

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TABAKALI METAL KOMPOZİTLERİN
DEFORMASYON VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLME DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Doğan ACAR

NİSAN 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TABAKALI METAL KOMPOZİTLERİN
DEFORMASYON VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLME DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Doğan ACAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 / 02 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 03 / 04 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ömer Necati CORA

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

Uzay-havacılık uygulamalarında hafifletme çalışmaları desteklenirken mukavemet özelliklerinden ödün verilmeksizin yenilikçi malzemeler üretilmesi hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda, tez çalışması kapsamında ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Ti-Al tabakalı metal kompozit plakaların içyapı, mekanik, şekillendirilme ve deformasyon davranışları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Nihayetinde “Tabakalı Metal Kompozitlerin Deformasyon ve Şekillendirilebilme Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır. Tezin, bu konularda çalışan veya çalışmak isteyen mühendis ve araştırmacıları, destekleyici ve yönlendirici bir kaynak olmasını dilerim.

Tez çalışmam süresince danışmanlığımı üstlenen, değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşmanın yanında inanılmaz sabrını eksik etmeyen danışman hocam Prof. Dr. Ömer Necati CORA’ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım süresince tecrübelerimi paylaşan tez izleme jüri üyeleri Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ ve Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK’e teşekkürü borç bilirim. Deneysel çalışmalarımındaki desteklerinden dolayı Prof. Dr. Mustafa GÜDEN (İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü) ve Prof. Dr. Serkan TOROS (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi) hocalarıma, Öğr. Gör. Dr. Dursun MERİÇ ve Arş. Gör. Habib Gökay KORKMAZ’a (Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi) çok teşekkür ederim. Tez savunmamdaki öneri ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Murat DİLMEÇ’e (Necmettin Erbakan Üniversitesi) ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca, desteklerini esirgemeyen ve her daim yanımda olan kıymetli aileme ve sevgili eşim Rabia’ya çok teşekkür ederim.

Doğan ACAR

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Tabakalı Metal Kompozitlerin Deformasyon ve Şekillendirilebilme Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ömer Necati CORA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 03/04/2024

Doğan ACAR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri	2
1.3. Ultrasonik Metal Kaynağı	5
1.4. Ultrasonik Eklemeli İmalat	6
1.4.1. UEİ Makinesinin Bileşenleri.....	9
1.4.2. UEİ yöntemiyle Bağ Oluşma Mekanizması.....	11
1.4.3. UEİ Yöntemi Üzerinde Etkin Parametreler	14
1.4.4. UEİ Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	14
1.4.5. Ultrasonik Olarak Kaynaklanabilir Malzemeler	17
1.5. UEİ Uygulamaları	19
1.6. Metal İntermetalik Laminat.....	19
1.7. UEİ Yönteminin Mekanik Özellikler ile İlişkisi	20
1.7.1. Mukavemet Özellikleri	20
1.7.2. Sertlik Özellikleri.....	21
1.7.3. Tokluk Özellikleri	21
1.7.4. Şekillendirilme Kabiliyeti	22
1.8. Çalışmanın Kapsamı.....	22
1.9. Çalışmanın Amacı	23
1.10. Çalışmanın Özgünlüğü	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Deney Malzemeleri	24

2.2.	Ultrasonik Eklemeli İmalat Yöntemiyle Plaka Üretimi	24
2.3.	Metal İntermetalik Laminat Üretimi	26
2.4.	İç Yapı İncelemeleri	28
2.5.	Mekanik Özellik İncelemeleri	29
2.5.1.	Sertlik Testleri.....	29
2.5.2.	Çekme Testleri	30
2.5.3.	Eğilme Dayanımı Testleri	32
2.5.1.	Çentik Darbe Testleri	33
2.6.	Şekillendirme Testleri	36
2.6.1.	Erichsen Testleri	36
2.7.	Yüksek Hızlı Deformasyon Karakterizasyonu.....	37
2.7.1.	Johnson-Cook Malzeme Modeli	39
2.8.	Deformasyon Dayanımı İncelemeleri	42
2.8.1.	Statik-Eşdeğer Delinme Direnci Testleri	42
2.8.2.	Düşük Hızlı Darbe Testi	43
2.9.	Sayısal Çalışmalar	46
2.9.1.	Eğilme Testi Sonlu Elemanlar Modeli.....	46
2.9.2.	Erichsen Şekillendirme Testi Sonlu Elemanlar Modeli	47
2.9.3.	Statik-Eşdeğer Delinme Sonlu Elemanlar Modeli	49
2.9.4.	Düşük Hızlı Darbe Testi Sonlu Elemanlar Modeli	50
2.9.5.	Split-Hopkinson Çekme Testi Sonlu Elemanlar Modeli.....	52
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	53
3.1.	İç Yapı	53
3.1.1.	Isıl İşlem Öncesi İç Yapı.....	53
3.1.2.	Isıl İşlem Sonrası İç Yapı.....	55
3.2.	Mekanik Özellik İncelemeleri	61
3.2.1.	Sertlik Özellikleri	61
3.2.2.	Çekme Deneyinden Elde Edilen Özellikler	64
3.2.3.	Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları	80
3.2.4.	Tokluk (Çentik Darbe Direnci) Testi Sonuçları.....	84
3.3.	Şekillendirilme Kabiliyeti	86
3.4.	Deformasyon Davranışı.....	90
3.4.1.	Statik-Eşdeğer Delinme Direnci Sonuçları	90
3.4.2.	Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları	94

3.4.3. Split-Hopkinson Çekme Çubuğu Test Sonuçları	95
4. SONUÇLAR.....	104
5. ÖNERİLER.....	108
6. KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

TABAKALI METAL KOMPOZİTLERİN DEFORMASYON VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLME DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Doğan ACAR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ömer Necati CORA
2024, 119 Sayfa

Bu çalışma kapsamında Ti ve Al metal folyoların ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle (UEİ) sıralı olarak birleştirilmesi ile üretilmiş Ti-Al tabakalı metal kompozit plakların (TMK) ve bu plakaların basınç etkisi altında ısıtılma tabi tutulması sonucunda elde edilen metal intermetalik laminatların (MİL) iç yapı ve mekanik özellikleri yanı sıra şekillendirilme ve deformasyon davranışları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Ti-Al TMK'ların akma dayanımı, çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özellikler kompozit malzemelerin doğasına uygun olarak Ti ve Al alaşımlarının özelliklerinin ortalaması olarak elde edilmiştir. Al alaşımlarının mekanik özellikleri deformasyon hızından bağımsızlık sergilerken Ti-Al TMK'nın özelliklerinin deformasyon hızına bağlılığının Ti tabakalardan kaynaklı olduğu görülmüştür. Artan sıcaklık ile toplam uzama değerleri artarken şekillendirilme deneylerinde Ti şekillendirilebilirliği artan sıcaklık ile düşmüştür. Bu sebeple Ti-Al TMK'nın şekillendirilebilirliği Al katkısı artmış olsa da Ti etkisi artan şekillendirme sıcaklığının desteğine rağmen sınırlandırılmıştır. Basınç altındaki ısıtılma sonucunda Ti-Al TMK'nın tabakaları arasında $TiAl_3$ intermetalik faz elde edilmiştir. Bu fazın sertlik değeri ısıtılma sıcaklık ve sürelerinden bağımsız olduğu görülmüştür. Ancak uygulanan sıcaklığın ve sürenin etkisi ile Ti ve Al tabakalar arasındaki $TiAl_3$ fazın kalınlığı artmıştır. Ancak, gevrek doğası gereği fazın kalınlığı arttıkça MİL eğilme ve darbe direnci düşmüştür. Bu durum MİL plakaların delinme direncinin yine Ti-Al TMK'lardan düşük olması ile sonuçlanmıştır. Ayrıca Ti-Al TMK plakaların sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak Ti-Al TMK plakaların sonlu elemanlar modellerinde kullanılmak üzere Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları da belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik eklemeli imalat, Tabakalı metal kompozit, Şekillendirilme, Deformasyon

PhD. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON DEFORMATION AND FORMABILITY BEHAVIOR OF LAMINATED METAL COMPOSITES

Doğan ACAR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ömer Necati CORA
2024, 119 Pages

In this study, the microstructure, and mechanical properties as well as the formability and deformation behaviour of Ti-Al laminated metal composite plates (LMCs) produced by sequential consolidation of Ti and Al metal foils (127 μm) via ultrasonic additive manufacturing (UAM) and metal intermetallic laminates (MILs) obtained by heat treatment of these plates under compressive stress have been extensively investigated. The mechanical properties such as yield strength, tensile strength, and ductility of Ti-Al LMC plates were obtained as the average of the properties of Ti and Al alloys due to their composite nature. While the mechanical properties of Al are independent of the strain rate, the Ti layers are the reason for the strain rate dependence of the mechanical properties for Ti-Al LMCs. Although the total elongation increased with increasing temperature, the formability of Ti decreased with increasing forming temperature. Therefore, the presence of Ti layers limits the formability of Ti-AL LMCs despite the Al presence and increasing forming temperature. As a result of the heat treatment under pressure, the TiAl_3 intermetallic phase was obtained between the layers of Ti-Al LMC. The hardness value of this phase was independent of the heat treatment temperature and duration. However, the thickness of the TiAl_3 phase between the Ti and Al layers increased with the effect of the applied temperature and duration. Due to its brittle nature, a decrease in flexural and impact resistance is observed. This phenomenon also resulted in lower puncture resistance for MIL plates when compared to TMK ones. Finite element modelling of Ti-Al LMCs was also carried out. In addition, Johnson-Cook structural material model coefficients were determined to be used in numerical studies.

Key Words: Ultrasonic additive manufacturing, Laminated metal composite, Formability, Deformation

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Yerleşmiş, gelişmekte olan ve gelecek eklemeli imalat uygulamalarının zaman akışı (Toyserkani vd., 2022).....	3
Şekil 2.	Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Ribeiro vd., 2020).....	4
Şekil 3.	Ultrasonik metal kaynağının şematik gösterimi (Shawn Lee vd., 2013).....	6
Şekil 4.	Ultrasonik eklemeli imalat yönteminin, a) ekleme adımı, b) eksiltme (talaşlı imalat) adımı (Mao, 2016)	7
Şekil 5.	Fabrisonics firmasına ait farklı kapasite ve kabiliyetlerde UEİ platformları	8
Şekil 6.	a) Fabrisonic SonicLayer 4000 UEİ makinesi-9 kW genel görünümü (Wolcott et al., 2014), b) SonicLayer 4000 iç görünümü, c) SonicLayer 4000 ana bileşenleri (G. D. J. Ram, Yang, vd., 2007),d) Alpha 2 UEİ makinesi ve bileşenleri (Bournias-Varotsis et al., 2018).....	10
Şekil 7.	Ultrasonik eklemeli imalatın şematik gösterimi, a) folyoların ultrasonik kaynaklanması, b) bağ oluşturma mekanizması.....	12
Şekil 8.	UEİ yöntemiyle birleştirilen Al-Al arasında kaynak bağı oluşumu esnasında mikroyapısal gelişimin şematik gösterimi, 1-3: folyo üst yüzeyinde mikro pürüzlerin oluşumu; 4-6: en üstteki iki metal folyo arasında bağ oluşumu; 7-8: ek metal folyoların biriktirilmesi işlemi (Fujii vd., 2011, 2017)	13
Şekil 9.	Ultrasonik metal kaynağı ve ultrasonik eklemeli imalat yöntemi ile kaynaklanabilir malzeme çiftleri (A. O'Brien, 1991; D. R. White, 2003).....	18
Şekil 10.	UEİ yönteminin ana uygulama alanları (Hehr & Norfolk, 2019).....	18
Şekil 11.	(a) TOROID uzay aracının basitleştirilmiş görünümü, b) uydu panelinin talaş kaldırılmış bal peteği iç yapısı, c) bal peteği iç yapısı üst kapamasının ultrasonik birleştirilmiş ilk tabakası (J. L. George, 2006; J. George & Stucker, 2006)	19
Şekil 12.	a) Ultrasonik eklemeli imalat yönteminin şematik gösterimi ve çalışma kapsamında kullanılan b) 5 çift tabakalı metal kompozit (5-TMK) ve c) 7 çift tabakalı metal kompozit (7-TMK)	26
Şekil 13.	TMK numunelerin ısıtılma işlem öncesi basınç altına alınması işlemi, a) ısıtılma işlem kalıbı ve bileşenleri, b) basınç uygulama işlemi (üniversal çekme-basma test cihazı ile).....	28
Şekil 14.	a) Mikro sertlik test cihazı, b) TMK plakanın kesiti boyunca her bir tabakadan alınan sertlik ölçümü şematik gösterimi.....	30
Şekil 15.	a) Çekme numunelerinin haddelendirme (sonotrot hareket) yönüne göre TMK plaklardan kesim yerleşimi, b) Çekme numunesi 3 boyutlu görünümü, c) çekme numunesi boyutları, d) Numune kalınlık boyunca kesit detay görünümü.....	31

Şekil 16.	Üç nokta eğme test düzeneği genel görünümü, b) eğme işlemi öncesi numune görünümü, eğme işlemi sonrası numune görünümü, d) eğme numunesine ait boyutlar.....	33
Şekil 17.	a) Ceast (Instron) Çentik darbe test düzeneği, b) numunenin cihaz üzerinde merkezlenerek konumlandırılması, c) teste hazır numunenin görüntüsü, d) numune boyutları.....	35
Şekil 18.	a) Erichsen deneylerinin gerçekleştirildiği universal çekme-basma test düzeneği, b) kullanılan kalıp, zımba ve pot çemberi görüntüleri, c) sıcaklık koşullandırma ortamı (fırın) içerisinde kalıp ve zımba görüntüsü, d) küçültülmüş Erichsen deney düzeneği	37
Şekil 19.	Split-Hopkinson çekme çubuğu (SHÇÇ) test düzeneği (İYTE-DTMLab).....	38
Şekil 20.	a) Split-Hopkinson basınç bar çekme test düzeneği şematik görünümü ve elemanları, b) yüksek hızlı çekme numunesi, c) yüksek hızlı çekme numunesi boyutları	39
Şekil 21.	(a) Statik-eşdeğer delinme test düzeneği genel görünümü, (b) Zımba ve kalıp detay görünümü, (c) Test düzeneği şematik görünümü ve boyutları, (d) Zımba-numune teması	42
Şekil 22.	a) Düşürme kulesi test düzeneği genel görünümü, b) vurucu uç-numune çarpışma bölgesi görünümü, c) vurucu uç, sensörler ve kalıp detay görünümü, d) deneylerde kullanılan farklı uç tiplerindeki vurucu uçlar ve geometrik boyutları, e) kalıp şematik görünümü	45
Şekil 23.	5-TMK ve 7-TMK plakaların statik-eşdeğer üç nokta eğme testi sonlu elemanlar modeli, a) izometrik görünümü ve sınır şartları, b) çapraz kafa-TMK temas bölgesi ve bu bölgedeki TMK ağ örgüsü detayı	47
Şekil 24.	5-TMK plakanın Erichsen şekillendirme testi sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları	48
Şekil 25.	5-TMK plakanın farklı zımba uçları ile statik-eşdeğer delinme testi sonlu elemanlar modeli, a) sonlu eleman modelinin izometrik görünümü, b) düz, yarı küresel ve düz uçlu zımbalar, c) kesit görünümü ve sınır şartları	49
Şekil 26.	7-TMK plakanın farklı zımba uçları ile düşük hızlı darbe deneyi sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları, a) sonlu eleman modelinin genel izometrik görünümü, b) yarı küresel uçlu zımba modeli, c) konik uçla zımba modeli, c) düz uçlu zımba.....	51
Şekil 27.	Split-hopkinson basınç barı çekme numunesi sonlu elemanlar modeli a) izometrik görünümü ve ağ yapısı, b) sınır koşulları	52
Şekil 28.	Isıl işlem öncesi TMK plakaların kesitlerine ait optik mikroskop görüntüleri, a) 5-TMK, b) 7-TMK.....	53
Şekil 29.	a) Isıl işlem öncesi TMK plakanın kesitinden alınan TEM görüntüsü, b) şekildeki -1- numaralı kırmızı çizgi boyunca alınan EDS'e ait tarama grafiği, c) -1- numaralı kırmızı çizgi boyunca EDS'e ait element dağılımı.....	54

