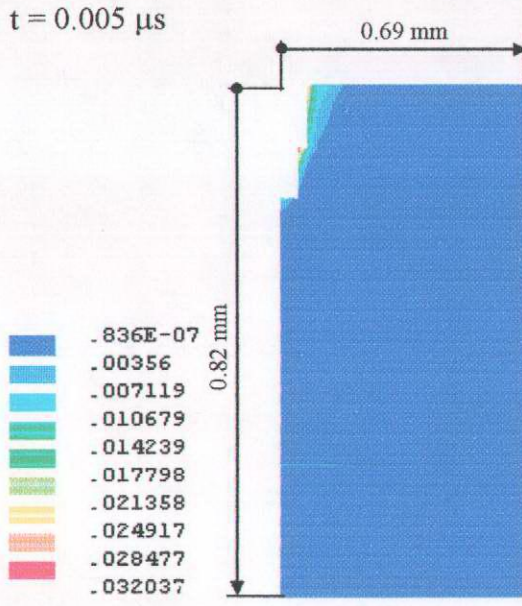


f) $t = 0.65 \mu s$

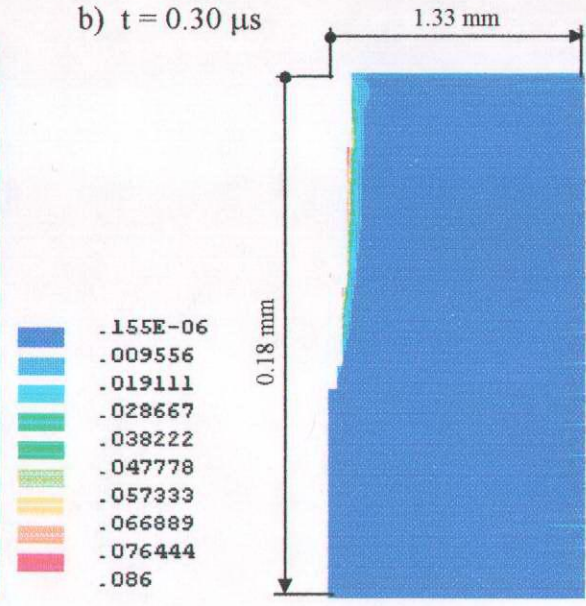


Şekil 5.21 Çelik bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa)

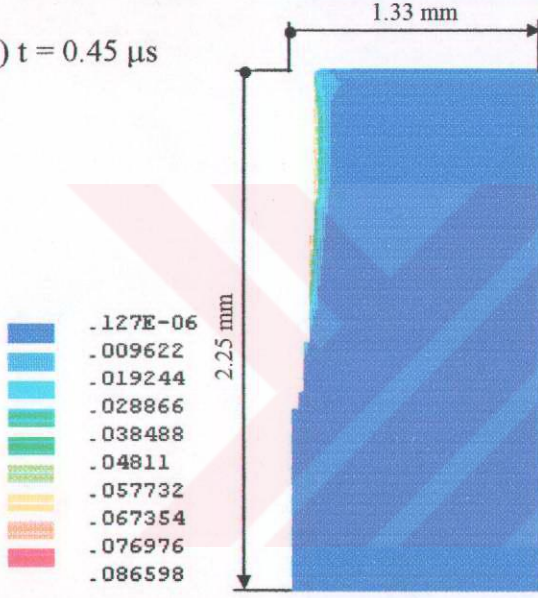
a) $t = 0.005 \mu s$



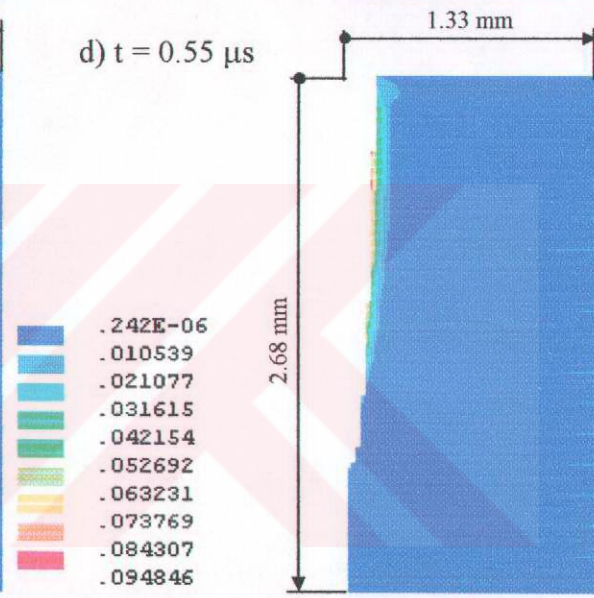
b) $t = 0.30 \mu s$



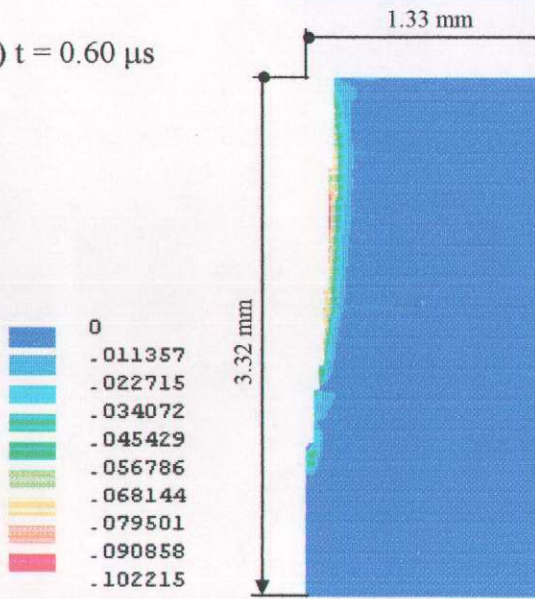
c) $t = 0.45 \mu s$



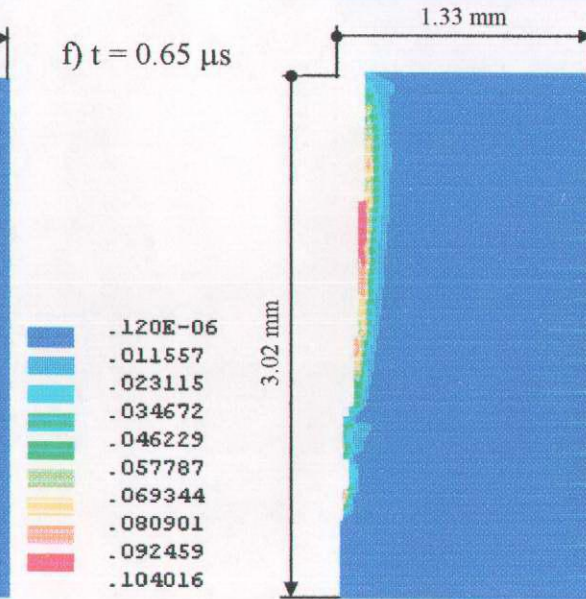
d) $t = 0.55 \mu s$



e) $t = 0.60 \mu s$

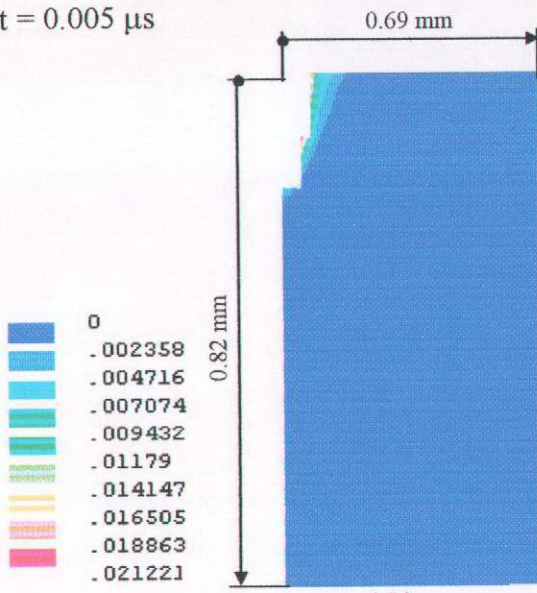


f) $t = 0.65 \mu s$

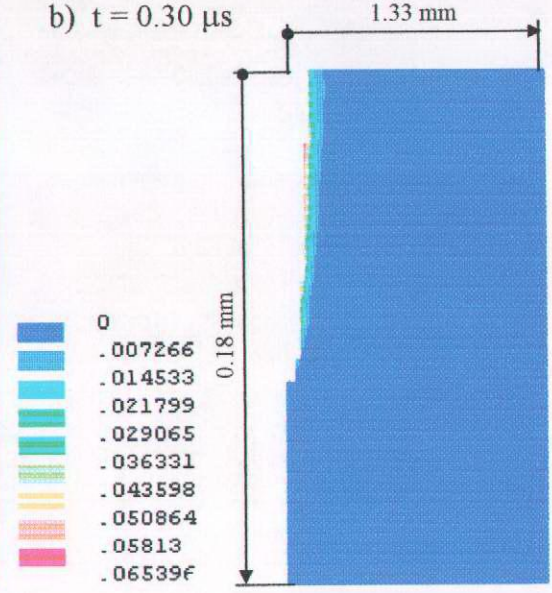


Şekil 5.22 Çelik bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları (m/m)