Şekil 30.	a) Isıl işlem öncesi TMK numuneye ait kesitin TEM görüntüsü, b) ısıtıl işlem sonrasında MİL numuneye ait kesitin TEM görünümü ve $TiAl_3$ oluşumu	55
Şekil 31.	Farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen ısıtıl işlemler sonucu MİL numunelerin kesitleri üzerinde elde edilen X-ışını kırınım ölçer sonuçları.....	56
Şekil 32.	TMK numunelerin ısıtıl işlem (600 °C ve 36 saat) sonrasında oluşan MİL kesitinde $TiAl_3$ oluşumun detaylı görünümü ve EDS analizi sonuçları	57
Şekil 33.	TMK numunelere 575 °C sıcaklıkta ve farklı sürelerde uygulanan ısıtıl işlemin ardından elde edilen MİL numunelerin kesitlerine ait optik mikroskobu görüntüleri, a) 6 saat, b) 12 saat, c) 18 saat, d) 24 saat, e) 30 saat, f) 36 saat	59
Şekil 34.	TMK numunelere 600 °C sıcaklıkta ve farklı sürelerde uygulanan ısıtıl işlemin ardından elde edilen MİL numunelerin kesitlerine ait optik mikroskobu görüntüleri, a) 6 saat, b) 12 saat, c) 18 saat, d) 24 saat, e) 30 saat, f) 36 saat	60
Şekil 35.	Isıl işlem öncesinde 5-TMK kesitinden Ti ve Al tabalarından alınan mikro sertlik ölçüm değerleri ve optik görüntüleri.....	61
Şekil 36.	Isıl işlem öncesinde 7-TMK plakanın kesitinden Ti ve Al tabalarının her birinden alınan mikro sertlik ölçüm değerleri (T: Tabaka, tek numaralar Ti, çift numaralar Al).....	62
Şekil 37.	Sertlik ölçümü için farklı yük değerlerinin etkisi, a) optik mikroskop görüntüsü, b) sertlik ölçüm değerleri.....	63
Şekil 38.	Isıl işlem sonrasında, a) MİL kesitinde farklı tabakalarda alınan sertlik ölçümlerine ait optik mikroskop görüntüsü, b) MİL kesitinde farklı tabakalara ait sertlik ölçüm değerleri.....	64
Şekil 39.	Farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında çekme testine tabi tutulan 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O numuneler	65
Şekil 40.	Oda sıcaklığında ve farklı deformasyon hızlarında elde edilen mühendislik gerilmesi-uzaması eğrilerinin karşılaştırılması, a) SR1: $0.001 s^{-1}$, b) SR2: $0.01 s^{-1}$, c) SR3: $0.1 s^{-1}$, d) SR4: $1 s^{-1}$	67
Şekil 41.	Sabit deformasyon hızında (SR1: $1 \times 10^{-3} s^{-1}$) ve farklı sıcaklıklarda elde edilen mühendislik gerilmesi-uzaması eğrilerinin karşılaştırılması, a) T1: 25 °C, b) T2: 150 °C, c) T3: 225 °C, d) T4: 300 °C	68
Şekil 42.	Test edilen malzemelerin akma gerilmesi üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkisi	70
Şekil 43.	Test edilen malzemelerin çekme gerilmesi üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkisi	70
Şekil 44.	Test edilen malzemelerin kopma uzaması üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkisi	71
Şekil 45.	Logaritmik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi (Marciniak vd., 2002).....	72

Şekil 46.	Pekleşme üssü (n) üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkileri	73
Şekil 47.	Mukavemet katsayısı (K) üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkileri	73
Şekil 48.	Deformasyon hızı duyarlılığının belirlenmesinde kullanılan yöntemler (Marciniak vd., 2002)	74
Şekil 49.	Deformasyon hızı hassasiyeti üssü (m) belirlenmesi, a) 5-TMK, b) 7-TMK, c) CP1-Ti, d) AA1100-O.....	75
Şekil 50.	Numunelerin haddeleme doğrultusuna göre mühendislik gerilmesi- % uzaması eğrileri, a) 5-TMK ve HD: 0°, b) 5-TMK ve HD: 45°, c) 5-TMK ve HD: 90°, d) 7-TMK ve HD: 0°, e) 7-TMK ve HD: 45°, f) 7-TMK ve HD: 90°	77
Şekil 51.	Farklı deformasyon hızlarında test edilen çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin TEM görüntüleri, a) SR1: 0.001 s ⁻¹ , b) SR2: 0.01 s ⁻¹ , c) SR3: 0.1 s ⁻¹ , d) SR4: 1 s ⁻¹	78
Şekil 52.	Farklı sıcaklıklarda test edilen çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin TEM görüntüleri, a) T1: 25 °C, b) T2: 150 °C, c) T3: 225 °C, d) T4: 300 °C	79
Şekil 53.	5-TMK, AA1100-O, CP1-Ti ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma ile üretilen 5-MİL numunelere ait eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırması	82
Şekil 54.	7-TMK, AA1100-O, CP1-Ti ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma ile üretilen 7-MİL numunelere ait eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırması	82
Şekil 55.	5-TMK numunenin 3 nokta eğme testi sonlu elemanlar analizi sonucunda numune kesitinde elde edilen von-Mises gerilme dağılımı ve detay görüntüsü.....	83
Şekil 56.	5-TMK numunenin eğilmesinde kaydedilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 57.	CP1-Ti, AA1100-O, 5-TMK, 7-TMK ve farklı sıcaklık ve sürelerde üretilen 5-MİL ve 7-MİL numunelere ait kırılma enerjileri karşılaştırması.....	85
Şekil 58.	Çentik darbe deneyine tabi tutulmuş 5-TMK, 7-TMK ve farklı sıcaklık ve sürelerde üretilmiş MİL numunelerin deney sonrası görüntüleri	85
Şekil 59.	Farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında Erichsen deneyine tabi tutulan 5-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O numunelerin kesit görüntüleri.....	86
Şekil 60.	CP1-Ti, 5-TMK ve AA1100-O ait farklı sıcaklık ve farklı deformasyon hızlarındaki Erichsen indeksi (EI_{21}) değerlerini karşılaştırılması.....	87
Şekil 61.	Oda sıcaklığında ve 1x10 ⁻³ s ⁻¹ deformasyon hızında gerçekleştirilen Erichsen testinden elde edilen kuvvet-çökme eğrileri	88

Şekil 62.	Farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma tabi tutulmuş 7-TMK numunelerin farklı delici uç tipleri ile statik-eşdeğer yük altında delinme sonrası görüntüleri	90
Şekil 63.	Isıl işlem süresinin 7-TMK ve 600 °C sıcaklıkta üretilen 7-MİL numunelerin yarı küresel (YK) tip delici uç ile delinme enerjileri karşılaştırması.....	91
Şekil 64.	7-TMK numunelerin farklı delici uç tipleri delinme direnci testleri sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 65.	Isıl işlem (600 °C ve 24 saat) ile üretilmiş 7-MİL numunelerin delinme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerinde delici uç tipinin etkisinin karşılaştırılması.....	93
Şekil 66.	7-TMK ve 7-MİL numunelerin farklı delici uç tipleri ile delinme enerjileri karşılaştırması.....	94
Şekil 67.	Farklı tip delici uç ve farklı enerji seviyelerinde test edilen 7-TMK plakanın delinme enerjileri	95
Şekil 68.	SHÇÇ test numuneleri: deney öncesi ve yüksek deformasyon hızlarındaki deneyler sonrası	96
Şekil 69.	a) 5-TMK ve b) 7-TMK üzerinde gerçekleştirilen SHÇÇ testlerine ait gerilim geçmişi	97
Şekil 70.	SHÇÇ testleri esnasında kaydedilen hem 5-TMK hem de 7-TMK'ya ait yüksek hızlı kamera görüntüleri	97
Şekil 71.	Farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen SHÇÇ testleri sonucunda elde edilen gerçek deformasyon hızı-gerçek birim şekil değişimi eğrileri, a) 5-TMK, b) 7-TMK	98
Şekil 72.	Farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen SHÇÇ testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değişimleri, a) 5-TMK, b) 7-TMK.....	98
Şekil 73.	Deformasyon hızının gerçek gerilme-birim şekil değişimi üzerindeki etkisi, a) 5-TMK, b) 7-TMK.....	100
Şekil 74.	Johnson-Cook malzeme katsayılarından A, B ve n katsayılarının eğri uyumlama ile belirlenmesi, a) 5-TMK ve b) 7-TMK.....	102
Şekil 75.	Johnson-Cook malzeme modeli katsayılarından C katsayısının eğri uyumlama ile belirlenmesi, a) 5-TMK ve b) 7-TMK.....	103

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Ti-Al TMK imalatında kullanılan ticari saflıktaki folyoların kimyasal bileşimleri	25
Tablo 2. Titanyum-alüminyum tabakalı numunelerin UEİ yöntemiyle üretim parametreleri.	25
Tablo 3. Metal İntermetalik Laminat (MİL) plaka üretiminde kullanılan parametreler	27
Tablo 4. Tabakalı metal kompozit plaklara, CP1-Ti ve AA 1100-O çekme deneyi test planı.....	32
Tablo 5. Üç nokta eğme test planı.....	34
Tablo 6. Uygulanan çentik darbe test planı.....	35
Tablo 7. Erichsen şekillendirme test planı	36
Tablo 8. Statik-Eşdeğer delinme direnci test planı	43
Tablo 9. Düşük hızlı darbe test planı	44
Tablo 10. Oda sıcaklığında ve farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler	67
Tablo 11. Sabit 0.001 s^{-1} deformasyon hızında farklı test sıcaklıklarında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler	68
Tablo 12. SHÇÇ testleri verilerinden elde edilen Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları.....	101

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

UEİ	: Ultrasonik Eklemeli İmalat
UAM	: Ultrasonic Additive Manufacturing
UB	: Ultrasonik Birleştirme
UC	: Ultrasonic Consolidation
ÇYG-UEİ	: Çok Yüksek Güçlü Ultrasonik Eklemeli İmalat
VHP-UAM	: Very High Power Ultrasonic Additive Manufacturing
TMK	: Tabakalı Metal Kompozit
MİL	: Metal İntermetalik Laminat
JC	: Johnson-Cook Malzeme Modeli
σ	: Akma mukavemeti (MPa)
A	: %0.2 birim şekil değişimine karşılık gelen akma gerilmesi (MPa)
B	: Pekleşme katsayısı (MPa)
ε_p	: Efektif plastik birim şekil değişimi
n	: Deformasyon sertleşmesi üssü
C	: Birim şekil değiştirme hızı sabiti
$\dot{\varepsilon}^*$	: Normalize edilmiş birim şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_{ef}^p$	: Efektif plastik birim şekil değiştirme hızı (s^{-1})
$\dot{\varepsilon}_0$	: Referans birim şekilde değiştirme hızı (s^{-1})
T^*	: Benzeş sıcaklık
m	: Isıl yumuşama üssü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Havacılık ve uzay sektörü ticari ve askeri uçakları, uzaya araç fırlatma, uzay içi sistemleri, füzeleri, uyduları ve genel havacılığı kapsamaktadır (Blakey-Milner vd., 2021). Bu kadar geniş kapsamda çalışma alanında havacılık ve uzay sektöründeki gelişmeler, ilerleyen teknoloji ve insanlığın gereksinimlerinin karşılanmasında geleneksel malzemeler ve geleneksel imalat teknolojileri yetersiz kalmaktadır. Havacılık ve uzay sektöründe üretim; maliyet yönetimi, teslim süresinin kısaltılması ve hafifletme gibi birbiri ile de etkileşim halindeki teknik ve ekonomik hedeflere sahiptir (Blakey-Milner vd., 2021).

Yakıt tüketimi, havacılık ve uzay taşıtlarının verimliliği açısından çok önemlidir. Ampirik analizler, 1 kg ağırlığı 1000 km mesafe boyunca taşımak için ortalama yaklaşık 0.2 kg yakıt gerektiğini göstermektedir (Steinegger, 2017). Ayrıca, eklenen her bir kg ağırlık için 1000 km başına yaklaşık 0.02 ila 0.03 kg ek yakıt gerekmektedir. Bunun tersi de doğrudur: ağırlıkta bir kg azalma, 1000 km başına yaklaşık 0.02 ila 0.03 kg veya sırasıyla yaklaşık 2 ila 3 avro yakıt tasarrufu sağlar. Dolayısıyla hafifletme çalışmaları yukarıda bahsedilen havacılık ve uzay sektörü hedefleri arasında kendisine kritik bir yer bulmaktadır. Bu sebepten dolayı hafifletme hedefine ulaşmak için yeni malzeme ve eklemeli imalat benzeri yenilikçi imalat teknolojilerine olan gereksinim artmaktadır (Gibson vd., 2015).

Hafif malzemeler ağırlık azaltma stratejisinin özüdür ve tipik hafif malzemeler alüminyum, magnezyum, berilyum, titanyum, titanyum alüminitler, yapısal seramikler ve polimer, metal ve seramik matrisli kompozitleri içerir (Czerwinski, 2022). Tüm bu çeşitli hafif malzemeler arasında kompozitler önemli bir yer kaplamaktadır (P. Cheng vd., 2023; Zhu vd., 2018).

Hafifletme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri arasında ultrasonik eklemeli imalat yöntemi, son yıllarda yenilikçi bir eklemeli imalat yöntemi olarak ön plana çıkmaya başlamıştır (Hehr & Norfolk, 2019). Ultrasonik eklemeli imalat yönteminin hafifletme çalışmalarında parlamasında, birbirine benzeyen veya birbirinden farklı malzemeleri birleştirerek hafif kompozit yapılar üretme kabiliyeti önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, hafif malzemeler arasında havacılık ve uzay uygulamalarında en yaygın olarak kullanılan titanyum ve alüminyumun ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle bir araya getirilmesiyle üretilmiş Ti-Al tabakalı metal kompozit plakalar üzerine çalışmalar gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat, bir CAD modelinden faydalanılarak malzemelerin sıralı katmanlar halinde biriktirilmesi ya da birleştirilmesi işlemiyle üç boyutlu nesneleri ve parçaların üretilmesidir (Sun vd., 2021). ASTM ve ISO standart kurumları bir araya gelerek eklemeli imalat için ortak bir tanım belirlemiştir (Toyserkani vd., 2022). Bu tanıma göre eklemeli imalat “Eklemeli imalat, eksiltmeli ya da şekillendirmeli üretim yöntemlerinin aksine, üç boyutlu bir modelden alınan veriler kullanılarak ve genellikle katman üstüne katman parçalar üretmek amacıyla malzemelerin birleştirilmesi işlemidir.” ekinde tanımlanmaktadır (ISO/ASTM 52900, 2021).

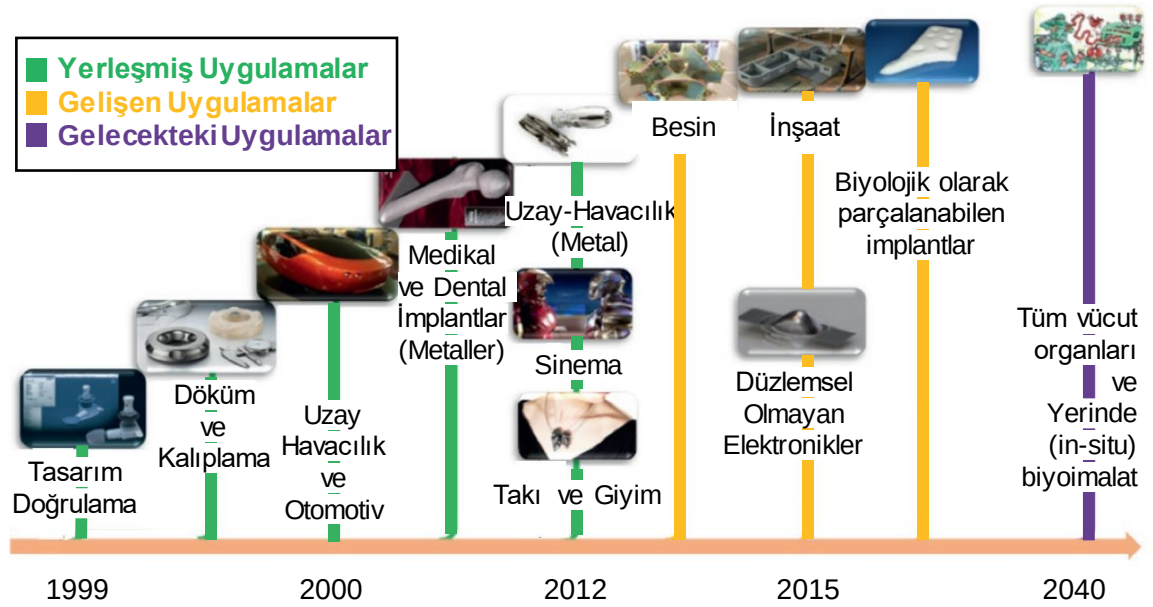
Eklemeli imalat yöntemleri, sağladıkları avantajlar ile birçok alan ve uygulamada geleneksel yöntemlere üstünlük sağlamışlardır. Eklemeli imalatların avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (Bandyopadhyay vd., 2022; Gibson vd., 2015; Javaid vd., 2021; Srivatsan vd., 2015; Toyserkani vd., 2022)

- Hızlı prototip üretme
- Parça tasarımında esneklik
- Üretimde esneklik
- Kaynakların kullanımında verimlilik
- Daha hafif ürünler üretebilme

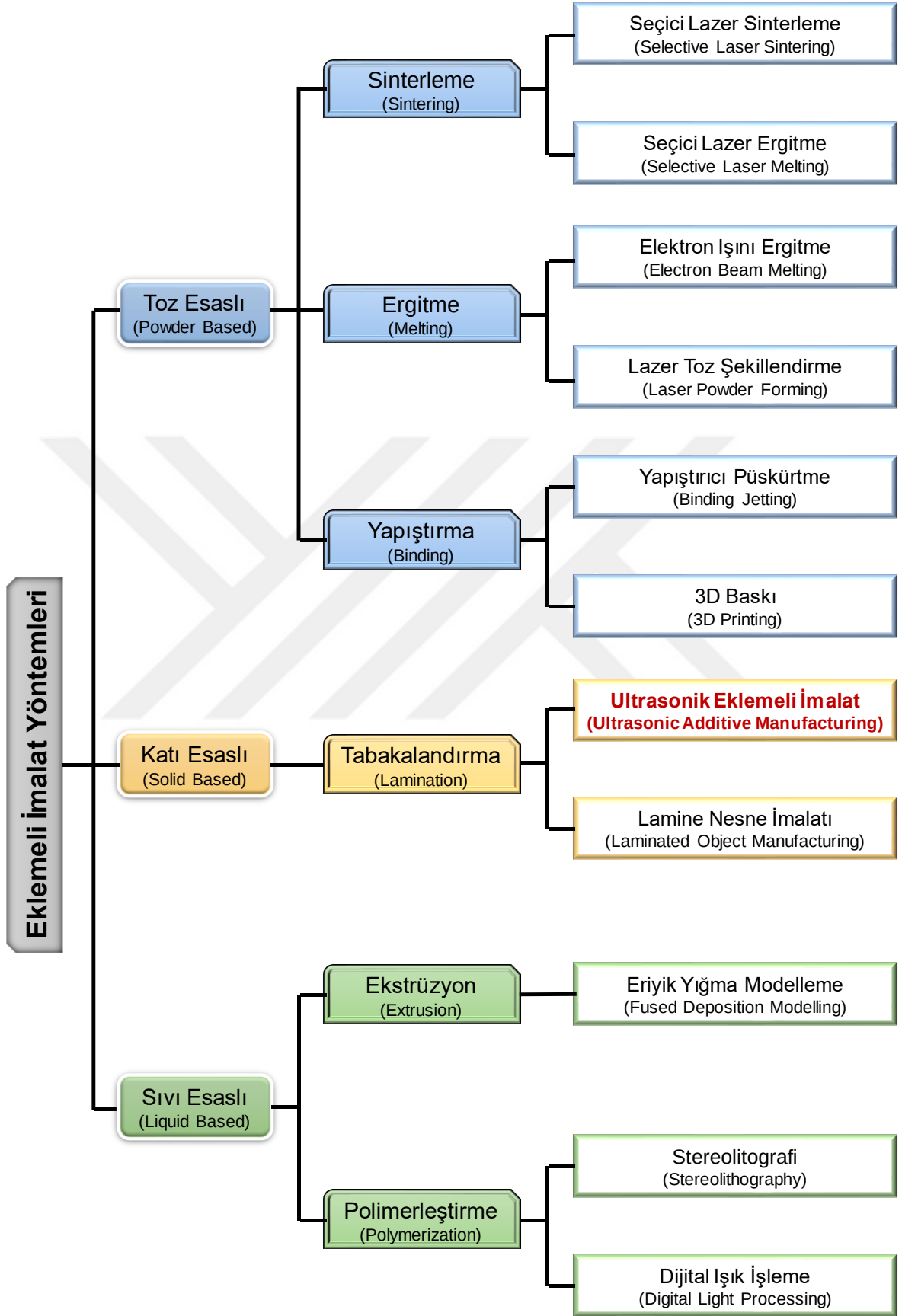
Eklemeli imalat yöntemlerinin uygulama alanları kısa sürede genişlemiştir. Mevcut uygulamaların yanı sıra geliştirilmekte olan birçok uygulama alanı da mevcuttur. Bu uygulamaların tarihsel gelişimi ve gelecek öngörülerine dair şematik bir Şekil 1’de görülmektedir. Bir ürünün tasarım ve geliştirme süreçlerinin bir parçası olarak prototip üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dutta vd., 2001; Yan & Gu, 1996). Bunun yanı sıra , hızlı prototipleme (Karapatis vd., 1998; G. N. Levy vd., 2003), mekanik bileşenlerin tamir edilmesi (Bohrer vd., 2002), tıbbi implant ve cihazların imal edilmesi (Attaran, 2017; Hong vd., 2001; Jockusch & Özcan, 2020; Kumar vd., 2021; Salmi, 2021; Stevens vd., 2008; Wu vd., 1996), uzay-havacılık ve savunma sanayi (Blakey-Milner vd., 2021; Milewski,

2017; Najmon vd., 2019; Shapiro vd., 2016) , otomotiv endüstrisi, (Mohanavel vd., 2021; Salifu vd., 2022; Vasco, 2021), enerji sektörü (Cramer vd., 2022; T. Peng vd., 2018; Sun vd., 2021) ve nihai parça üretilmesi gibi uygulamaları da mevcuttur.

Eklemeli imalat yöntemleri arasındaki temel farklılıklar kullanılan malzemeler ve parça imalat tekniklerinden kaynaklanmaktadır (Dutta vd., 2001; P. F. Jacobs, 2002; Santos vd., 2006; Yan & Gu, 1996). Bu malzeme ve teknikler esas alınarak oluşturulan bir eklemeli imalat yöntemleri sınıflandırması Şekil 2’de verilmiştir.



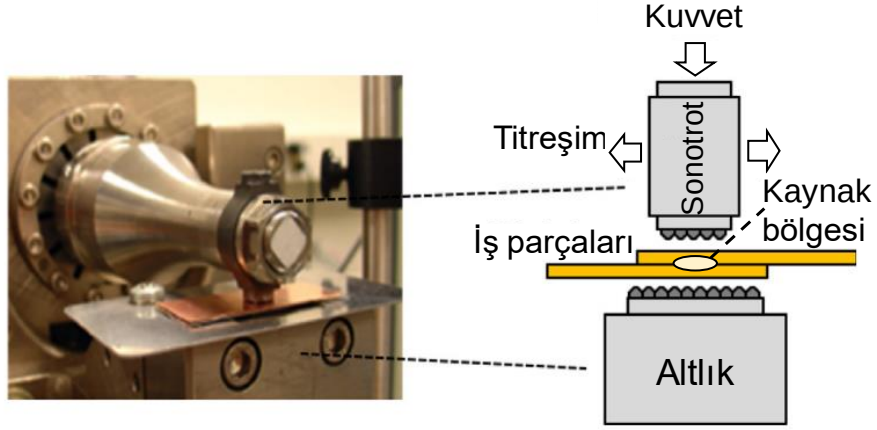
Şekil 1. Yerleşmiş, gelişmekte olan ve gelecek eklemeli imalat uygulamalarının zaman akışı (Toyserkani vd., 2022)



Şekil 2. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Ribeiro vd., 2020)

1.3. Ultrasonik Metal Kaynağı

Ultrasonik kaynak işleminde, iki malzeme arasında metalürjik bağ oluşturmak için yüksek frekanslı titreşim enerjisi uygulanır (Pal, 2011). Yüksek frekanslı titreşimin etkisi ile malzemeler arasında bir metalürjik bağ oluşur. Ultrasonik kaynak ile birleştirilecek malzemeler, titreşimli bir ultrasonik prob ve sabit bir örs arasına yerleştirilir (Şekil 3). Titreşim ve uygulanan kuvvet birleştirilecek malzemeler arasında sürtünme ve sıcaklık artışına sebep olur. Ultrasonik probun oluşturduğu titreşimler birleştirilecek iş parçalarının arayüzüne paralel olarak gerçekleşir. Ultrasonik kaynak kalitesini etkileyen temel parametreler ultrasonik titreşimin genliği ve frekansı (ultrasonik güç), uygulanan normal kuvvet ve kaynak işleminin süresidir. Metallerde sürtünme, kaynaklanacak yüzeylerin temizlenmesinde ve yüzeylerdeki oksit tabakasının dağıtılmasında etkin rol oynar. Buna rağmen, ultrasonik kaynak ile birleştirilecek yüzeylerin temizliği kaynak işleminin gerçekleşmesi için bir ön şart değildir. Ancak kaynaklanacak yüzeylerin pürüzlülük değeri düştükçe daha kaliteli kaynak ve daha kuvvetli bağ oluşmaktadır. Diğer kaynak yöntemleri arasında ultrasonik kaynak işlemi en düşük enerji gereksinimi olanıdır. Öte yandan kaynaklanacak malzemenin sertliği ve kalınlığı arttıkça daha yüksek enerji girdisine gerek duyulmaktadır. Daniels'e (1965) göre kaynak mekanizmasını, normal ve salınımlı kesme kuvvetlerinin küçük oluşturduğu nokta kaynakları ve malzemelerin %5'in altında plastik deformasyona uğrayarak kaynak arayüzeyinde kademeli bir şekilde nihai kaynağın oluşmasını kapsamaktadır. Bununla birlikte ultrasonik kaynak esnasında elde ortaya çıkan sıcaklık kaynakla birleştirilecek malzemelerin ergime sıcaklıklarının %40'ını geçmemektedir (Daniels, 1965).



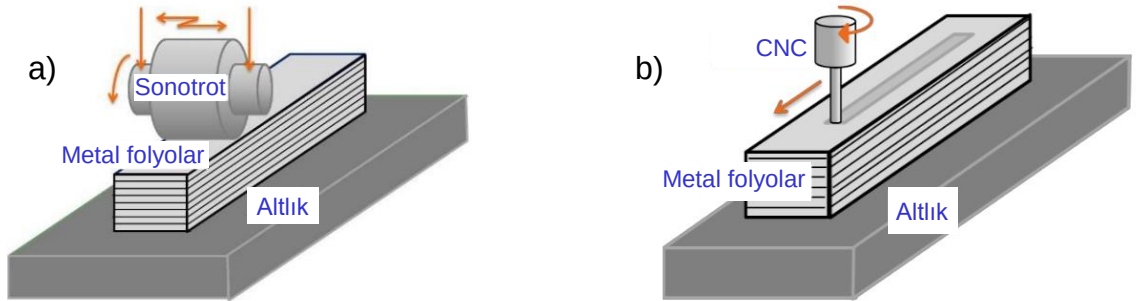
Şekil 3. Ultrasonik metal kaynağının şematik gösterimi (Shawn Lee vd., 2013)

1.4. Ultrasonik Eklemeli İmalat

Ultrasonik eklemeli imalat (UEİ) ultrasonik metal kaynağı prensiplerini esas alarak tabakalı metal yapıların üretilmesinde kullanılan bir katı-hal eklemeli imalat yöntemidir (Toyserkani vd., 2022; Wolcott, 2015). Bu yöntemle yöntemde metal folyoların sıralı olarak üst üste gelecek şekilde birleştirilir. Ultrasonik birleştirmede kullanılan metal folyoların kalınlıkları birkaç yüz mikron mertebesinde (A. Levy vd., 2018; Monaghan vd., 2015; Sridharan, Gussev, vd., 2016; Wolcott vd., 2016). İşlem ilk önce bu metal folyolardan birinin altlık üzerine cıvata ile bağlanmış feda edilebilir bir alt plaka üzerine sabitlenmesi ile başlar. Altlık genel olarak işlem öncesinde oda sıcaklığı ile 150 °C aralığında değerine kadar ısıtılır ve bu sıcaklık değeri işlem süresince uygulanmaya devam eder (J. G. D. Ram vd., 2006). Ardından folyo altlık plaka veya bir önce yerleştirilmiş folyo üzerine ultrasonik dairesel bir sonotrot aracılığıyla sıkıştırılır. Bu sıkıştırma işlemi süresince sonotrot folyo üzerinde dönerek ilerler. Sonotrotun uyguladığı kuvvet düşük kuvvetli sistemler için 300-400 N civarında iken yüksek güçlü olanlar için 1600 N değerine çıkabilirken bazı uygulamalarda 20 kN değerlerine kadar erişilmektedir (Graff, 2011; Mao, 2016). İlerleme esnasında piezoelektrik bir transformatör ile sonotrota ilerleme yönüne dik doğrultuda yüksek frekanslı titreşimler (20 kHz) uygulanır (Hehr & Dapino, 2017; Hehr & Norfolk, 2019; Mao, 2016). Titreşimin genliği ise 5-50 μm aralığında değişmektedir (Edmonds & Harris, 2011; Kong vd., 2004a; Monaghan vd., 2015). Kuvvet, ilerleme ve titreşim üçlüsünün etkisi ile kaynaklanan folyo ile kaynatıldığı malzeme arasında bir ovalama etkisi meydana gelir. Yüzeyindeki dokunun sayesinde sonotrot folyoya tutunur ve birlikte titreşirler. Ovalama

olayı, yüzey oksitlerini ve kirleticileri yerlerinden oynatır ve mikro pürüzlülüklerin (yüzey düzensizlikleri) ezilmesi ile sonuçlanır. Dolayısıyla metal-metal teması sağlanarak basınç etkisi altında anlık olarak atomik düzeyde bağ oluşumu gerçekleşir (Kong vd., 2003; G. D. J. Ram, Robinson, vd., 2007). Metal folyonun kaynatıldığı malzeme metal bir plaka, başka bir metal parça veya önceden yerleştirilmiş/kaynatılmış metal folyo olabilir. Metal folyonun birleştirilmesi işlemi tamamlandığında, sıradaki tabaka bir öncekinin üzerine aynı süreçler tekrarlanarak kaynaklanır. Birleştirme işlemlerine istenilen parça yüksekliğine ulaşıncaya kadar devam edilir. Tüm bu birleşme süreci boyunca metal-metal ara yüzeyin sıcaklığı kullanılan metal folyoların ergime sıcaklığının %50'sini geçmemektedir. Bu özelliği ile UEİ yöntemi aynı zamanda bir katı-hal eklemeli imalat yöntemidir (Tuncer & Bose, 2020; Wolcott vd., 2016). İşlem esnasında sıcak değeri 120 °C'nin (ergime sıcaklığının çok altında) üzerine çıkmadığından sarf olarak kullanılan folyoların kimyasal yapısı, tane yapısı ve malzeme özellikleri korunur.