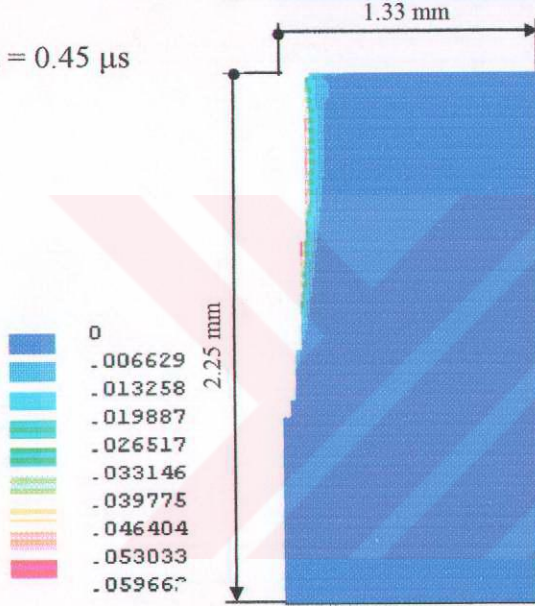
a) $t = 0.005 \mu s$



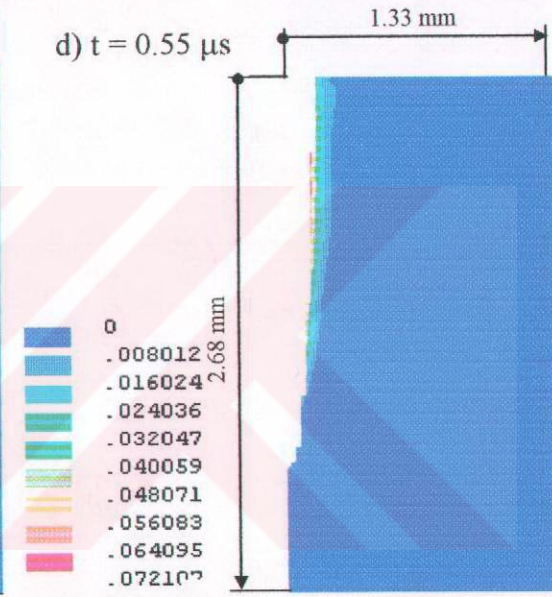
b) $t = 0.30 \mu s$



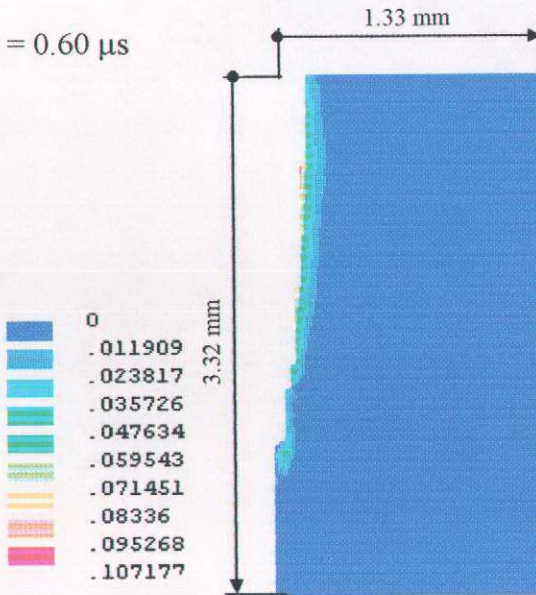
c) $t = 0.45 \mu s$



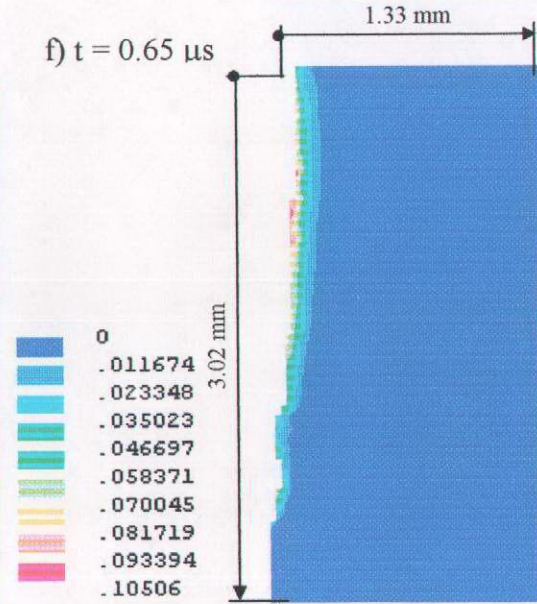
d) $t = 0.55 \mu s$



e) $t = 0.60 \mu s$



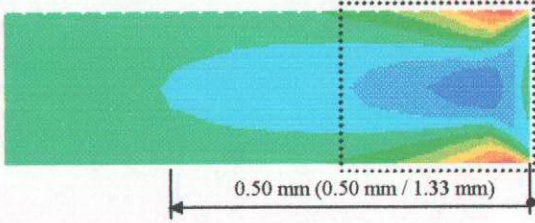
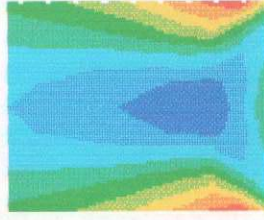
f) $t = 0.65 \mu s$



Şekil 5.23 Çelik bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları (m/m)

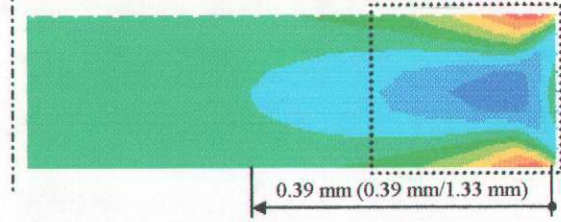
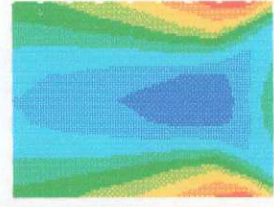
a) $t = 0.005 \mu\text{s}$; $z = 0.08 \text{ mm}$

.349E+07
.378E+07
.408E+07
.437E+07
.466E+07
.496E+07
.525E+07
.554E+07
.584E+07
.613E+07



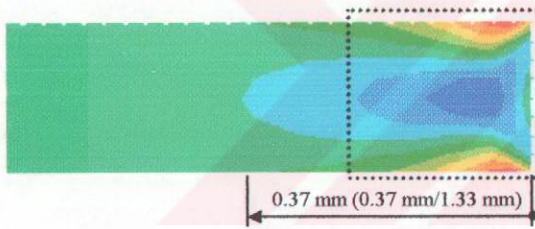
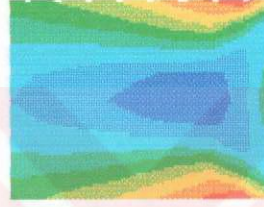
b) $t = 0.30 \mu\text{s}$; $z = 0.18 \text{ mm}$

.339E+07
.369E+07
.400E+07
.430E+07
.460E+07
.491E+07
.521E+07
.552E+07
.582E+07
.612E+07



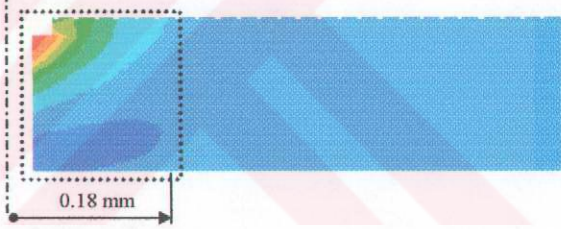
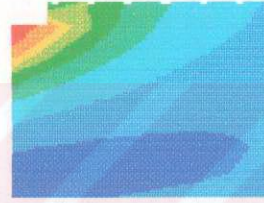
c) $t = 0.45 \mu\text{s}$; $z = 2.25 \text{ mm}$

.337E+07
.367E+07
.398E+07
.428E+07
.458E+07
.489E+07
.519E+07
.549E+07
.580E+07
.610E+07



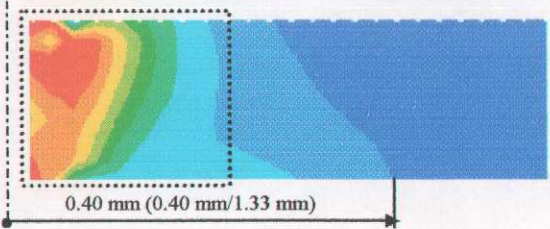
d) $t = 0.55 \mu\text{s}$; $z = 2.68 \text{ mm}$

.101E+07
.353E+07
.604E+07
.855E+07
.111E+08
.136E+08
.161E+08
.186E+08
.211E+08
.236E+08



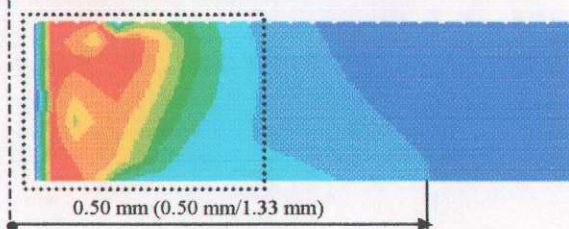
e) $t = 0.60 \mu\text{s}$; $z = 3.32 \text{ mm}$

.438E+07
.653E+07
.869E+07
.108E+08
.130E+08
.152E+08
.173E+08
.195E+08
.216E+08
.238E+08



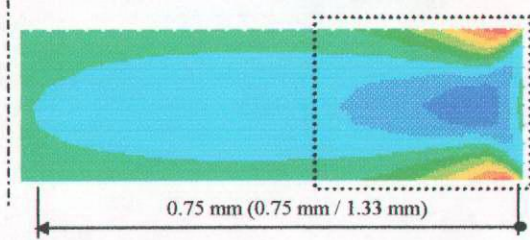
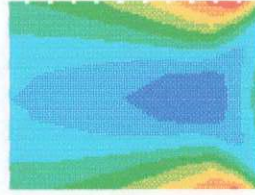
f) $t = 0.65 \mu\text{s}$; $z = 3.02 \text{ mm}$

.438E+07
.659E+07
.880E+07
.110E+08
.132E+08
.154E+08
.176E+08
.198E+08
.221E+08
.243E+08

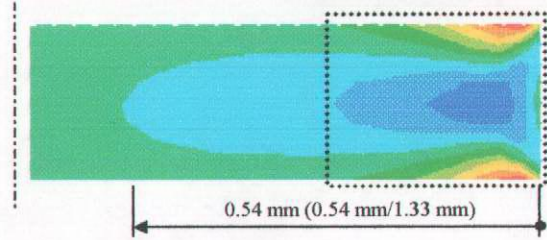
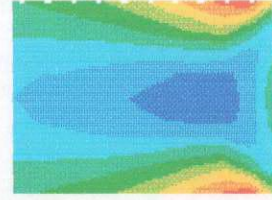
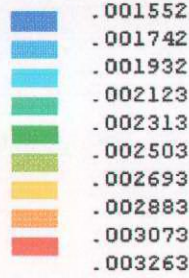


Şekil 5.24 Çelik bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa)

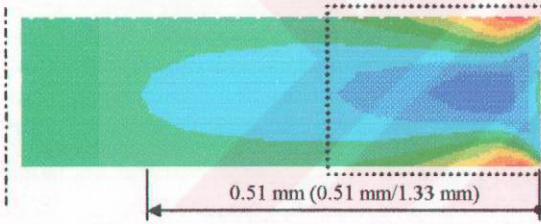
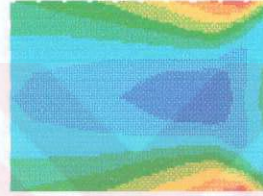
a) $t = 0.005 \mu\text{s}$; $z = 0.08 \text{ mm}$



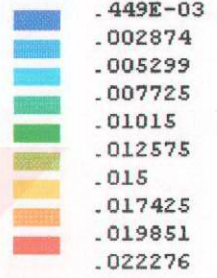
b) $t = 0.30 \mu\text{s}$; $z = 0.18 \text{ mm}$



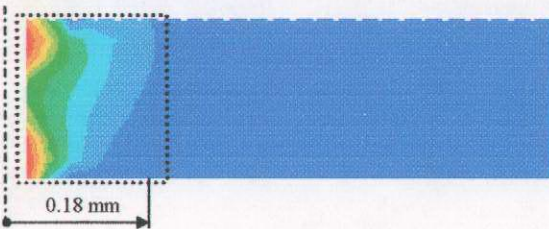
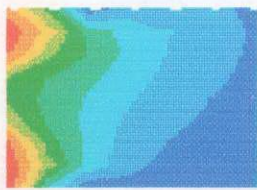
c) $t = 0.45 \mu\text{s}$; $z = 2.25 \text{ mm}$



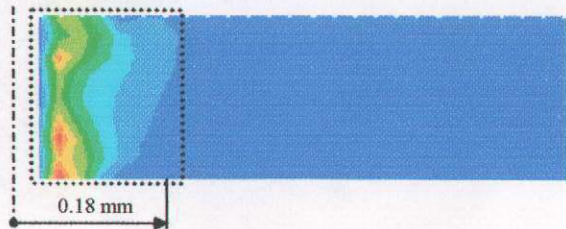
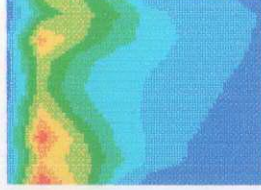
d) $t = 0.55 \mu\text{s}$; $z = 2.68 \text{ mm}$



e) $t = 0.60 \mu\text{s}$; $z = 3.32 \text{ mm}$

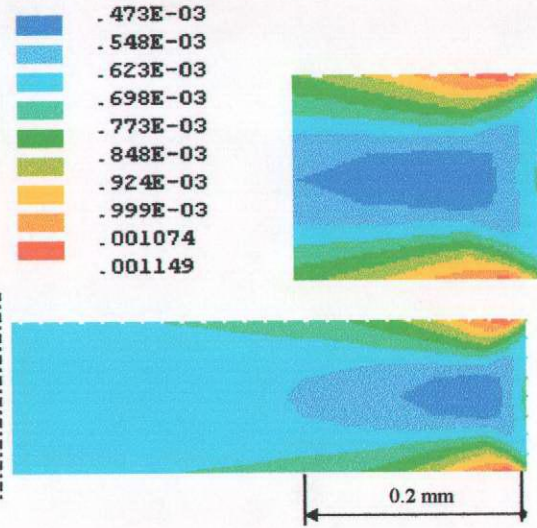


f) $t = 0.65 \mu\text{s}$; $z = 3.02 \text{ mm}$

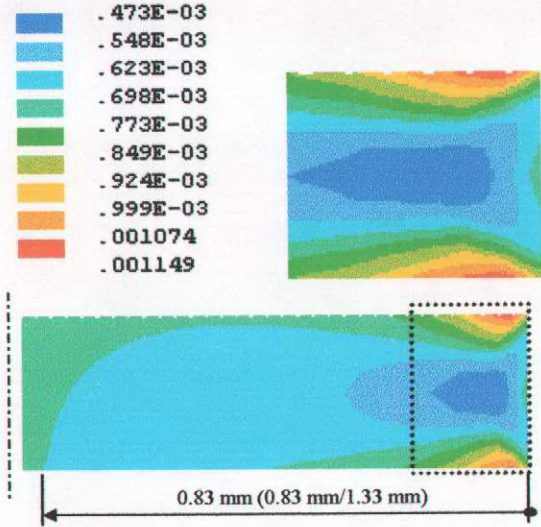


Şekil 5.25 Çelik bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları (m/m)

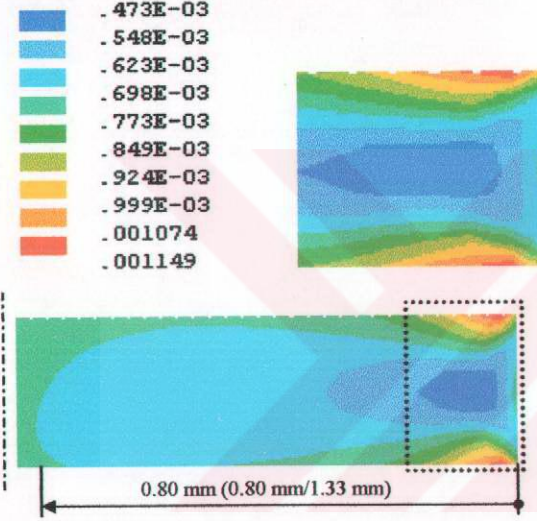
a) $t = 0.005 \mu s$; $z = 0.08 \text{ mm}$



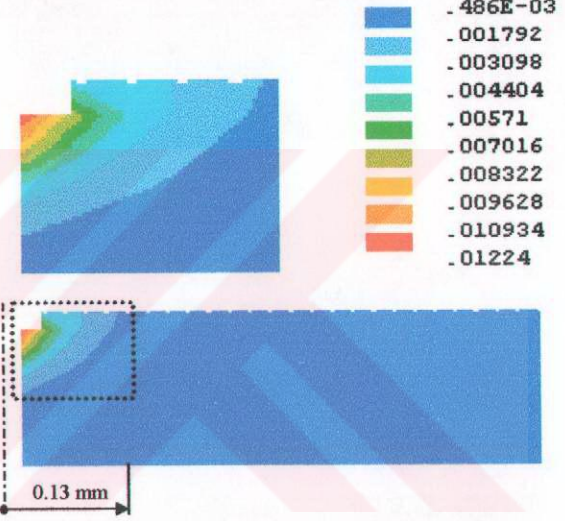
b) $t = 0.30 \mu s$; $z = 0.18 \text{ mm}$



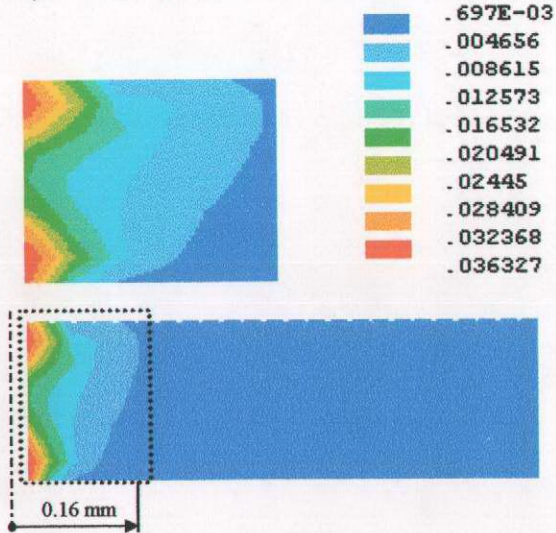
c) $t = 0.45 \mu s$; $z = 2.25 \text{ mm}$