UEİ, aynı zamanda eklemeli (additive) ve eksiltmeli (subtractive: talaşlı imalat) imalat yöntemlerinin özelliklerini bir araya getiren karma bir eklemeli imalat yöntemidir (Siggard vd., 2006). Bu kabiliyetlerin bir araya gelmesi amacıyla UEİ cihazına bir 3 eksenli CNC freze entegre edilmiştir. Eklemeli ve eksiltmeli (talaşlı) imalat yöntemlerini bir araya getirmek UEİ yöntemine üç boyutlu metal parçalar oluşturma olanağı sağlamaktadır. İki yöntemin bir araya gelmesiyle üretilen parçalar, karmaşık iç geometri (geçiş yolları ve kanallar), çoklu malzeme kullanımı, bütünleşmiş kablolama, kapsüllenmiş fiber optiklerin eklenmesi ve gömülü mekanik ve elektrik sistemleri gibi özellikleri barındırabilmektedir.



Şekil 4. Ultrasonik eklemeli imalat yönteminin, a) ekleme adımı, b) eksiltme (talaşlı imalat) adımı (Mao, 2016)

UEİ (Ultrasonik Eklemeli İmalat: Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM) veya bilinen bir diğer adıyla ultrasonik birleştirme, UB (Ultrasonic Consolidation, UC) göreceli olarak yeni bir eklemeli imalat yöntemidir. UEİ yöntemi ilk defa Dawn White tarafından 1999 yılında kurulan Solidica Inc. (Ann Arbor, MI, ABD) firması bünyesinde ticarileştirilmiştir. Dawn White yöntemin haklarını “Ultrasonic Object Consolidation” başlıklı patent ile tescillemiştir (D. White, 2003). Daha sonra 2007 yılında Solidica, bağ kalitesini ve kaynaklanabilir metal sayısını arttırmak amacıyla Edison Kaynak Enstitüsü (Edison Welding Institute, EWI) ile iş birliğine gitmiştir. Bu iş birliğinin sonucunda “çok yüksek güçlü Ultrasonik Eklemeli İmalat, (very high power Ultrasonic Additive Manufacturing, VHP-UAM)” isimli yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yeni yöntem ile üretilen cihazların ticarileştirilmesi için 2011 yılında Fabrisonics LLC firması kurulmuştur. Fabrisonics firmasının portföyünde yer alan UEİ platformlarının görüntüleri ile kapasite ve kabiliyetlerine ait bilgiler Şekil 5’de verilmiştir.



SonicLayer™ R200
Araştırma Platformu

- El ile besleme
- 11 kN
- 4.5 veya 9 kW Güç
- 50x30x15 cm³
- 5 m/dk. kaynak hızı



SonicLayer™ 4000
Orta Boy

- Entegre 3-eksen CNC
- Otomatik folyo besleme
- 11 kN
- 4.5 veya 9 kW Güç
- 100x60x60 cm³
- 5 m/dk. kaynak hızı



SonicLayer™ 7000
Endüstriyel Ölçek

- Entegre 3-eksen CNC
- Otomatik folyo besleme
- 22 kN
- 9 kW Güç
- 180x180x90 cm³
- ~1.7 m³/saat

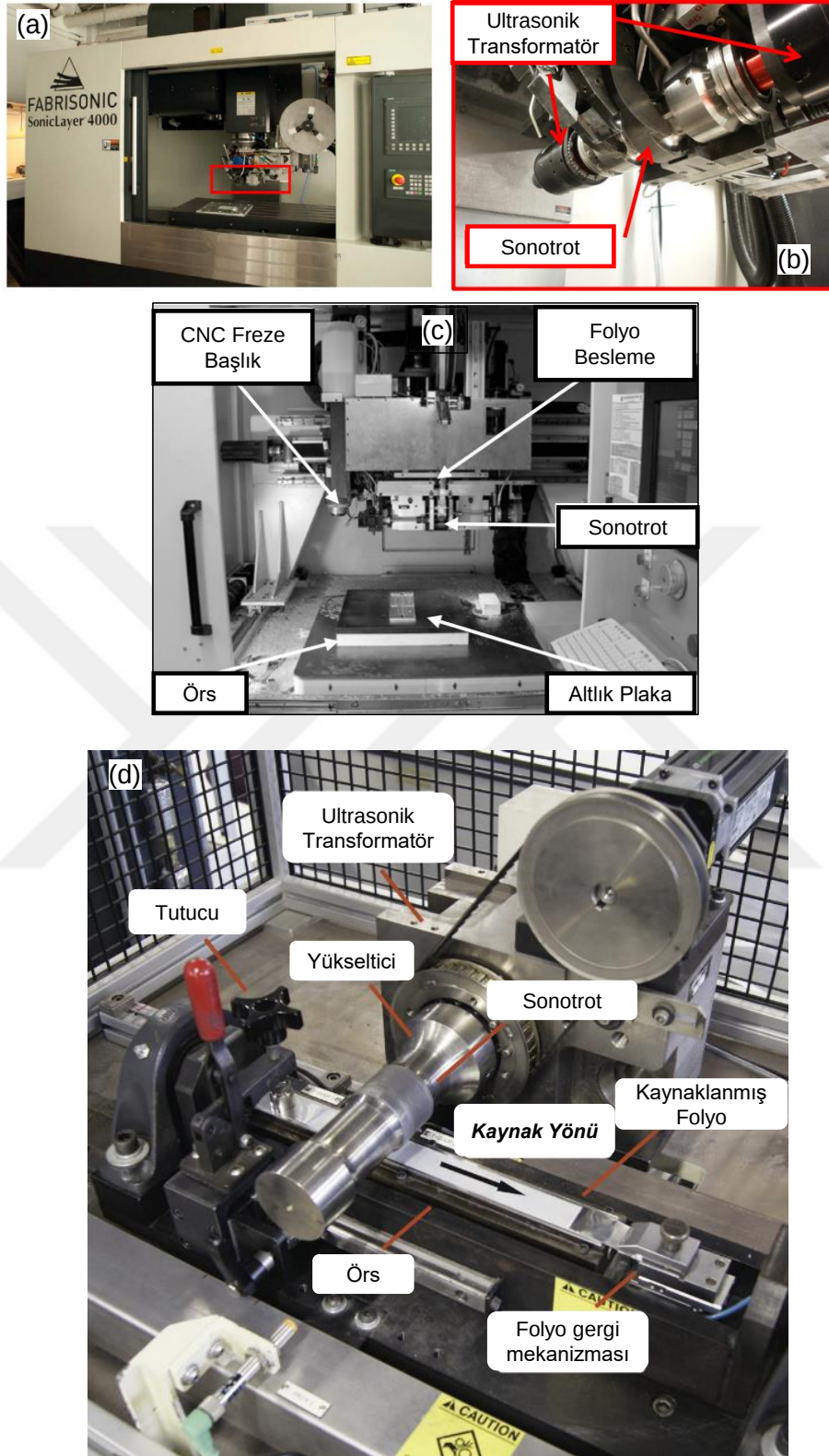
Şekil 5. Fabrisonics firmasına ait farklı kapasite ve kabiliyetlerde UEİ platformları

1.4.1. UEİ Makinesinin Bileşenleri

Tüm UEİ makinaları malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan ultrasonik kaynak kısmı ile talaşlı imalatın gerçekleştirildiği bir üç eksenli bir CNC frezeden oluşmaktadır. Bu makineler elektrik enerjisini yüksek frekanslı titreşimlere dönüştürmektedir. Ultrasonik birleştirme kısmı genellikle aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır (R. L. O'Brien, 1983):

- Elektrik hattındaki 50-60 Hz frekansı ultrasonik birleştirme sisteminin rezonans frekansına dönüştüren bir güç kaynağı ya da frekans dönüştürücü:
- Elektriksel gücü elastik titreşim enerjisine dönüştürmek ve kaynak bölgesine aktarmak amacıyla bir transformatör-sonotrot sistemi
- Kaynak bölgesine baskı kuvveti uygulayacak bir mekanizma
- Birleştirilecek iş malzemeleri desteklemek için bir tabla
- Kaynağa aktarılacak enerji miktarını kontrol eden bir cihaz.

Ultrasonik kaynak aparatı ise folyolar ile etkileşime geçen esas kısım olmakla birlikte sırasıyla güç kaynağı, transformatör (transducer), yükseltici (booster), sonotrot ve malzeme bağlama mekanizması olmak üzere beş ana kısımdan oluşur (Flood, 1997; Kong, 2005). Şekil 6'da bir UEİ makinesinin genel görünümü ve bileşenlerine ait görüntüler verilmiştir.



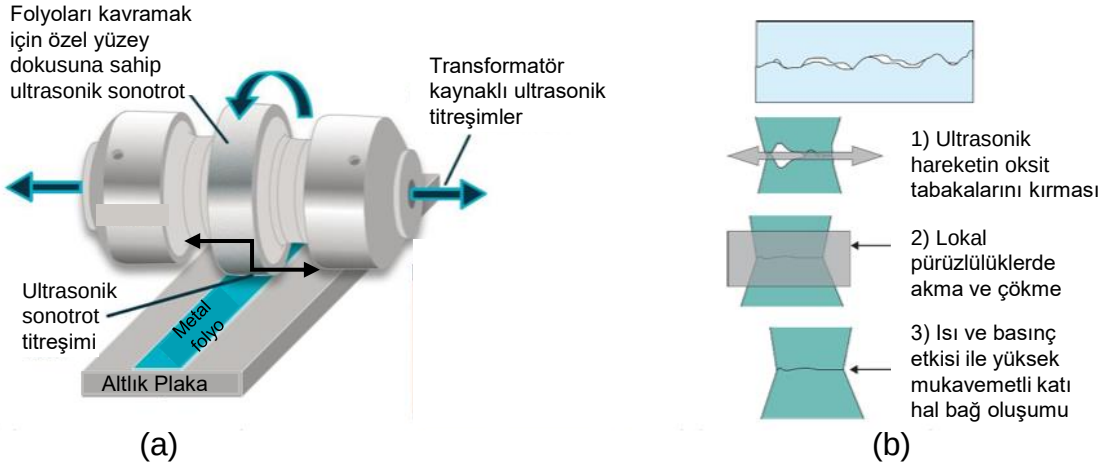
Şekil 6. a) Fabrisonic SonicLayer 4000 UEİ makinesi-9 kW genel görünümü (Wolcott et al., 2014), b) SonicLayer 4000 iç görünümü, c) SonicLayer 4000 ana bileşenleri (G. D. J. Ram, Yang, vd., 2007), d) Alpha 2 UEİ makinesi ve bileşenleri (Bournias-Varotsis et al., 2018)

1.4.2. UEİ yöntemiyle Bağ Oluşma Mekanizması

Literatürde ultrasonik metal kaynağının bağ oluşma mekanizması literatürde birçok araştırmacı tarafından çalışılmış ve dört esas mekanizmada fikir birliğine varılmıştır (Hazlett & Ambekar, 1970; Hulst, 1972; Joshi, 1971; G. D. J. Ram, Yang, vd., 2007). Bahsi geçen bu dört mekanizma, (1) mekanik kilitlenme (Yang vd., 2009), (2) arayüzey malzemelerinin ergimesi (Yang vd., 2009), (3) difüzyon (X. Cheng & Li, 2007; Gündüz vd., 2005a, 2005b; Ji vd., 2008; Matsuoka & Imai, 2009; Yang vd., 2009), (4) plastik deformasyon (az bir miktar difüzyon ile katı-hal metalürjik bağ oluşumu) (X. Cheng & Li, 2007; Kong vd., 2003; Kong & Soar, 2005; D. Li & Soar, 2008; Tuttle, 2007; Yang vd., 2009) olarak sıralanabilir.

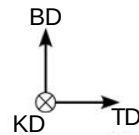
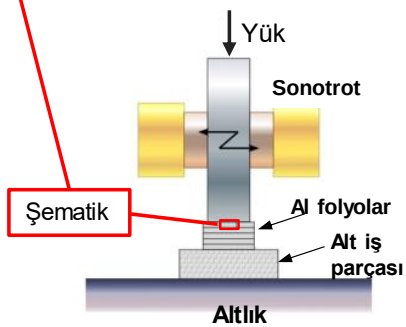
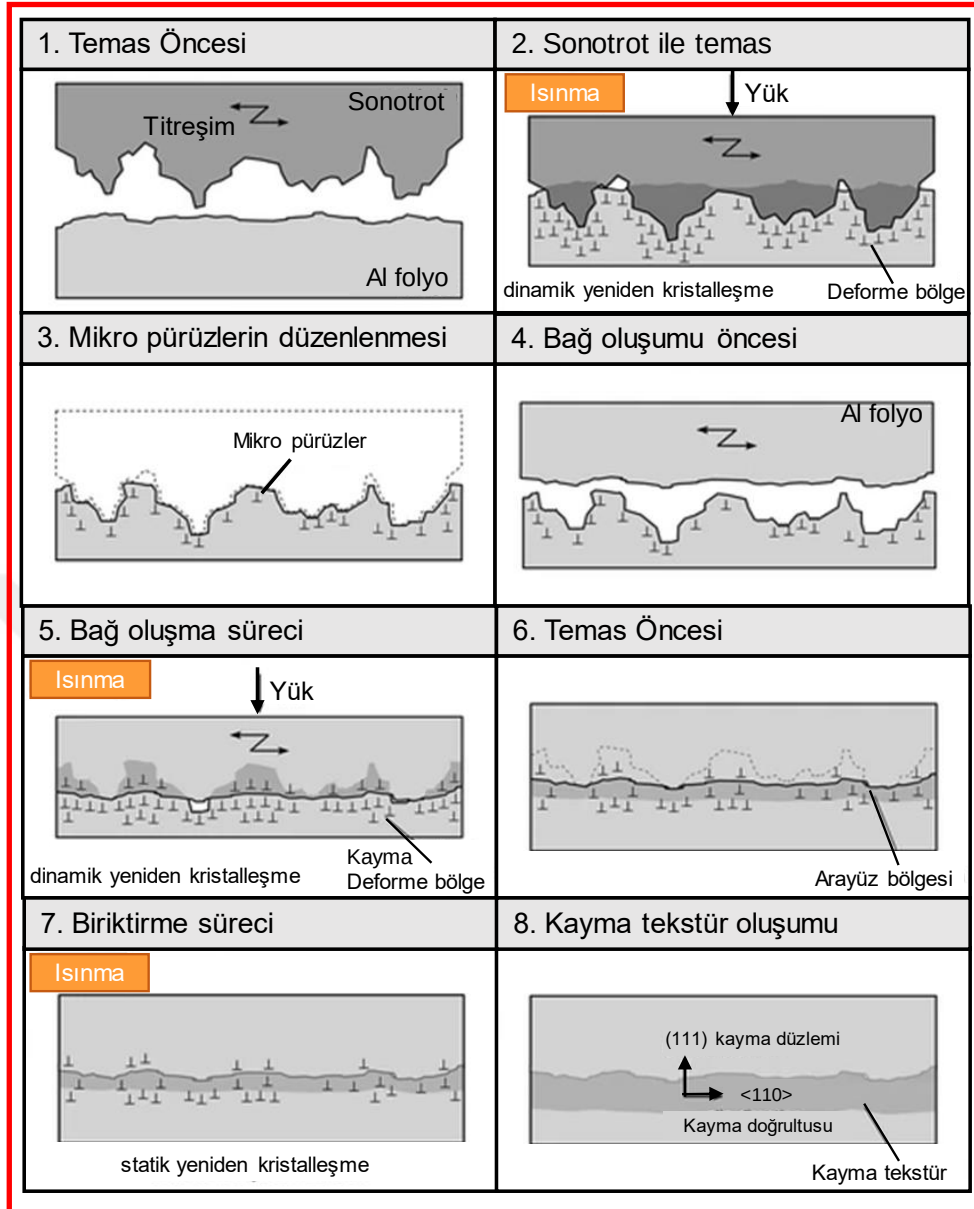
Mekanik kilitlenme mekanizmasında metal malzeme diğer metal içerisindeki düzensizliklerin içerisine doğru akar ve mekanik olarak buralara kilitlenir. Birleştirilen metallerinin arayüzeyinin ergimesi mekanizmasında ise eriyik metal arayüzeyde akar. Arayüzeyde atomik düzeyde kütle transferi ise difüzyon mekanizması olarak tanımlanmaktadır. Dislokasyon hareketlerinden kaynaklı metal matrisin akması ise plastik deformasyonu meydana getirir. Bağ oluşumu esnasında farklı mekanizmalar eş zamanlı olarak gerçekleşebilir ve bu mekanizmalar bir metal çiftinden diğerine farklılıklar gösterebilir (Sietins, 2014).

Ultrasonik birleşme esnasındaki bağ oluşumu mekanizması Şekil 7’da kısaca özetlenmiştir. Burada basınç etkisi altındaki iki yüzey sürtünme benzeri bir hareket ile ultrasonik olarak titreşir. Titreşim esnasında karşıt yüzeylerin mikro pürüzlülükleri arasında kaymaya ve plastik deformasyona neden olur, bu da yüzey oksitlerini ve kirleticileri dağıtır. Mikro pürüzlülükler çöktükçe, metal-metal teması artar ve folyoların yüzeyleri arasında ısı ve basınç etkisiyle katı hal bağ oluşur. Bu sayede metalürjik bağ oluşumu yüksek ısı ve ergimeye gerek kalmadan meydana gelir.



Şekil 7. Ultrasonik eklemeli imalatın şematik gösterimi, a) folyoların ultrasonik kaynaklanması, b) bağ oluşma mekanizması

UEİ işlemi esnasında birleştirilen tabakalar arasındaki mikroyapısal gelişim 8 aşama olarak Şekil 8’te şematik olarak detaylandırılmıştır. İşlem süresince, 1-3 aşamalarında üst folyo ile sonotrot arasındaki temas ile mikro pürüzlülükler şekillendirilir. Bu sayede sonotrot ile temas süresince deformasyon ve ısınma etkisi ile folyo yüzeyinde dinamik yeniden kristalleşme gerçekleşir. Ardından 4-6 aşamaları boyunca, önceki aşamada birleştirilen folyo üzerine bir yenisi birleştirilir. Bağ oluşum esnasında mikro pürüzlülüklerin kayma ile deforme olmasıyla dinamik yeniden kristalleşme oluşur. Deformasyon sebebiyle ortaya çıkan ısı UEİ işlemin gerçekleşmesine katkıda bulunur. Son olarak, folyolar arasında oluşan bölge ardışık folyoların ardışık olarak eklenip birleştirilmesi sırasında meydana gelen statik yeniden kristalleşmenin etkisiyle genişler (7-8 aşamaları).



BD: Biriktirme doğrultusu
KD: Kaynak doğrultusu
TD: Titreşim doğrultusu

Şekil 8. UEİ yöntemiyle birleştirilen Al-Al arasında kaynak bağı oluşumu esnasında mikroyapısal gelişimin şematik gösterimi, 1-3: folyo üst yüzeyinde mikro pürüzlerin oluşumu; 4-6: en üstteki iki metal folyo arasında bağ oluşumu; 7-8: ek metal folyoların biriktirilmesi işlemi (Fujii vd., 2011, 2017)

1.4.3. UEİ Yöntemi Üzerinde Etkin Parametreler

UEİ imalat yönteminde işlem ve tabakalar arası bağ kalitesini etkileyen birçok değişken vardır. Bu etkiler sistem değişkenleri ve malzeme değişkenleri olarak ikiye ayrılabilir (Gibert, 2009).

Yöntemi etkileyen sistem değişkenleri, kaynak hızı, titreşimlerin genliği, normal yük (basınç), sonotrot yüzeyinin dokusu (tekstür), alt plakanın sıcaklığı, elektrik güç çekimi ve makinenin direngenliği (stiffness) olarak sıralanabilir. Kaynak hızı, kaynağa verilen birim uzunluk başına enerji miktarını belirler. Titreşim genliği ise Malzemenin akma gerilmesi ve titreşim genliğinin büyüklüğüne bağlı olarak plastik şekil değişiminin zamanına ve deformasyon sertleşmesinin derecesinin belirlenmesinde etkindir. Normal yük folyo yüzeyindeki pürüzlükleri ütülerken (düzeltirken) bir yandan da sürtünme kuvvetinin ve onun etkisi ile ara yüzeyde meydana gelen gerilmeleri tayin eder. Sonotrotun yüzey dokusu metal folyo yüzeyindeki hasar miktarında etkilidir. Aşırı hasar tabakalar arası boşluklara sebebiyet verirken, sonotrotun dokulu olarak üretilmesi folyoya tutunmasını sağlar. Burada tutunmanın sürekli olması yani sonotrot ve folyo arasında hız farkı olmaması gerekir. Altlık sıcaklığı ise, mevcut gerilmeleri azaltırken plastik deformasyon kaynaklı deformasyon sertleşmesini azaltır ve difüzyonu iyileştirir (J. G. D. Ram vd., 2006). Öte yandan makinenin direngenliği, birleşen arayüzeye iletilen kuvvet miktarı ile doğrudan ilişkilidir.

Malzeme değişkenleri ise sırasıyla yüzey topoğrafyası, yüzeyde bulunan kir ve oksitler, direngenlik (geometri ve elastisite modülü) ve sertliktir. Malzemenin yüzey topoğrafyası pürüzlülükler esas alınarak başlangıç temas alanının miktarı dolayısıyla sürtünme ve normal gerilme değerlerini belirlenmesinde etkilidir. Metal-metal temasını engellediği için bağ oluşumunun gerçekleşmesi için yüzeydeki kir ve oksit tabakaları ortadan kaldırılmalıdır. Bağ arayüzeyindeki sürtünme kaynaklı direnç kuvveti ise doğrudan malzemenin direngenliği ile ilintilidir. Son olarak malzemenin sertliği folyolar arasındaki sürtünme katsayısını etkiler.

1.4.4. UEİ Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli imalat yöntemlerinin her biri birçok avantaj sağlamaktadır. UEİ yöntemi de göz ardı edilemeyecek kadar önemli faydalar sağlamaktadır. Ancak UEİ yönteminin diğer eklemeli imalat yöntemlerinin karşılayamayacağı üç önemli avantaj sunmaktadır.

Bunlardan birincisi “imkânsız” karmaşıklığıdaki geometrilere sahip iç kanallara sahip metal parçaların üretilmesidir (Siggard, 2007; Siggard vd., 2006). Uzay-havacılık uygulamalarında kullanılan birçok parça soğutma amacıyla iç kanallara ihtiyaç duyar. Ancak seçici lazer sinterleme gibi diğer eklemeli imalat yöntemleri ve kesinlikle talaşlı imalat (çıkarmalı) yöntemleriyle bu parçaların üretilmesi veya istenilen kalitede ve hassasiyette üretilmesi mümkün değildir. Öte yandan UEİ yöntemi ile karmaşık şekillerdeki kanallar istenilen hassasiyette bakır ve alüminyum malzemelerden üretilerek rahatlıkla ısı uzaklaştırılabilir.

UEİ yönteminin ikinci önemli avantajı ise farklı metalleri birbiri ile birleştirilebilmesidir (D Janaki vd., 2006). Bu yöntem ile imalat esnasında yüksek ısı oluşmadığından birleştirilen metallerin içyapısında herhangi bir değişim meydana gelmez. Bunun sonucunda, diğer eklemeli imalat yöntemlerinde gözlemlenen uyumsuzluklar ve kırılma kırılma yapılan meydana gelmez ve birbirine benzemeyen metallerin birleştirilmesinde kullanılabilir. Çok çeşitli kombinasyonlarda malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilmektedir. Ultrasonik birleştirme esnasında ortaya çıkan ısı miktarı Daniels’e (1965) göre birleştirilen ana malzemelerin ergime sıcaklığının %40’ını aşmamaktadır. Ultrasonik kaynaklı üretim esnasında ortaya çıkan ısının bakır içine gömülen ince film termokuplların veri okuma kabiliyetlerinde ve kalibrasyon değerlerinde herhangi bir kayba sebep vermediği görülmüştür (X. Cheng vd., 2007).

Yöntemin üçüncü önemli avantajı ise imalat esnasında üretilen parçaların içerisine çeşitli sensörler ve elektronik devreler gömülebilmesidir (X. Cheng vd., 2007; Hehr vd., 2018; Hehr & Dapino, 2015; Hehr & Norfolk, 2019; Kong vd., 2004b; D. R. White, 2003; Yang vd., 2007, 2009). Parçalar içerisine tüm bu hassas elemanların zarar görmeden, fonksiyonlarında ve kabiliyetlerinde herhangi bir kayba gömülmesinde üretim esnasında oluşan düşük ısı ve gerilme değerleri etkili olmaktadır. Diğer eklemeli imalat yöntemleri arasında bu UEİ yönteminin eşsiz bir kabiliyetidir. Sensörler, metal parça içerisinde istenilen konuma yerleştirilebilir ve bu şekilde üretilen parçaların hizmet esnasındaki sağlık durumu izlenebilmekte ve kontrolleri gerçekleştirilebilmektedir. Teknolojinin geliştiricisi D. R. White (2003) yılında yayınladığı çalışmada, UEİ yönteminin üretilen parçaların içerisine elektronik devre vb. hassas ve akıllı yapıların gömülebileceğini belirtmiştir. Bir başka çalışmada, şekil hafızalı alaşım (SMA) fiberler başarılı bir şekilde AA3003-H18 alaşımın içerisine gömülmüş ve matris ile SMA fiber arasındaki bağ oluşum incelenmiştir (Kong vd., 2004b). SiC fiberlerin AA3003 ve Cu içerisine UEİ yöntemiyle gömülebileceği Yang et al.

tarafından (2007, 2009a) ortaya konulmuş ve alüminyum ve bakır matrisler ile SiC fiberler arasında herhangi bir difüzyona veya kimyasal etkileşime rastlanmamıştır. Hehr et al. (2018), ise çalışmalarında çekme numunesi şeklinde ürettikleri AA6061 malzeme içerisine gömdükleri fiber optik birim şekil değişim (strain) sensörlerinin yük ölçme hassasiyetleri eş zamanlı olarak kullanılan birim şekil değişim ölçer (strain gage) kullanılarak değerlendirilmişlerdir. Fiber optik şekil değişim ölçerler elastik limitler içerisinde kaldığı sürece birim şekilde değişim ölçer ve literatür ile uyumluluk sergilemiştir. Alüminyum matris ile NiTi fiber arasındaki bağ üzerinde NiTi yüzey kalitenin etkisi incelendiğinde birleştirme işlemi başarılı olduğu halde uygulanan testlerde yüzey kalitesinden bağımsız olarak hasarın her zaman alüminyumda gerçekleştiği gözlenmiştir (Hehr & Dapino, 2015). Metal parça içerisine elektronik cihaz vs. gömebilme kabiliyeti sayesinde şekli, boyutu ve ağırlığı sabit olması ve çevresel etkilerden korunması istenilen “akıllı (smart)” yapıların üretilmesine de olanak tanımaktadır (Cham vd., 2002; X. Li & Prinz, 2003; Siggard vd., 2006).

Yöntemin bu üç ana madde yanında birçok avantajı mevcuttur (Clements, 2009; Delgado Camacho vd., 2018; J. George & Stucker, 2006a; Gibert, 2009; Lee vd., 2017; A. O’Brien, 1991; D. R. White, 2003). Bunlar sırasıyla:

- 1) İmalat esnasında düşük ısı etkisi nedeniyle sıvı metal, metal dumanı, kullanılan sarfın toz halinde olmadığı için insan sağlığına veya çevreye karşı yöntemin herhangi bir olumsuz bir etkisi yoktur.
- 2) Sarf metalin ergiyerek gerçekleştirildiği bir imalat yöntemi olmadığı için oksitlenme vb. problemleri önlemek için kullanılan bir koruyucu atmosfer gerekmemektedir.
- 3) Düşük sıcaklıklarda işlem gerçekleştirildiği ve imalat esnasında birleştirilen malzemelerin hacimsel olarak çok düşük miktarı metalürjik olarak etkilendiğinden enerji tüketimi birçok eklemeli imalat yöntemine nazaran çok daha düşüktür.
- 4) Üretim esnasında sıvı-katı dönüşümü meydana gelmemektedir. Dolayısıyla artık gerilmeler ve bu gerilmelerden kaynaklı boyutsal bir deformasyon miktarı minimum seviyededir. Bu da nihai ürünün boyutlarının eldesinde imalat sonrası gerekli işlem miktarı ve süresini azalmaktadır.
- 5) Biriktirilen hacim (tabaka) başına ısı girdisi düşük ve mevcut ısının dağılımı için gerekli olan süre diğer birçok eklemeli imalat yöntemine göre daha az olduğundan çok daha yüksek biriktirme oranlarına (hızı) ulaşılmaktadır.

- 6) UEİ (eklemeli), talaşlı imalat (eksiltmeli) ile bir araya gelerek hibrit bir üretim yöntemi olduğundan üretilen parçaların çözünürlük değerini ve yüzey kalitesini arttırmaktadır. Bu sebeple parçada imalat sonrası kumlama, zımparalama, frezeleme gibi ek işlemler gerektirmemektedir.
- 7) UEİ ile parça üretiminde kullanılan metal folyolar ticari olarak mevcut olduğundan ve düşük maliyetli olduklarından (alüminyum, çelik vb.) sarf maliyetleri metal tozu gerektiren diğer eklemeli imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha düşük maliyetlidir.