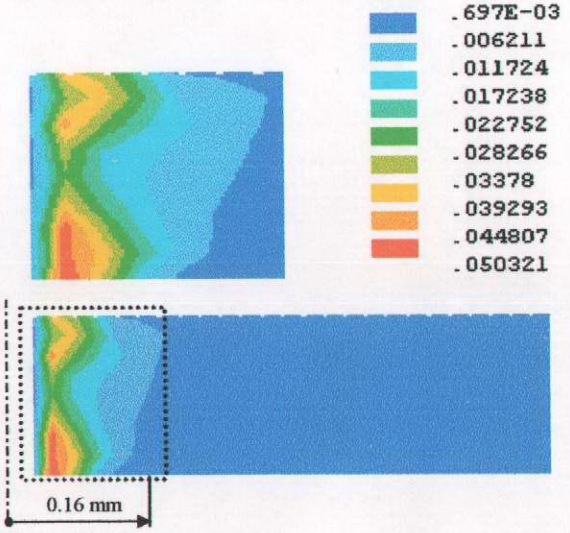
d) $t = 0.55 \mu s$; $z = 2.68 \text{ mm}$



e) $t = 0.60 \mu s$; $z = 3.32 \text{ mm}$

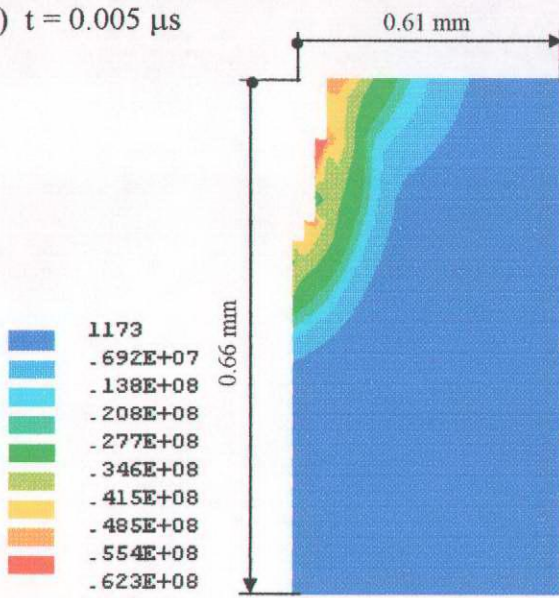


f) $t = 0.65 \mu s$; $z = 3.02 \text{ mm}$

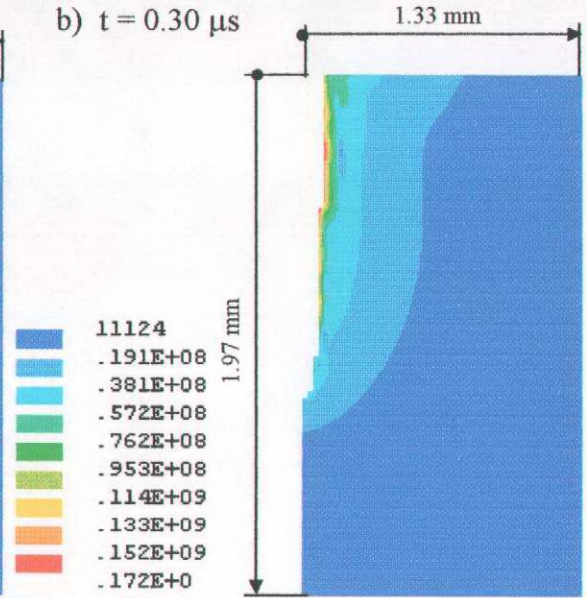


Şekil 5.26 Çelik bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları (m/m)