Ancak tüm bu üstün kabiliyetler başlangıç maliyeti gibi bir dezavantaj ile gelmektedir. Fabrisonics firmasının şu an itibarıyla ürettiği en küçük UEİ makinesi 200,000 dolar civarında bir fiyata mal olmaktadır (Şekil 5’de soldaki makine).

1.4.5. Ultrasonik Olarak Kaynaklanabilir Malzemeler

Ultrasonik olarak kaynaklanabilir malzemeler büyük çeşitlilik göstermektedir. Birbiri ile aynı ve farklı olan metaller ile birlikte polimer ve polimer kompozit malzemeler ultrasonik olarak kaynaklanabilir iken metaller seramiklere ve metaller polimerlere kaynaklanabilmektedir (Balle vd., 2007; Daniels, 1965; M. Jacobs, 2007; Jones & Powers, 1956; S. Krüger vd., 2004; Kuckert vd., 2003). Ultrasonik kaynak yöntemiyle ince sac malzemeler birbirine ve tel malzemeler saclara ve plakalara kaynatılabilmektedir.

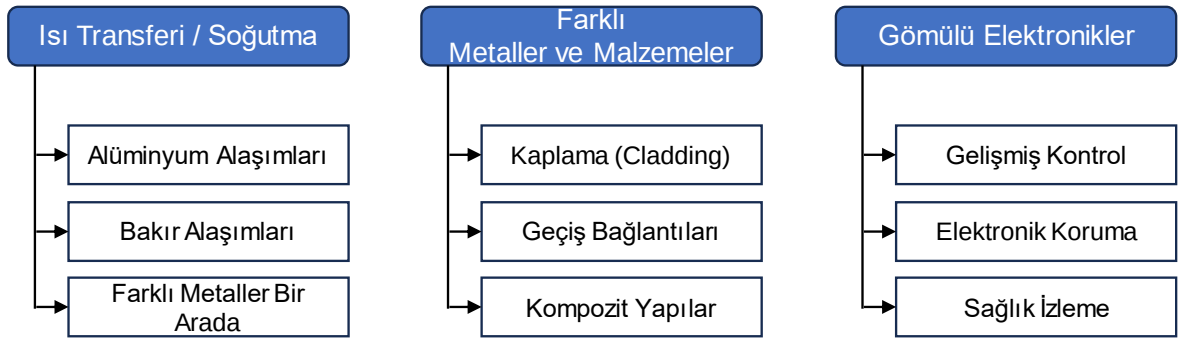
Birbirinden farklı metal folyoların ultrasonik birleştirilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Sridharan, Wolcott, vd., 2016; Stucker vd., 2010; Truog, 2012). G. D. J. Ram et al. (2007) bakır, pirinç, nikel, inconel, AISI 347 paslanmaz çelik tel ağ ve AA2024 alüminyum alaşımının her birinin ayrı ayrı AA3003 H18 alüminyum alaşımı ile kaynaklanabilirliği ispatlamışlardır. Obielodan & Stucker (2009) molibden, titanyum, bakır, alüminyum alaşımları (AA1100, AA3003, AA6061), gümüş, tantal, nikel farklı malzeme çiftlerinin ultrasonik birleştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Domack & Baughman (2005) titanyum ve nikelin ultrasonik birleştirilmesi için de çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bir başka çalışmada ise çelik ve alüminyum malzemeler ultrasonik olarak başarılı bir şekilde birleştirilmişlerdir (Sridharan vd., 2017).

O’Brien (1991) tarafından hazırlanan çalışmadaki ultrasonik olarak kaynaklanabilir ikili metal malzeme kombinasyonları Şekil 9’te verilmiştir.

	Al	Be	Cu	Ge	Au	Fe	Mg	Mo	Ni	Pd	Pt	Si	Ag	Ta	Sn	Ti	W	Zn
<i>Al Alaşımları</i>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Be Alaşımları</i>	●	●			●											●		
<i>Cu Alaşımları</i>	●		●		●	●	●	●	●	●	●		●	●		●	●	●
<i>Ge</i>				●							●							
<i>Au</i>	●	●						●	●	●	●	●	●			●	●	●
<i>Fe Alaşımları</i>	●					●		●	●	●	●		●	●		●	●	●
<i>Mg Alaşımları</i>							●						●			●		
<i>Mo alaşımları</i>								●	●		●			●		●	●	●
<i>Ni Alaşımları</i>									●	●	●			●		●	●	
<i>Pd</i>										●			●	●				
<i>Pt alaşımları</i>											●	●		●		●	●	
<i>Si</i>												●	●					
<i>Ag Alaşımları</i>													●	●				●
<i>Ta Alaşımları</i>														●		●	●	
<i>Sn</i>															●			
<i>Ti Alaşımları</i>																●	●	
<i>W Alaşımları</i>																	●	
<i>Zn Alaşımları</i>																		●

■ UEİ yöntemiyle birleştirilmiş
● Ultrasonik metal kaynağı ile birleştirilmiş

Şekil 9. Ultrasonik metal kaynağı ve ultrasonik eklemeli imalat yöntemi ile kaynaklanabilir malzeme çiftleri (A. O'Brien, 1991; D. R. White, 2003)

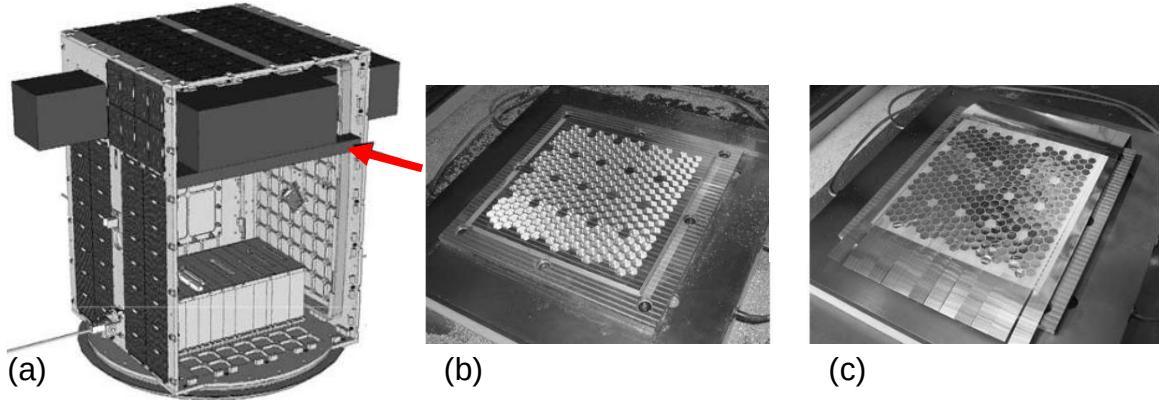


Şekil 10. UEİ yönteminin ana uygulama alanları (Hehr & Norfolk, 2019)

1.5. UEİ Uygulamaları

UEİ yönteminin ana uygulama alanları Şekil 10'da şematize edilmiştir. UEİ yöntemi, eklemeli imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında göreceli olarak yeni bir eklemeli imalat yöntemi olmasına ve henüz ASTM ve ASME vb. kuruluşlar tarafından henüz standartlaştırılmamış olsa da endüstriyel ve ticari uygulamalardaki önemi birçok uzay havacılık firması tarafından dikkat çekmektedir.

UEİ yönteminin uzay-havacılık uygulamalarında kullanıldığı bir diğer örnek ise yapısal bir parça olan uydu paneli (satellite decking) verilebilir (J. L. George, 2006; J. George & Stucker, 2006b). Bu çalışmalar kapsamında hekzagonal bir karmaşık yapıya sahip ve hafifletilmiş bir uydu paneli başarılı bir şekilde üretilmiş ve endüstriyel olarak uygulanabilirliği ispat edilmiştir (Şekil 11). Yöntemin uydulardaki bir başka kullanımı da veri aktarımını sağlamakta kullanılan USB girişlerinin alüminyum içerisine ultrasonik birleştirme ile yerleştirilmesidir (Siggard vd., 2006).



Şekil 11. (a) TOROID uzay aracının basitleştirilmiş görünümü, b) uydu panelinin talaş kaldırılmış bal peteği iç yapısı, c) bal peteği iç yapısı üst kapamasının ultrasonik birleştirilmiş ilk tabakası (J. L. George, 2006; J. George & Stucker, 2006)

1.6. Metal İntermetalik Laminat

İntermetalikler iki metal arasında meydana gelen bileşiklerdir. Kristal yapıları ve özellikleri ana malzemelerden farklıdır (Sauthoff, 2008). İntermetalikler oluştuktan sonra deformasyon şekillerinde değişim meydana gelir. Bunun sonucunda yüksek sıcaklıklarda mukavemet artışı, süneklik ve kırılma tokluğunda azalma ile sonuçlanır (Lütjering & Williams, 2007). İntermetalik bileşiklere örnek olarak TiAl, NiAl ve FeAl bileşikleri

verilebilir. Bu çalışma kapsamındaki titanyum alüminitler düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek direngenlik ve iyi korozyon, sürünme ve oksidasyon direnci sergilerler (Doychak, 1992; Kothari, 2010; Stoloff vd., 2000).

1.7. UEİ Yönteminin Mekanik Özellikler ile İlişkisi

1.7.1. Mukavemet Özellikleri

Tabakalı yapılar ilk olarak yumuşakça gibi biyolojik yapılarda gözlemlenmiştir. Zayıf bileşenlerden oluşmalarına rağmen, bu kabuklar üstün mekanik özellikler sergilemişlerdir. Kabuklardaki bu tabakalı mikro yapıdan ilham alan insanlar kılıç gibi kesici aletleri çok eski zamanlardan itibaren tabakalı metal yapılar şeklinde üretmişlerdir (Lesuer vd., 1996). Tabakalı metal kompozitler (TMK) kompozit malzemelerin benzersiz bir örneği olmakla birlikte, dönüşümlü olarak metal ve/veya metal içerikli tabakaların ayırık arayüzeylerde birleştirilmesiyle üretilirler.

AA2024 folyolardan ultrasonik birleştirilmiş Al/Al numunelerin çekme testlerinden elde gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri sac halindeki AA2024'ün gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ile karşılaştırıldığında Al/Al tabakalı plakanın akma eğrisinin AA2024'e göre daha düşük gerilme değerlerinde seyrettiği görülmektedir (He vd., 2015). Farklı tabaka sayılarına sahip alüminyum altlıklı Al+TiAl tabakalı metal kompozit plakaların farklı deformasyon hızlarında ve sıcaklıklardaki çekme testlerinin sonuçları ise Kaya vd. (2018) tarafından raporlanmıştır. Çalışma sonucunda titanyum ve alüminyumun ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıktan dolayı yüksek sıcaklıklardaki numunelerde kopma bölgelerinde eğrisel bir yapı meydana gelmiştir. Ayrıca, artan titanyum miktarı ile Al+Ti/Al numunelerin genel olarak mukavemet değerlerinde de artış görülmüştür. Bir başka çalışmalarında, Kaya vd. (2019) bu sefer altlık olmadan Ti/Al tabakalı metal kompozit plakaların yine farklı deformasyon hızlarında çekme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Artan deformasyon hızı ile mukavemet değerlerinin tabaka sayısından bağımsız olarak arttığı görülmüştür. Mekanik özelliklerin yöne bağlı değişimlerinin de incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur (Sridharan, Gussev, vd., 2016). Sridharan, Gussev, vd. (2016) AA6061 folyodan üretilen malzemelerden farklı doğrultularda alınan numuneler çekme testine tabi tutmuşlardır. Folyo ekleme yönünde gevrek kırılma davranışı gözlemlerlerken, bu yöne dik doğrultuda AA6061'in sac haline nazaran mukavemet değerlerinde düşüş gözlemlemişlerdir. Bir başka

çalışmada ise saf demir ile alüminyum (Fe/Al) ve saf alüminyum ile karbon çeliği (Al/St) ultrasonik eklemeli olarak birleştirilmiştir (Wang vd., 2020). Saf alüminyumun ve demirin çekme dayanımları sırasıyla 121 MPa ve 246 MPa iken Al/Fe tabakalı kompozitin çekme dayanımı 263 MPa olarak ölçülmüştür. Öte yandan karbon çeliğin çekme dayanımı 323 MPa iken Al/St tabakalı kompozitin çekme dayanımı 357 MPa olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla birleştirme sonrasında elde edilen tabakalı metal kompozitlerin çekme dayanımlarında onları oluşturan tabakaların saf hallerine göre daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir.

1.7.2. Sertlik Özellikleri

UEİ yöntemine ait temas basıncı, titreşim genliği ve kaynak hızı gibi parametrelerdeki değişimin sertlik üzerindeki etkileri ilk defa Kong vd. (2005) tarafından ortaya konmuştur. AA6061 folyoların ultrasonik birleştirilmesi ile gerçekleştirdikleri çalışmada kaynak arayüzündeki sertlik değerinde, temas basıncı ve titreşim genliği ile artış görülürken, kaynak hızındaki artış ile bu değer azaldığı gözlenmiştir. Titreşim genliğinin AA3003-H18'in sertliği üzerinde uygulanan kuvvetten daha etkili olduğu yine literatürde gözlemlenen bir sonuçu (Sojiphan, 2015). Bir başka çalışmada alüminyum ve amorf folyoların ultrasonik olarak birleştirilmesi sonrasında tabakalı yapıda sertlik değerinin ciddi miktarda arttığı gözlenmiştir (Wang vd., 2019). Sertlik değerinin arayüzeyde özellikle amorf tabaka tarafında daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Han vd. (2020) ise çalışmalarında ultrasonik birleştirme sonrasındaki ısıtıl işlemin sertlik değeri üzerinde incelemeler gerçekleştirmişlerdir. SS410 paslanmaz çelik folyoların kaynak öncesi 3.55 GPa olan sertlik değerinin ultrasonik birleştirme sonrasında uygulanan ısıtıl işlemin etkisi ile 3.68 GPa değerine yükseldiğini raporlamışlardır. Ti-Al birleştirildiği bir başka çalışmada Ti-Al arayüzüne yakın alüminyum tabakanın sertliğinin alüminyum tabakanın merkezinin sertlik değerinin 50 HV üzerinde yaklaşık 130 HV olarak ölçüldüğü gözlemlenmiştir (Obielodan vd., 2011). Buna sebep olarak ultrasonik birleştirme esnasında meydana gelen deformasyon sertleşmesinin etkin olduğunu belirtmişlerdir.

1.7.3. Tokluk Özellikleri

UEİ yöntemiyle üretilen malzemelerde önem arz eden bir diğer özellik ise tokluk davranışdır. He vd. (2015), yaptıkları çalışmada AA2024/AA2024 lamine malzemenin kırılma tokluğunun AA2024 monolitik yapıdan daha fazla olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bunda kırılma yüzeylerindeki meydana gelen önemli miktardaki tabakalar arası ayrılmanın etkili olduğu kırılma yüzeylerinde yapılan taramalı elektron mikroskobu incelemeleriyle belirlenmiştir.