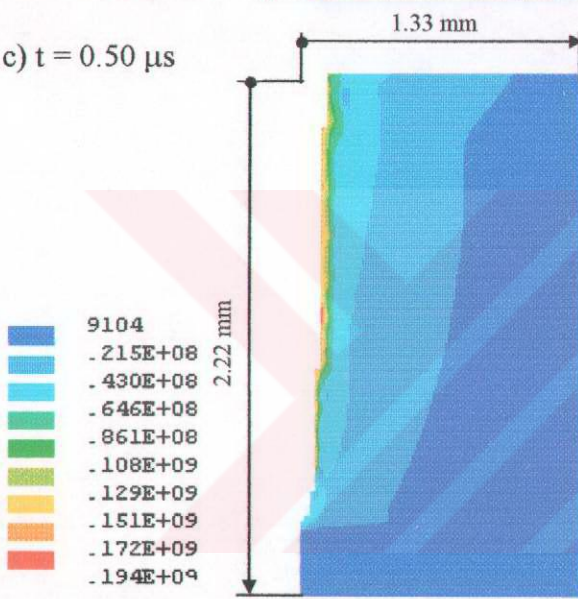
a) $t = 0.005 \mu s$



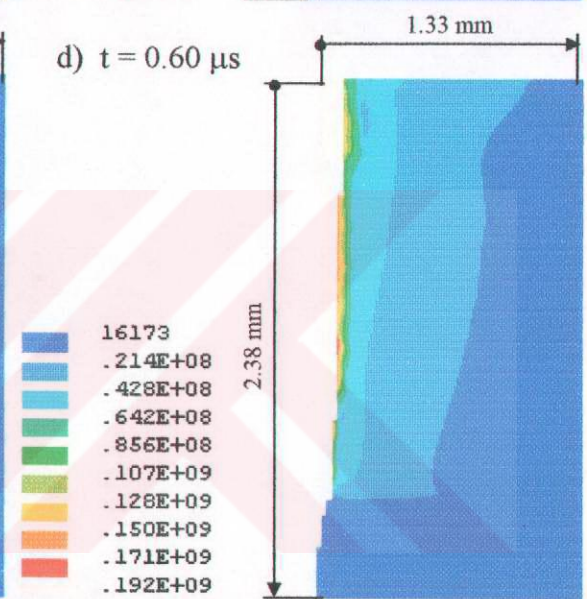
b) $t = 0.30 \mu s$



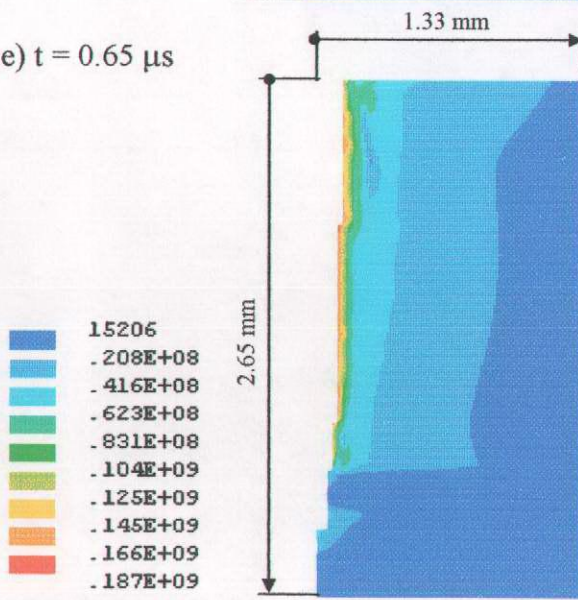
c) $t = 0.50 \mu s$



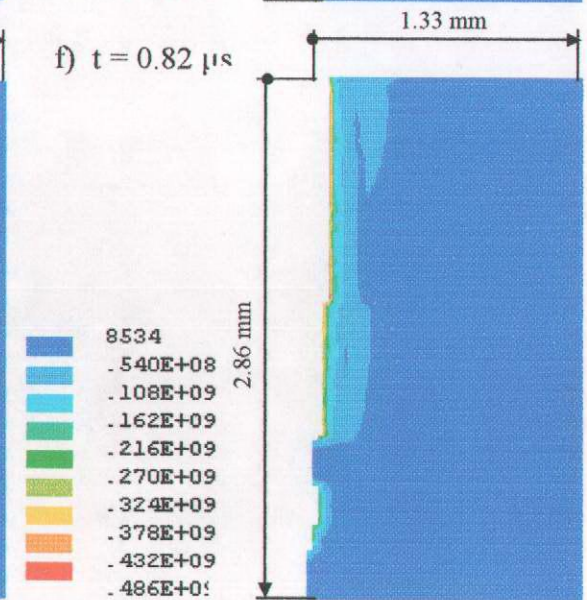
d) $t = 0.60 \mu s$



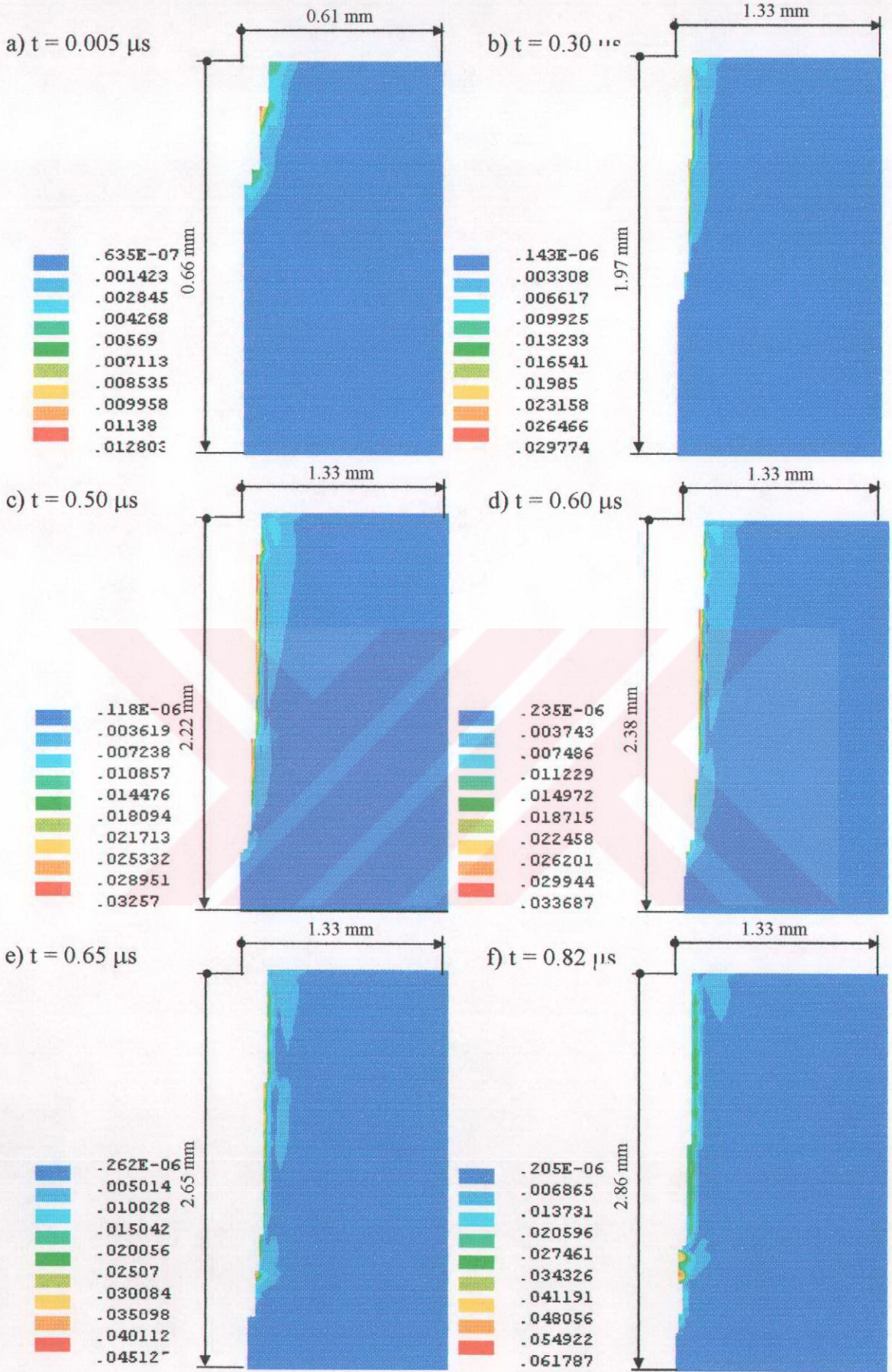
e) $t = 0.65 \mu s$



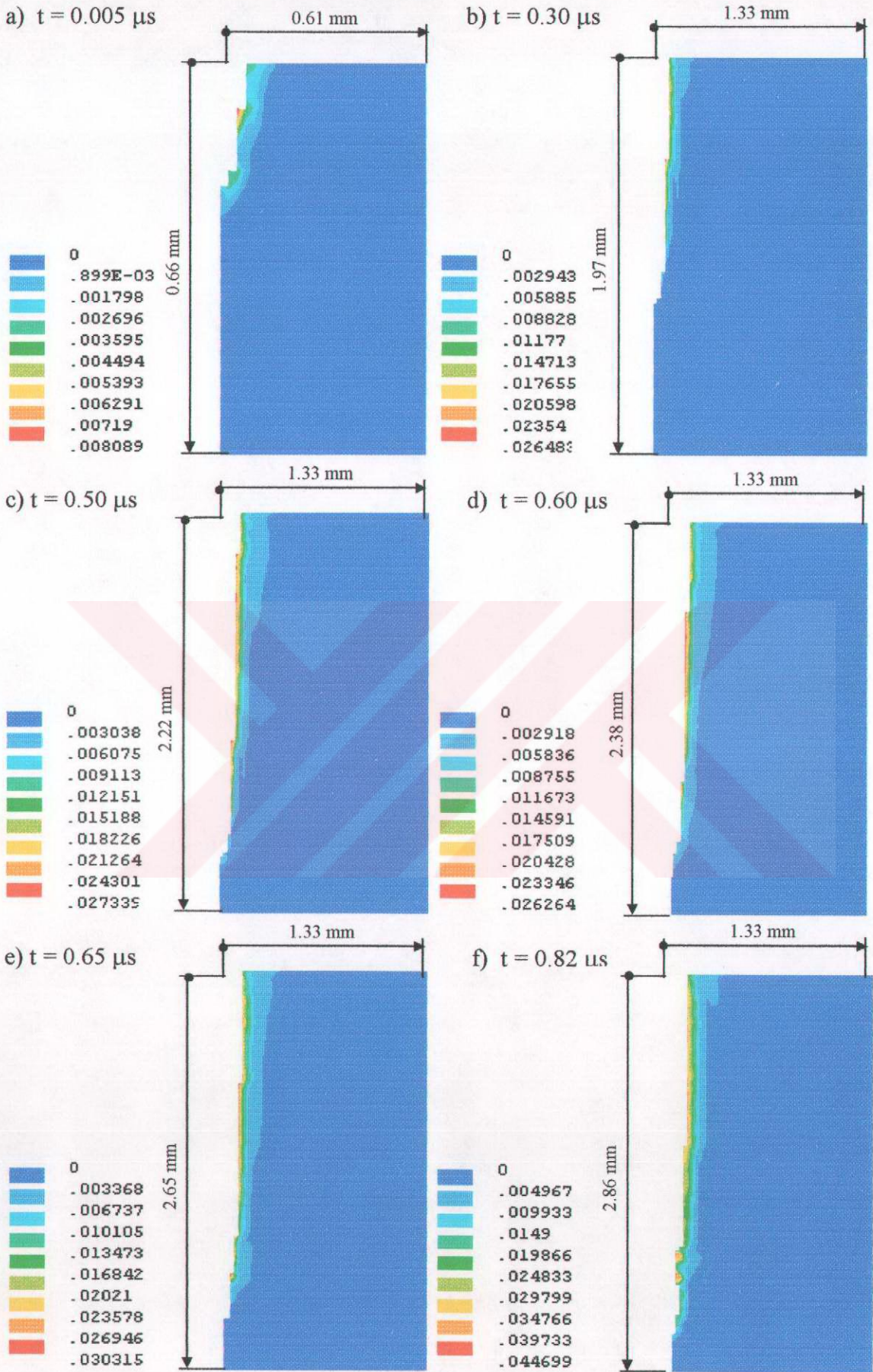
f) $t = 0.82 \mu s$



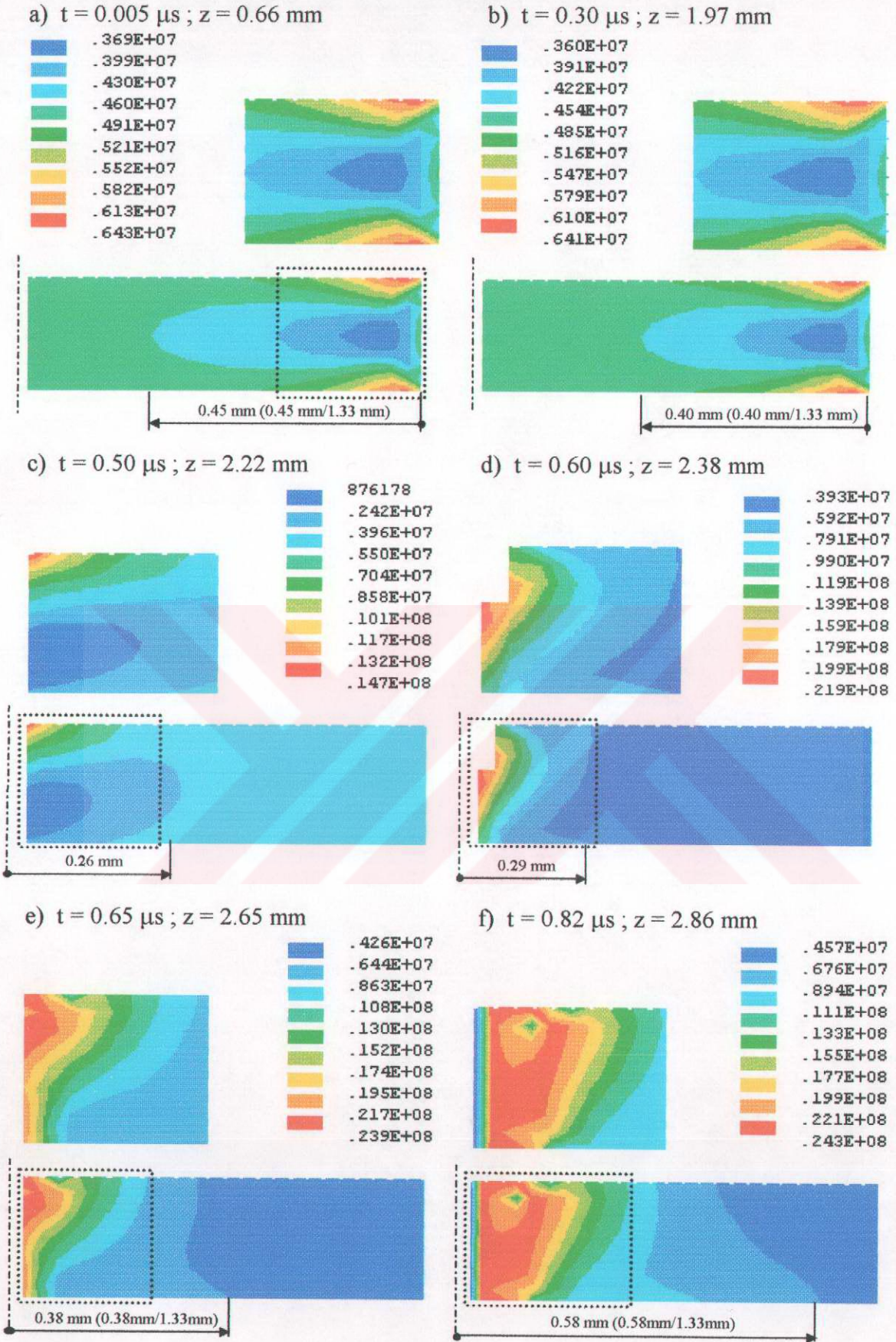
Şekil 5.27 Titanyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa)



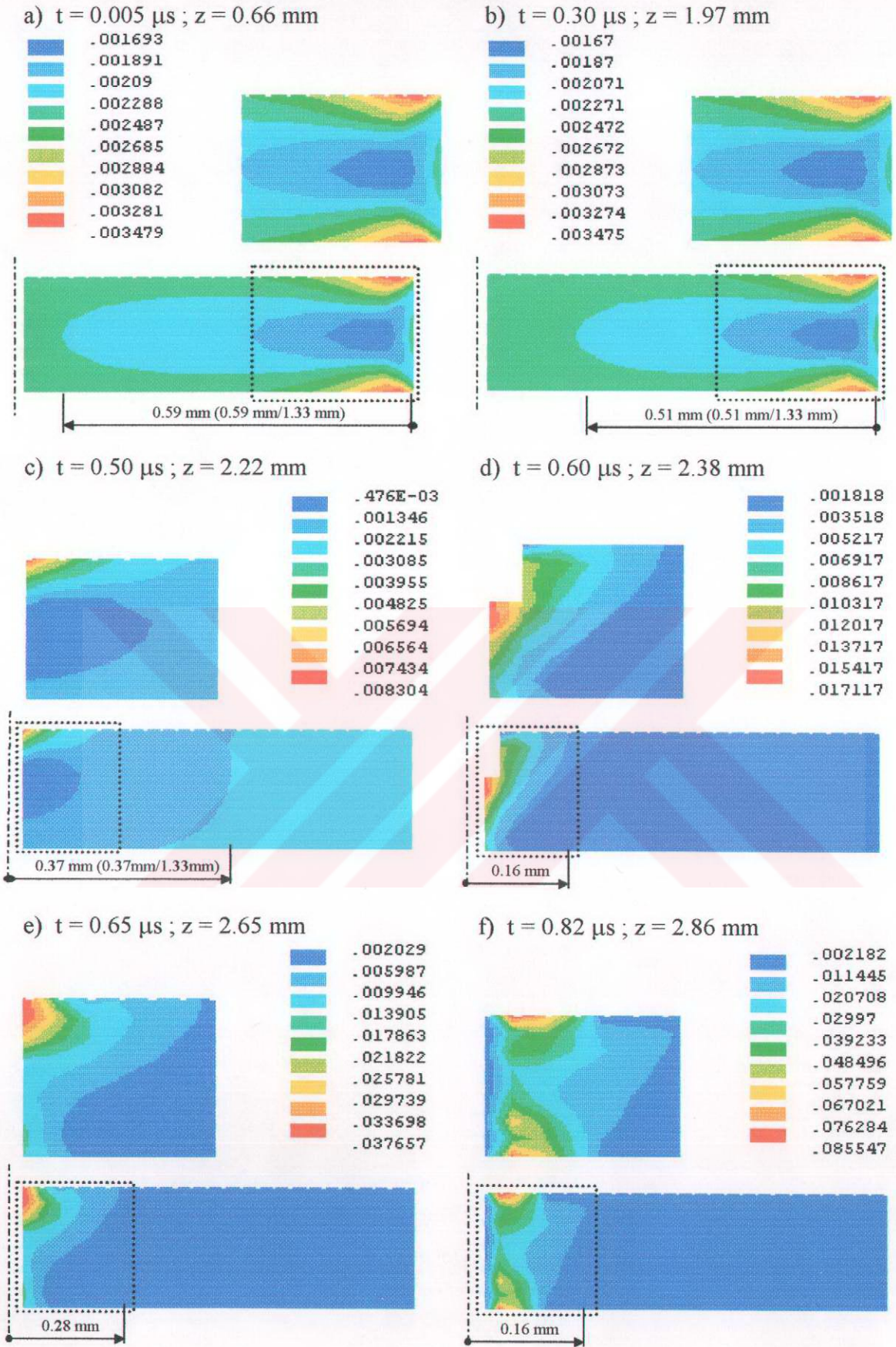
Şekil 5.28 Titanyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları (m/m)



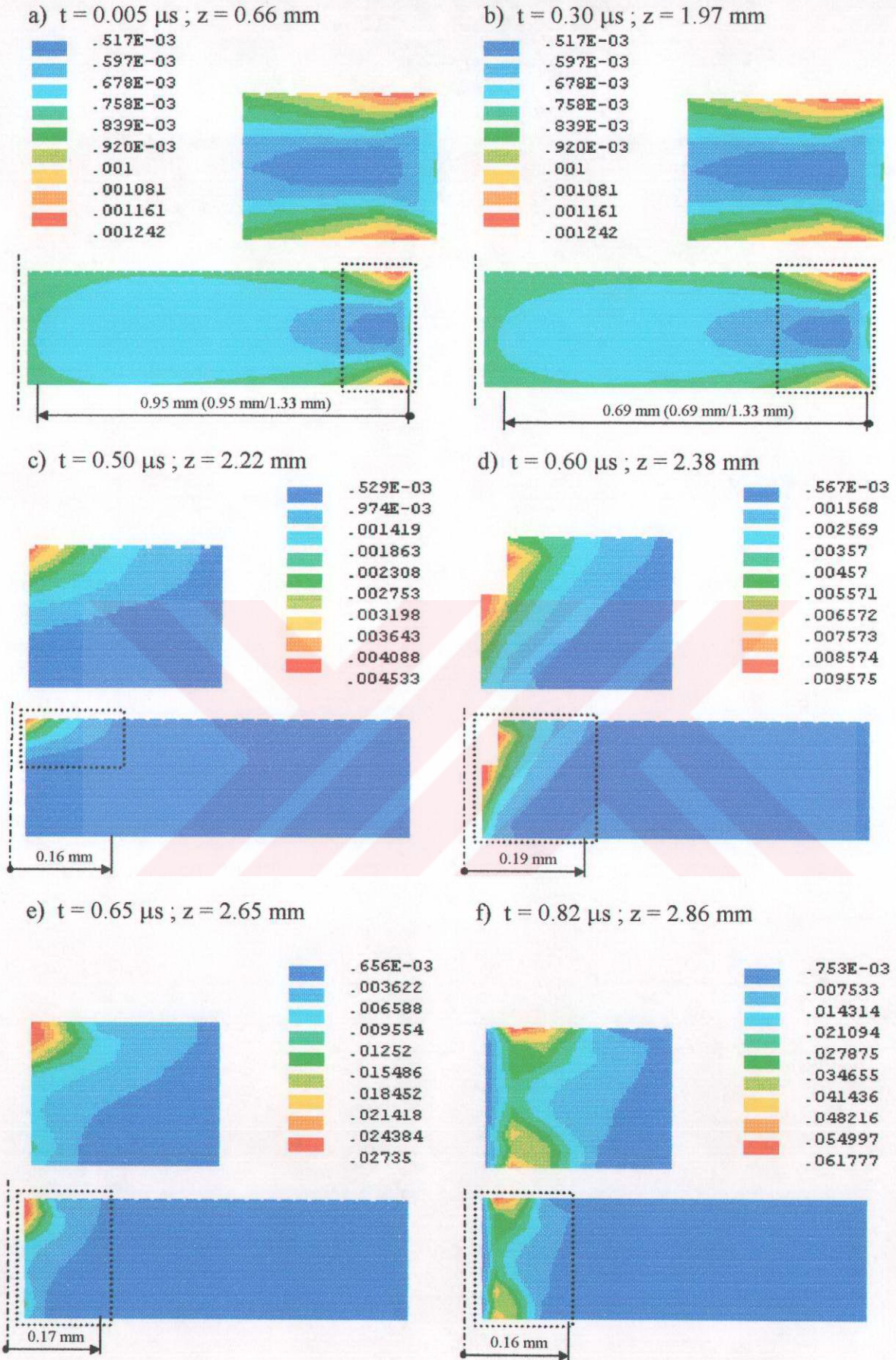
Şekil 5.29 Titanyum bindirme bağlantısında delik civarında farklı zamanlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları (m/m)



Şekil 5.30 Titanyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises gerilme dağılımları (tüm gerilme birimleri Pa)



Şekil 5.31 Titanyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında von Mises toplam şekil değiştirme dağılımları (m/m)



Şekil 5.32 Titanyum bindirme bağlantısında farklı zamanlarda yapıştırıcı tabakasında eşdeğer plastik şekil değiştirme dağılımları (m/m)

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Laserin endüstride kullanımının hızlı gelişimi ile birlikte kaynak alanında da kullanılması mümkün olmuştur. Bunun yanında, kimya endüstrisinde yapıştırıcıların mekanik özelliklerinde sağlanan güven verici gelişmeler, yapıştırıcıyla birleştirme tekniklerinin mühendisler tarafından kullanımını arttırmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirme, metallerin bir diğer metale veya geniş maksatlı malzemelere bağlanmasında oldukça büyük öneme sahiptir.