1.7.4. Şekillendirilme Kabiliyeti

Ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle üretilen malzemelerin şekillendirilebilirlikleri ile alakalı çalışmalar sınırlı sayıdadır (Kaya vd., 2018, 2019). Kaya vd. çalışmalarında ultrasonik eklemeli imalat ile üretilmiş farklı sayıda tabakalardan oluşan Ti-Al tabakalı kompozit plakaların hidro şekillendirilmesi (hidrolik şişirme: hydraulic bulging) üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Kaya vd., 2018, 2019). İlk çalışmalarında (Kaya vd., 2018), titanyum ve alüminyum folyoların alüminyum altlık plaka üzerine ultrasonik birleştirilmesi ile üretilen plakaları hidroşekillendirmişlerdir. İkinci çalışmalarında ise (Kaya vd., 2019), altlık plaka kullanmadan sadece titanyum ve alüminyum folyoların ultrasonik birleştirilmesi ile üretilmiş Ti-AL tabakalı metal kompozit plakaları hidroşekillendirmişlerdir. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirdikleri hidroşekillendirme deneylerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ile çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerini karşılaştırmışlardır. Hidroşekillendirme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden daha yüksek şekil değiştirme oranları elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek şekillendirme miktarı ise 200 °C sıcaklıkta gerçekleşmiştir.

1.8. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma kapsamında, Ti-Al TMK plakaların akma mukavemeti, çekme mukavemeti, toplam uzama gibi mukavemet özelliklerinin belirlenmesinde çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, aynı zamanda farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilerek deformasyon hızının ve farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilerek sıcaklığın Ti-Al TMK plakaların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemede kullanılmışlardır. Yine deformasyon hızının ve sıcaklığın Ti-Al TMK plakaların şekillendirilmesi üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde ise Erichsen çökme testinden faydalanılmıştır. Ti-Al TMK ve bunların basınç etkisi altında ısıtılma tabi tutulması ile elde edilen MİL plakaların iç yapılarının incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılım spektroskopisi ve X-ışını kırınım ölçer kullanılmıştır. Deformasyon davranışlarının incelenmesinde ise üç nokta eğme, çentik darbe testleri, statik-eşdeğer

delinme ve düşük hızlı darbe testlerinden yararlanılmıştır. Yüksek hızlardaki mekanik özelliklerin belirlenmesinde ise Split-Hopkinson çekme çubuğu testi kullanılmıştır.

1.9. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, genel olarak ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti-Al tabakalı metal kompozit plakaların uzay-havacılık uygulamalarında kullanılabilirliğini araştırmak, deformasyon ve şekillendirilebilme davranışlarını deneysel ve sayısal olarak incelemektir.

1.10. Çalışmanın Özgünlüğü

Literatürde UEİ yöntemiyle üretilen numuneler üzerinde yapılan çalışmalar detaylıca incelendiğinde çalışmaların kapsamının tabakalar arasındaki bağın mikro yapısı ve bu bağın dayanımı üzerine gerçekleştirilmiş olduğu görülmektedir. Öte yandan bu yöntem ile üretilen nihai malzemelerin makro boyutta ve uygulamadaki mekanik özellikleri, deformasyon ve şekillendirilebilme davranışları üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bu tez çalışması süresince yukarıda belirtilen özellik ve davranışlar üzerine detaylı bir karakterizasyon gerçekleştirilerek detaylı bir sonuçlar ortaya konulmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deney Malzemeleri

Bu tez çalışması kapsamında, ultrasonik eklemeli imalat (UEİ) yöntemiyle üretilmiş Ti-Al tabakalı metal kompozit (TMK) plakalar kullanılmıştır. İncelenen TMK plakalar 5 çift ve 7 çift tabakalı olmak üzere iki şekilde ele alınmıştır. Bu 5 ve 7 çift TMK plakaların tabakaların istiflenme düzeni ve imalat parametreleri “Ultrasonik Eklemeli İmalat Yöntemiyle Plaka Üretimi” başlıklı bölüm içerisinde detaylandırılmıştır.

Ti-Al TMK plakaların mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı bir değerlendirilmesini yapabilmek amacıyla yine bu TMK plakaların imalatında kullanılan titanyum ve alüminyum folyolar ile aynı kimyasal bileşimdeki ticari saflıktaki titanyum (CP1-Ti – grade 1) ve alüminyum (AA 1100-O) saclar da çalışmaya dahil edilmiştir. Değerlendirmenin anlamlı olabilmesi amacıyla titanyum ve alüminyum saclar 1.5 mm kalınlığında tedarik edildi. Bu kalınlık değeri yaklaşık olarak 5-TMK’nın kalınlığına eşdeğerdir.

CP1-Ti, AA 1100-O ve TMK plakaların yanı sıra TMK plakaların basınç etkisi altında ısıtılma işlemi sonucunda elde edilen metal intermetalik laminat plakalar da çalışma kapsamında incelenmeye alınmıştır. Bu metal intermetalik laminat plakaların üretimi ile alakalı detaylar “Metal İntermetalik Laminat Üretimi” başlığı altında verilmiştir.

2.2. Ultrasonik Eklemeli İmalat Yöntemiyle Plaka Üretimi

Bu çalışmada, ultrasonik eklemeli imalat (UEİ) yöntemiyle üretilmiş 5 ve 7 çift tabakalı Ti-Al TMK (5-TMK ve 7-TMK) plakalar kullanıldı. Plakaların üretiminde 127 µm kalınlığında, ticari saflıkta titanyum (CP1-Ti) ve alüminyum (AA1100-O) folyolar kullanılmıştır. Folyo malzemelere ait kimyasal bileşimler Tablo 1’de verilmiştir. Bu folyolar sıralı bir şekilde üst üste dizilerek ultrasonik olarak birleştirilmişlerdir. Bu birleştirme işlemine ait şematik görünüm Şekil 12-a’da verilmiştir. Şekil 12-b ve c’de 5 çift ve 7 çift TMK plakaların kesit görünümü ve tabakaların dizilişleri detaylandırılmıştır. Her bir plaka 150x150 mm² ebatlarında iken 5-TMK ve 7-TMK plakalar için kalınlıklar sırasıyla 1.397 mm ve 1.905 mm şeklindedir. UEİ yöntemiyle birleştirilen bu titanyum ve alüminyum folyolar üst üste istiflenirken her biri haddeleme doğrultuları aynı yönde olacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Ultrasonik birleştirme işleminde sonotrot hareket yönü de yine

folyelerin haddelendirme doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Folyolar birleştirilirken ilk önce altlık (örs) üzerine Ti-Al-Ti şeklinde üç folyo üst üste istiflenmiş ve daha sonra ultrasonik prob yardımıyla ultrasonik olarak birleştirilmiştir. Ardından istenilen çift tabaka sayısı elde edilene kadar Al-Ti şeklinde folyo çiftleri art arda eklenerek yine ultrasonik olarak birleştirilmiştir. Bu birleştirme işlemi sırasında kullanılan UEİ parametreleri Tablo 2’de detaylandırılmıştır. Üretilen TMK plakalar UEİ işlemin ardından titanyum ve alüminyum tabakalar arasındaki bağ kuvvetini arttırmak amacıyla üç saat boyunca 480 °C sıcaklıkta atmosfere açık bir fırında ısıtılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Tüm bu imalat işlemleri Solidica Inc. (Ann Arbor, MI, USA) firması bünyesinde gerçekleştirilmiş olup üretilen tabakalı plakalar tarafımıza akademik çalışmalarda kullanılmak üzere bedelsiz olarak temin edilmiştir.

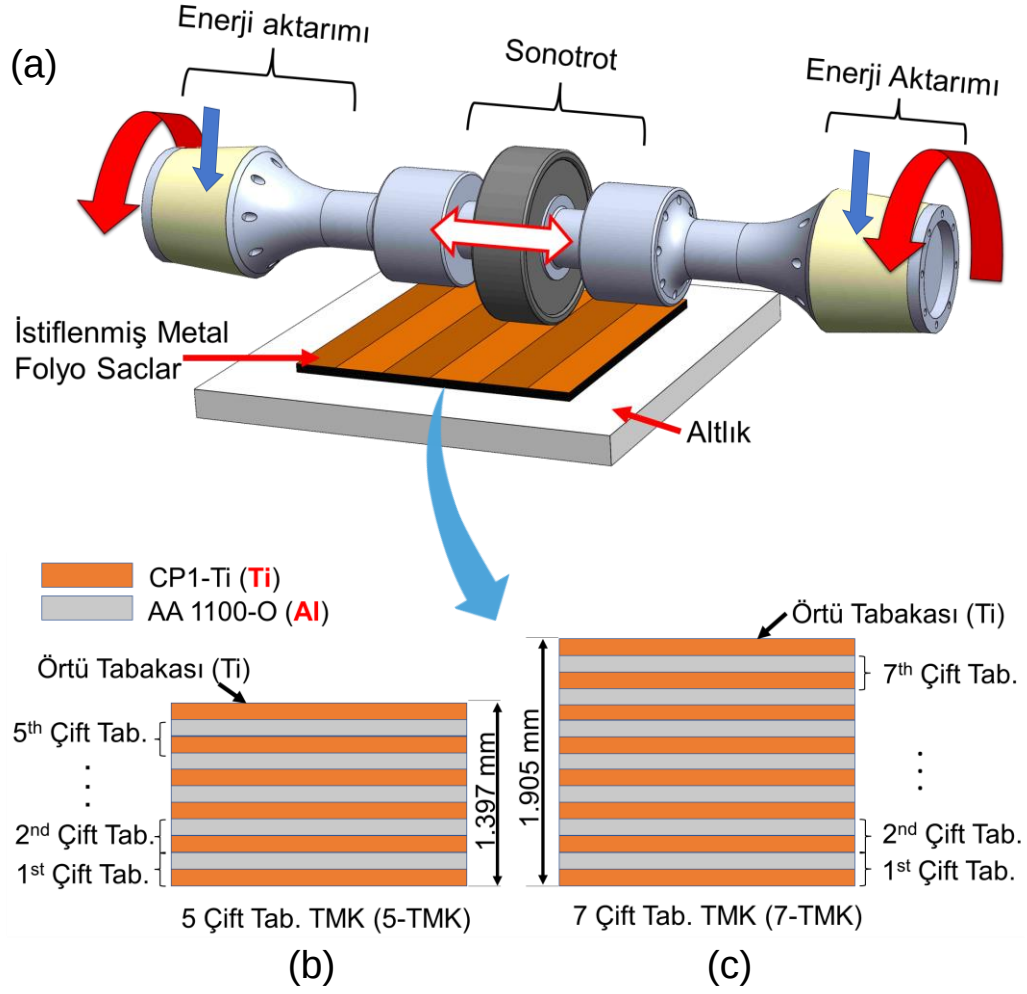
Bu metin içerisinde bu bölümden itibaren 5 çift tabakalı ve 7 çift tabakalı metal kompozit plakalar sırasıyla 5-TMK ve 7-TMK olarak tanımlanacaktır. 5-TMK ve 7-TMK plakaların üretiminde kullanılan titanyum ve alüminyum ise CP1-Ti ve AA1100-O olarak adlandırılacaktır.

Tablo 1. Ti-Al TMK imalatında kullanılan ticari saflıktaki folyelerin kimyasal bileşimleri

Malzeme		Ağırlıkça % Oranları				
CP-Ti	Ti	C	Fe	H	N	O
	Kalan	0.1	0.2	0.015	0.03	0.18
Al 1100	Al	Si+Fe	Cu	Zn	Mn	Be
	Kalan	0.95	0.05-0.2	0.1	0.05	0.02

Tablo 2. Titanyum-alüminyum tabakalı numunelerin UEİ yöntemiyle üretim parametreleri.

Kaynak Kuvveti [N]	Kaynak Genliği [μm]	Kaynak Besleme Hızı [mm/dk]	Isıtma Plakası Sıcaklığı [°C]
1000	25	254 (10 in/min)	232 (450 °F)



Şekil 12. a) Ultrasonik eklemeli imalat yönteminin şematik gösterimi ve çalışma kapsamında kullanılan b) 5 çift tabakalı metal kompozit (5-TMK) ve c) 7 çift tabakalı metal kompozit (7-TMK)

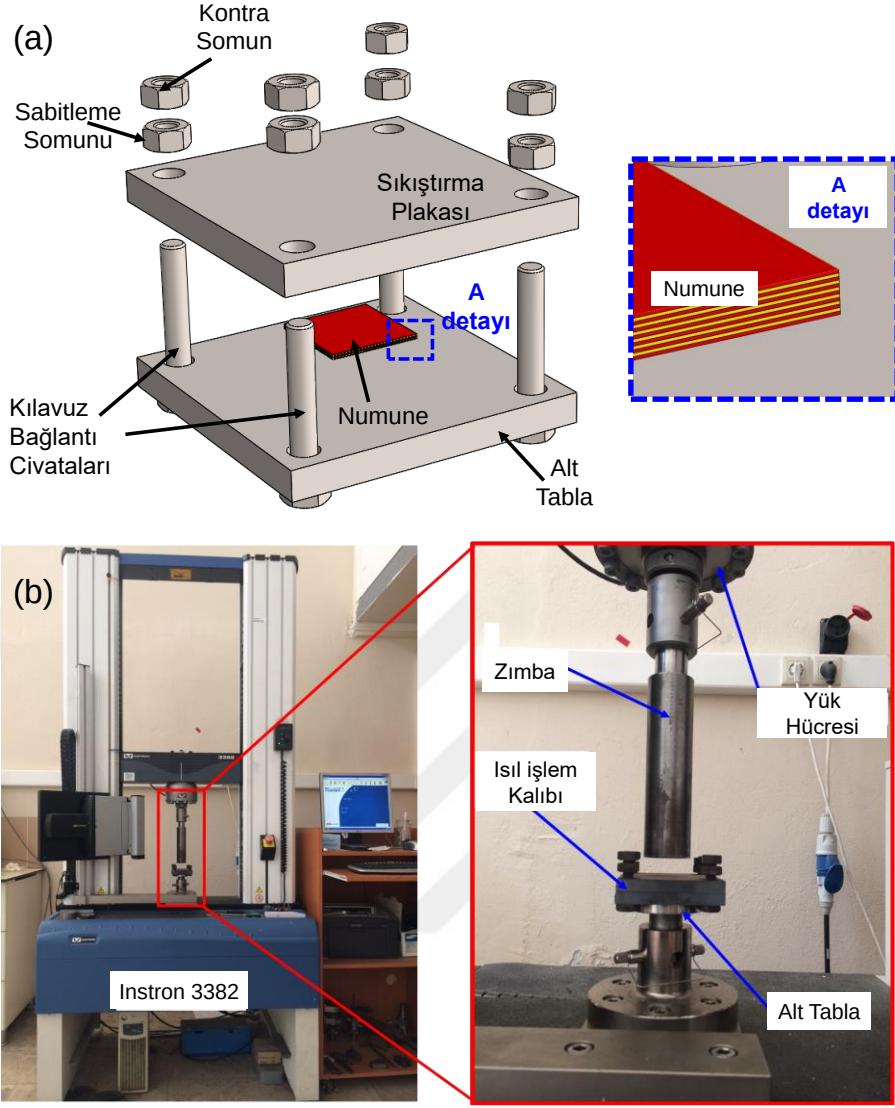
2.3. Metal İntermetalik Laminat Üretimi

UEİ yöntemiyle üretilen 5-TMK ve 7-TMK plakalardan hazırlanan bazı numuneler basınç etkisi altında farklı sıcaklıklarda ısıl işleme tabi tutulmuşlardır. Isıl işlem için hazırlanan numuneler 10 mm kalınlığında iki paslanmaz çelik arasında yerleştirilmiş ardından istenen basınç değeri elde edilinceye kadar universal bir çekme-basma test cihazında yük altına alınmıştır. Hedef basınca ulaşıldığı anda çelik plakalar 4 köşeden cıvatalar ile sabitlenmiştir. Basınç altındaki numuneler açık atmosferli bir ısıl işlem fırınında ısıl işleme tabi tutulmuştur. Tüm numuneler 10 MPa basınç altında sıkıştırılırken, ısıl işlem sıcaklıkları literatürdeki referans çalışmalar dikkate alınarak 575 °C ve 600 °C olarak belirlenmiştir

(Tablo 3). Bu işlem ile TMK numunelerin titanyum ve alüminyum tabakaları arasında difüzyon gerçekleştirilerek $TiAl_3$ intermetalik ara tabakalar oluşturulmuştur. Farklı kalınlıklarda intermetalik faz tabakaları oluşturmak amacıyla farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ısıt işlemlerin süresi 6-36 saat arasında 6'şar saatlik adımlarla değiştirilmiştir. Isıt işlem sonrasında oluşan bu yapı metal intermetalik laminat (MİL) olarak adlandırılmaktadır. Isıt işleme tabi tutulan 5-TMK ve 7-TMK numuneler 5-MİL ve 7-MİL olarak adlandırılmıştır. Deneyler ve raporlama esnasında bu adlandırılmaların yanına ek olarak hangi sıcaklık ve sürede ısıt işlem tabi tutulduklarını belirten ifadeler de eklemiştir. Örnek vermek gerekirse; 5-MİL-600C-12h tanımlaması 5-TMK numunenin 600 °C sıcaklıkta 12 saat süresince ısıt işlem tabi tutulması anlamına gelmektedir.