Sacların birleştirilmesinde tasarımcılar, çoğu zaman yapıştırma işlemi veya nokta kaynağı işlemini kullanmaktadırlar. Nokta kaynağında yük sadece kaynak noktalarına uygulanmaktadır. Yük dağılımının tüm yüzeye yayılması mümkün olmamaktadır. Yapıştırıcı bağlantılarında ise yük tüm yüzeye yayılmaktadır. Fakat yapıştırıcı bağlantılarında nokta kaynağında olduğu gibi metalik bir bağ olmaması nedeni ile, bağlantının taşıyabileceği yük miktarı daha düşüktür. Bu çalışmanın amacı; yapıştırma ve nokta kaynağı kombinasyonunun birlikte uygulanabilmesidir.

Bu çalışma ısı analizi ve elasto-plastik gerilme analizi olmak üzere iki aşamadan oluşmuştur; ilk aşamada, epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış çok ince metal plakaların, laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. Isı probleminin çözümü için silindirik koordinatlarda iki boyutlu ısı transferi modeli oluşturulmuş ve sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Analizlerde faz değişimleri dikkate alınmamıştır. Fortran dilinde geliştirilen program yardımı ile ısı analizi gerçekleştirilmiştir. Şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş, alüminyum, titanyum ve çelik bağlantılarının laser nokta kaynağı esnasında farklı zamanlarda meydana gelen sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Üç farklı malzemedenden oluşan her bir bağlantıda sıcaklık dağılımlarının benzerlik gösterdiği yani, Gaussian bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir.
2. Laser nokta kaynağı esnasında çok dar bir alanda plaka ve yapıştırıcı sıcaklıkları ani yüksek değerlere erişmektedir. Bu nedenle, malzemenin laserle doğrudan temasta olan kısmı kısa zamanda ergiyerek sıvı faza, hemen sonra buhar fazına geçtiği tespit edilmiştir.

3. Kullanılan metallerin özellikle ergime ve buharlaşma sıcaklıklarına bağlı olarak, istenilen kaynak derinliğine (2.6 mm) ulaşma süresinin değiştiği tespit edilmiştir. En düşük ısı değerlere sahip olan alüminyum'un en kısa zamanda kaynak işlemi tamamlanmakta olup, çelik ve titanyum onu takip etmektedir.

4. Üç farklı malzeme için tespit edilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde, radyal sıcaklık dağılımının çok dar bir alanda kaldığı görülmektedir. Derinlikte ise sıcaklık dağılımı hızlı gelişmekte ve yüksek değerler almaktadır. Bunun nedeni, laser ışının laser nokta yarıçapı kadar olan bölgeye doğrudan temas etmesidir. Isının etki ettiği bölge kısa sürede sıvı faza, takiben buhar fazına geçmektedir.

5. Epoksi yapıştırıcı kısmında ise sıcaklık dağılımında radyal ilerlemenin çok düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni epoksi yapıştırıcının ısı iletim katsayısının metallere göre çok düşük değerlerde olmasıdır. Epoksi yapıştırıcının ergime ve buharlaşma sıcaklığının çok düşük değerlerde olması nedeniyle, yapıştırıcı kalınlığı boyunca hızlı bir ilerleme olduğu görülmektedir. Ancak, metal buharlaşması ve konvektif ısı transferi dikkate alınır, yapıştırıcı çıkıntı bölgesinin yok olması beklenir.

6. Epoksi yapıştırıcı tabakasından sonra metal olan alt plakada sıcaklık dağılımı birinci plakadaki dağılıma benzer şekilde devam ettiği tespit edilmiştir.

7. Sıcaklık çok dar alanda yüksek değerlere aniden ulaşmakta ve kaynak kısa sürede sona ermektedir. Laser gücünün yüksekliği ile sıcaklığın kısa sürede çok yüksek değerlere ulaşması ve farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesi nedeniyle plakalarda ısıl gerilmeler ve şekil değiştirmeler meydana gelmektedir.

8. Kaynak prosesi tamamlandığı anda ergimiş metal soğuyacak yani katılaşma başlayacaktır ve metal yerçekimi nedeniyle deliğin dibine doğru hareket edecektir. Plakalarda meydana gelen plastik şekil değiştirmelerden dolayı artık gerilmeler oluşacaktır.

İkinci aşamada, laser nokta kaynağı yapılmış olan bu bindirme bağlantısının elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır. Lineer olmayan sonlu eleman metodu problemin çözümü için uygulanmıştır. Bütün analizler genel amaçlı sonlu eleman yazılımı olan ANSYS^[R] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, alüminyum, titanyum ve çeliğin deneysel gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) neticelerine dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Laser tarafından neden olunan delik etrafında ortaya çıkan elastik, plastik ısıl gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) dağılımları bulunmuştur. Çözüm için, ısıl analizinden elde edilen, her bir bağlantının sıcaklık dağılımları, ANSYS^[R] programına aktarılmıştır.

9. Gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarının sıcaklık değerleri ile orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Başka bir deyişle en yüksek gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarına kaynak işleminin sonunda ulaşılmaktadır.

10. Yapıştırıcı tabakasında en yüksek gerilme ve şekil değiştirmeler laserin etkidiği bölgede olmaktadır. Yapıştırıcının arka kısmı olarak adlandırdığımız bölgede ise soyulma gerilmeleri olduğu tespit edilmiştir.

11. Yapıştırıcı tabakasının belirli bir kısmında görülen plastik şekil değiştirmeler yanında, tabakanın tümünde elastik şekil değiştirmeler meydana geldiği tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- Akçakoyun, N., 1994. *Laser Metal Etkileşimi Esnasında Meydana Gelen Metal Plazması İçerisinde Laser Işımı Güç Şiddetindeki Zayıflamanın İncelenmesi*. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 163s.
- Akçam, İ.Ö., 1996. Termik Kesme Yöntemlerinin-Otojen Tekniği, Plasma, Laser-Karşılaştırması. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 37. Sayı No. 436. 22-28.
- Anık, S., 1983. *Kaynak Teknolojisi El Kitabı*. Ergör Matbaası. İstanbul.
- Anık, S., 1986. Yapıştırma ve Nokta Kaynağının Kombinasyonu. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 27. Sayı No. 316. 24-30.
- Apalak, M.K., 1987. *Laser Metal Etkileşimi Sırasında Meydana Gelen Isı Transferi Modelinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 122s.
- Apalak, M.K. and Davies R.,1993. Analysis and Design of Adhesively Bonded Corner Joints. *Int. J. Adhesion and Adhesives*. Cilt 13. No 4. 219-235.
- Apalak, M.K. and Davies R.,1993. Analysis and Design of Adhesively Bonded Corner Joints. *Int. J. Adhesion and Adhesives*. Cilt 14. No 3. 163-174.
- Apalak, M.K., Davies R. and Apalak, Z.G., 1995. Analysis and Design of Adhesively Bonded Double Containment Corner Joints. *Int. J. Adhesion Sci. Technol.* Cilt 9. No 2. 267-293.
- Apalak, M.K., Davies R. and Apalak, Z.G., 1996. Analysis and Design of Adhesively Bonded Modified Double Containment Corner Joints-II.. *J. Adhesion Science and Technol.* Cilt 10. No 10. 907-937.
- Apalak, M.K., 1998. Yapıştırıcı ile Metalleri Birleştirme Tekniği. *Makine Bülteni*. Vol. 7. No.11. 29-31.
- Apalak, M.K., Aldaş, K., Şen, F., 2001. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Metal Bindirme Bağlantılarının Laser Nokta Kaynağı Esnasında Meydana Gelen Isı Transferinin İncelenmesi. *13. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Selçuk Üniversitesi, Konya.

- Apalak, Z.G., 1995. *Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş T-Tipi Bağlantıların Sonlu Eleman Metodu Kullanılarak Analiz ve Tasarımı*. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 142s.
- Aykol, H.A., 1985. Laser Kaynağı ve Uygulamaları. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 26. Sayı No. 301. 3-10.
- Beesley, M.J., 1978. *Lasers and Their Applications*. Printed and Bound in Great Britain by Taylor and Francis Ltd. London
- Beljajew, A.I., Firsanowa, L.A., Rapoport, M.B., Çeviri:Sezer, M., 1974. *Alüminyum Metalurjisi*. TMMOB Makine Mühendisler Odası, Yayın No: 99, Ankara.
- Boyer, H. E., 1990. Atlas of Stress-Strain Curves , ASM International, USA (Metals Park, Ohio).
- Bozacı, A., Kosif, İ., Çolak, Ö.Ü., 1995. *Makine Elemanlarının Projelendirilmesi*. Seç Yayın Dağıtım. İstanbul.
- Carroll, L.D., Rothenflue, J.A., 1996. "Experimental Study of Cutting Thick Aluminum and Steel With a Chemical Oxygen-Iodine Laser Using an N₂ or O₂ Gas Assist". *Proceedings of the XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference*, U.K. (Edinburg)
- Cerit, A.M., 1996. *Makina Mühendisliği El Kitabı-Üretim ve Tasarım Cilt 2*. TMMOB Makine Mühendisleri Odası. Yayın No:170. Ankara
- Colangelo, V.J., Thornton, P.A., 1985. *Fundamentals of Engineering Materials*, USA (New Jersey).
- Cook, R.D., 1995. *Finite Element Modeling for Stress Analysis*, John Wiley & Sons, USA (New York).
- Çam, G., Yeni, Ç., Erim, S., Ventzke V. and Koçak, M., 1998. "Investigation on the Properties of Laser Welded Similar and Dissimilar Steel Joints". *Science and Technology of Welding and Joining-A Publication of the Inst. of Materials*, pp. 1-8
- Çam, G., Erim, S., Yeni, Ç. and Koçak, M., 1998. "Determination of Mechanical and Fracture Properties of Laser Welded Steel Joints". *Welding Journal Supplement, Welding Research Supplement*, pp. 235-247

- Dağlar, M., 1969. Laser Kaynağı. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 13. Sayı No. 150. 187-190.
- Engin, A., 1997. *Yapıştırıcılarla Birleştirilmiş Çift Bindirmeli Ankastre Bağlantıların Sonlu Eleman Metodu ile Geometrik Bakımdan Lineer ve Lineer Olmayan Analizi*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 130s.
- Gediktaş, M., 1972. Yapıştırma Bağlantıları. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 16. Sayı No. 178. 27-33.
- Genceli, O.F., 1976. Hız Ölçülmesinde Laser. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 20. Sayı No. 229. 65-67.
- Genceli, O.F., 1985. Laser'in Mühendislikte Uygulama Alanları. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 26. Sayı No. 308. 4-7.
- Hatch, J. E., 1988. *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, American Society for Metals, USA (Metals Park, Ohio).
- Hecht, J., 1986. *The Laser GuideBook*. McGraw-Hill Book Company. NewYork.
- Hultgren, R., Orr, R.L., Anderson, P.D., Kelley, K.K., 1963. *Selected Values Thermodynamic Properties of Metals and Alloys*, John Wiley & Sons, Inc. Copyright, USA
- İşıldak, Z.G., 1990. *Derin Etkili Laser Nokta Kaynağı Esnasında Ortaya Çıkan Isı Transferi Modelinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 79s.
- Jeng, J.Y, Mau, T.F., Leu, S.M., 2000. "Gap Inspection and Alignment Using a Vision Tecnique for Laser Butt Joint Welding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 16, Issue 3, pp.212-216
- Kahraman, N., 1987. *Laser'le İnce Metal ve Kabloların Kaynak İşlemi*. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 74s.
- Kakaç, S., 1998. *Örneklerle Isı Transferi*. Tıp-Teknik Yayıncılık. Ankara.
- Kakaç, S., 1998. *Isı Transferine Giriş-I, Isı İletimi*. Tıp-Teknik Yayıncılık. Ankara.
- Kalpakistan, S., *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. Addison Wesley Longman Inc.

- Kılık, R., 1987. Endüstriyel Yapıştırıcılar ve Avantajları, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. Cilt 3. Sayı No 1.
- Koç, Y., 1995. *Kinetik Teori Yaklaşımı ile Laser-Malzeme Etkileşimi Sırasında Malzemedeki Sıcaklık Dağılımının Analizi*. Doktora Tezi. Erciyes Üniversitesi. Kayseri. 139s.
- Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley&Sons. Singapore.
- Lee, H., Neville, K., 1957. *Epoxy Resins Their Applications and Technology*. McGraw-Hill Book Company. NewYork.
- Liu, A.T., 1976. *Linear Elastik and Elasto-Plastik Stress Analysis for Adhesive Lap Joints*, Ph. D. Thesis, USA (Urbana, Illinois)
- Luxon, J.T., Parker, D.E., Plotkowski, P.D., 1987. *Lasers in Manufacturing*. IFS (Publications) Ltd. Springer-Verlag.
- Obert, E.F., 1968. *Boundary Value Problems of Heat Conduction*. International Textbook Company
- Ohuchida, Y., 2000. "Mechanism of Dynamic Recrystallization in High Purity Aluminum". www.
- Owen, D.R.J., Hinton, E., 1980. *Finite Elements in Plasticity Theory and Practice*, Pineridge Press Limited, U.K. (Swansea).
- Patankar, S.V., 1977. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill Book Company. New York.
- Rao, S.S., 1989. *The Finite Element Method in Engineering*. Second Edition.
- Rende, H., 1996. *Makine Elemanları Cilt 1*. Seç Yayın Dağıtım. İstanbul
- Schulz, W., Becker, D., Franke, J., Kemmerling, R., and Hergizer, G., 1993. "Heat Conduction Losses in Laser Cutting of Metals". *J. Phys. D: Appl. Phys.* 26. No: 9, pp.1357-1363
- Smithells, C.J., Brandes E. A., 1976. *Metals Reference Book*. Printed and Bound by R.J. Axford Ltd. Industrial Estate. Chichester.
- Tekin, E., 1992. *Mühendisler İçin Çelik Seçimi*, TMMOB Makine Mühendisler Odası, Yayın No: 119, Ankara.

- Topçu, M., Taşgetiren, S., 1998. *Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu*, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları, Yayın No: 007, Denizli.
- Touloukian, Y.S., 1967. *Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials*, Macmillan, USA (New York).
- Tzeng, Y.F., 2000. "Process Characterisation of Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 16, Issue 1, pp.10-18
- Uzun, İ., 1998. *Mühendislikte Nümerik Çözüm Yöntemleri, Nümerik Analiz*. Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş. İstanbul.
- Üyepazarcı, E., 1970. Laser ve Endüstriyel Tatbikatı. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 13. Sayı No. 154. 368-374.
- Üyepazarcı, E., 1970. Laser ve Endüstriyel Tatbikatı. *Mühendis ve Makine*. Cilt No. 13. Sayı No. 155. 411-416.
- Yaşar, H., MELEK, S., 2000. *Scientific and Technological Properties of Elements*, Pelin Ofset, Ankara.
- Yeni, Ç., Erim, S., Çam, G. and Koçak, M., 1996. "Microstructural Features and Fracture Behaviour of Laser Welded Similar and Dissimilar Steel Joints". *International Welding Technology'96 Symposium*, pp. 235-247
- Yılbaş, B.S., 1985. İleri Takım Tezgahlarında Enerji Tasarrufu. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. Cilt 1. Sayı 1. 63-70.
- Yılbaş, B.S., 1986. Heating of Metals at Free Surface by Laser Irradiation-an Electron Kinetic Theory Approach. *Int. J. Engng. Sci.* Vol. 24. No. 8. 1325-1334.
- Yılbaş, B.S. and Apalak, M.K., 1987. "The Basic Concepts of Heat Transfer Mechanism During Laser Drilling of Metals", *Egyptian J. of Physics*, 18(2), 133-156,
- Yılbaş, B.S., Davies, R., Görür A., Yılbaş, Z., Begh F., Akçakoyun N., and Kalkat M., Investigation Into Development of Liquid Layer and Formation of Surface Plasma During CO₂ Laser Cutting Process. 1992. *Journall of Engineering Manufacture*. Vol. 206. Part B. 287-298.
- Yılbaş, B.S. and Şahin A.Z., 1993. Heating Mechanism in Relation to the Laser Machining Process. *Pramana Journall of Physics*. Vol. 41. No. 5. 453-465.

- Yılbaş, B.S. and Sami, M., 1995. Laser Heating Mechanisms Including Evaporation Process-Semiclassical and Kinetik Theory Approaches. *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 34. Part 1. No. 12A. 6391-6400.
- Yılbaş, B.S., Yılbaş Z., Akçakoyun N., 1996. Investigation Into Absorption of the Incident Laser Beam During Nd: YAG Laser Processing of Metals. *Elsevier Advanced Technology Optics&Laser Technology.* Vol. 28. No. 7. 503-511.
- Yılbaş, B.S. and Sami M., 1998. Three-Dimensional Laser Heating Including Evaporation A Kinetic Theory Approach. *Int. J. Heat Transfer.* Vol. 41. No. 13. 1969-1981
- Yılbaş, B.S. Sami, M. and Al-Farayedhi A., 1998. Closed-Form and Numerical Solutions to the Laser Heating Process. *Proc. Instn. Mec. Engrs.* Vol. 212. Part C. 141-151.
- Yılbaş, B.S. and Shuja Z.S., 2000. "One-Equation, Two-Equation and Kinetic Theory: Laser Pulse Heating". *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 39. No. 7A, pp.4018-4027
- Yongqing, Z., Lian, Z., and Ju, D., 1999. "High Temperature Deformation Mechanism of Ti-40 Burn Resistant Titanium Alloy As-annealing". www.
- Zienkiewicz O.C., 1971. *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill Publishing Company Limited, England.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