Tablo 3. Metal İntermetalik Laminat (MİL) plaka üretiminde kullanılan parametreler

Malzeme	Sıcaklık (°C)	Basınç (MPa)	Zaman (saat)
5-TMK, 7-TMK	575, 600	10	6,12,18,24,30,36



Şekil 13. TMK numunelerin ısıl işlem öncesi basınç altına alınması işlemi, a) ısıl işlem kalıbı ve bileşenleri, b) basınç uygulama işlemi (üniversal çekme-basma test cihazı ile)

2.4. İç Yapı İncelemeleri

Metalografi numuneleri hem UEİ yöntemiyle üretilen 5-TMK ve 7-TMK plakalardan hem de bu plakalardan ısıl işlem sonucunda elde edilen metal intermetalik laminat (MİL) numunelerden çıkarıldı. Metalografi numuneleri kalınlık boyunca tel erozyon yardımıyla çıkarıldı ve bakalite alındı. Ardından, bakalite alınan metalografik numuneler sırasıyla 600, 800, 1000 ve 1200 grit zımpara kağıtları ile zımparalandı. Takiben, uygun bir çuha üzerinde $1\ \mu\text{m}$ boyutundaki alümina (Al_2O_3) çözeltisi kullanılarak numune yüzeyleri iyice parlatıldı. Parlatılan bu numuneler daha sonra Carl Zeiss model bir metal mikroskop (OM) ile

incelendi. Isıl işlem öncesi ve sonrasında tabakaların ve tabakalar arasında oluşan fazların kalınlıkları optik mikroskop yardımıyla ölçüldü. Mikro yapı resimleri Jeol JSM-6400 (JEOL Ltd., Tokyo, Japonya) model bir taramalı elektron mikroskobu, TEM (scanning electron microscopy: SEM) kullanılarak 15V çalışma geriliminde ve ikincil elektron (secondary electron) ve geri saçılan elektron (back-scattered electron) yöntemleriyle farklı büyütme değerlerinde incelendi. Isıl işlemlerin ardında tabakalar arasında oluşan intermetalik fazın analizi Malvern PANalytical X'pert (Malvern Panalytical Ltd., Malvern, İngiltere) model bir X-ışını kırınım ölçer, XKÖ (X-ray diffractometry: XRD) ile incelendi. XRD analizi gerçekleştirilirken ölçüm işlemleri Cu-K α ışınımı, 40 kV çalışma gerilimi ve 40 mA akımı etkisi altında 1°/dk ölçüm hızında ile 20-90° açıları arasında gerçekleştirildi. XRD analizi sonucunda belirlenen fazlara ait kimyasal özellikleri (fazdaki titanyum ve alüminyum dağılımı) elektron mikroskobu ile bütünleşik olarak çalışan iXRF (IXRF Inc., Austin, TX, ABD) model elektron dağılımlı spektrumu (EDS: electron dispersive spectroscopy) yardımıyla ortaya konuldu.

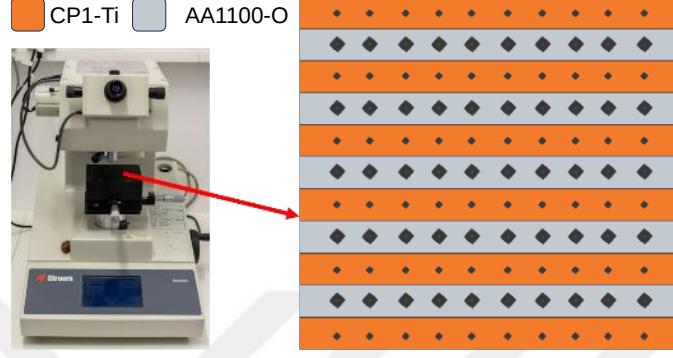
2.5. Mekanik Özellik İncelemeleri

2.5.1. Sertlik Testleri

Sertlik deneyleri Duramin 3 yazılımı ile kullanılan Struers (Struers Inc., Cleveland, OH, ABD) marka bir sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinin yapılabilmesi için hem 5-TMK hem de 7-TMK plakalardan kalınlık yönünde hassas kesme cihazı ile numuneler çıkarılıp bakalite alındı. Ardından ölçüm alınacak yüzeylerde standart metalografi zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirildi. Parlatma işlemin ardından sertlik ölçümleri TMK numunelerin kalınlıkları boyunca her bir Ti ve Al tabakadan eşit aralıklarla birbirini takip edecek şekilde 10 tekrar olarak gerçekleştirildi. Batıcı uca 10 saniye bekleme süresi boyunca 100 g basma yükü uygulanarak Vickers sertlik (HV_{0.1}) değerleri elde edildi. Sertlik ölçümleri TMK'ların yanı sıra imalatlarında kullanılan 127 μ m kalınlığındaki Ti ve Al folyolar için de gerçekleştirilmiştir.

TMK numunelere basınç etkisi altında uygulanan ısıl işlemin ardından ortaya çıkan MİL numuneler üzerinde yine sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Burada hem ısıl işlemin sonrasında geriye kalan Ti ve Al tabakaların sertliklerindeki değişimler hem de bu tabakalar arasında oluşan intermetalik fazın sertlik değerleri yine yukarda belirtilen prosedürler takip

edilerek belirlenmiştir. Bu şekilde hem ana malzemenin (TMK) her bir tabakasının sertlik değeri ve ısıtılma işlem sonrasında oluşan intermetalik fazın (MİL) sertlik seviyelerinde meydana gelen değişimler belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca kesit boyunca bir sertlik haritası çıkarılmıştır.

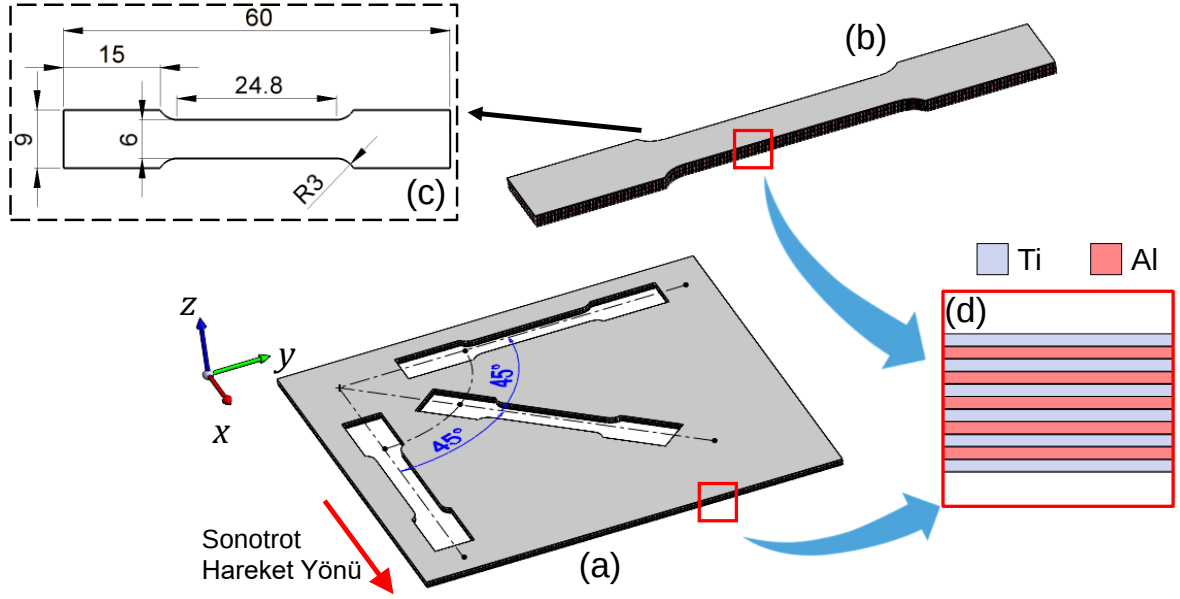


Şekil 14. a) Mikro sertlik test cihazı, b) TMK plakasının kesiti boyunca her bir tabakadan alınan sertlik ölçümü şematik gösterimi

2.5.2. Çekme Testleri

Çekme testinde kullanılan numuneler tabakalı metal kompozit plakalardan Şekil 15-a'da görüldüğü şekilde sıcaklığın malzeme özellikleri üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla tel erozyon yardımıyla çıkartıldı. ASTM E08-15 standardına göre küçültülmüş çekme numunesine ait geometrik boyutlar Şekil 15-c'de verilmiştir. Çekme deneyleri, UEİ yöntemiyle üretilmiş 5-TMK, 7-TMK plakalar yanı sıra karşılaştırma yapmak amacıyla CP1-Ti ve AA 1100-O numunelere uygulandı. Oda sıcaklığındaki çekme deneyleri dört farklı deformasyon hızında (0.001 s^{-1} , 0.01 s^{-1} , 0.1 s^{-1} ve 1 s^{-1}) haddeleme doğrultusunda (HD) gerçekleştirilerek deformasyon hızının malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışıldı. Haddeleme doğrultusuna (HD) göre 45° ve 90° yönlenmiş çekme numuneleri ise 0.001 s^{-1} deformasyon hızı esas alındı. Sıcaklığın mekanik özellikler üzerindeki etkisi 25, 150, 225 ve 300°C sıcaklıklarında belirlendi. Sıcaklık etkisindeki çekme deneyleri 0.001 s^{-1} ve 0.01 s^{-1} deformasyon hızları için de gerçekleştirildi. Tüm testlerin sonunda ilgili kuvvet-yer değiştirme (F-d) eğrileri ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri kaydedildi. Her bir koşul için en az üç başarılı tekrar olacak şekilde çekme deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların ortalama değerleri raporlanmıştır. Gerçekleştirilen çekme deneylerine ait test planları ve parametreleri Tablo 4'te detaylandırılmıştır. Oda sıcaklığındaki tüm deneyler KTÜ Makine Mühendisliği Bölümünde

bulunan Instron 3382 (100 kN) model üniversal çekme-basma test cihazında (Instron Inc., Norwood, MA, ABD) gerçekleştirildi. Yüksek sıcaklık deneyleri ise Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan sıcaklık koşullandırma odasına sahip Shimadzu Autograph (100 kN) çekme-basma tipi test cihazında (Shimadzu Corp., Kyoto, Japonya) gerçekleştirildi. Her iki cihazda da yer değiştirme verileri video tipi lazer ekstansometre ile kaydedildi.



Şekil 15. a) Çekme numunelerinin haddeleme (sonotrot hareket) yönüne göre TMK plaklardan kesim yerleşimi, b) Çekme numunesi 3 boyutlu görünümü, c) çekme numunesi boyutları, d) Numune kalınlık boyunca kesit detay görünümü

Tablo 4. Tabakalı metal kompozit plaklara, CP1-Ti ve AA 1100-O çekme deneyi test planı

Test #	Malzeme	Test Cihazı	Şekil Değiştirme Hızı (1/s)	Sıcaklık (°C)	Numune Doğrultusu		
1	5-TMK +	Instron 3382	0.001	Oda Sıcaklığında	0°		
2			0.01				
3			0.1				
4			1				
5	7-TMK +	Schimadzu AG-I Autograph	0.001	150		0°	
6			0.01				
7			0.001	225			
8			0.01				
9	0.001		300				
10	0.01						
11	AA 1100-O		Instron 3382	0.001	Oda Sıcaklığında		45°
12					Sıcaklığında		90°

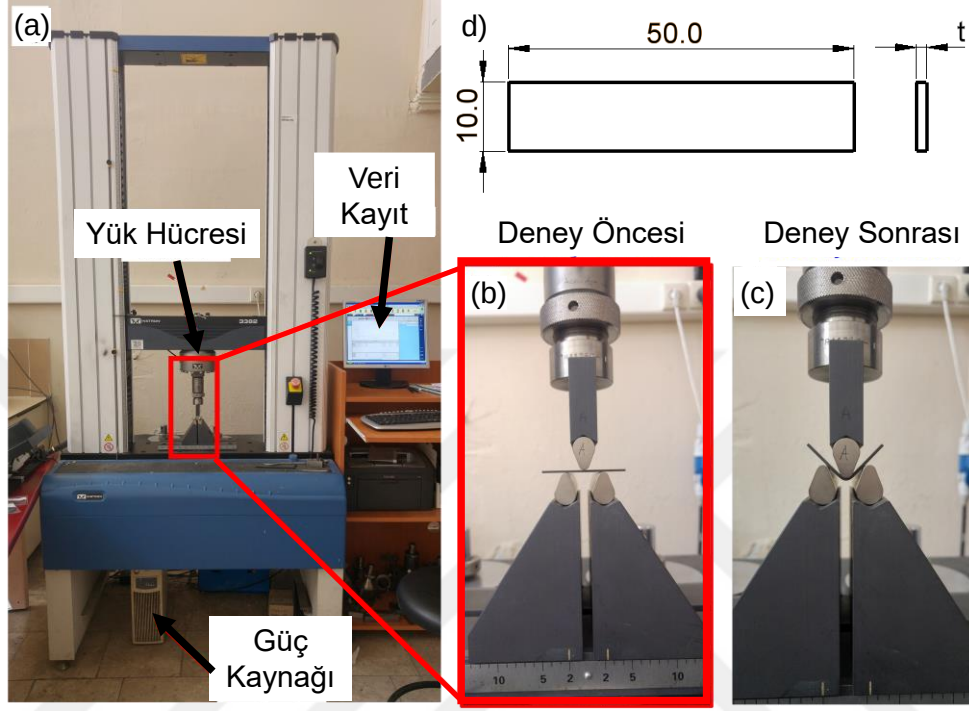
Standart: ASTM E08-15

2.5.3. Eğilme Dayanımı Testleri

Üç nokta eğme test numuneleri ASTM D790 standardına göre hazırlandı ve yine bu standartta belirtilen kısıtlar dikkate alınarak Instron 3382 (Instron Inc., Norwood, MA, ABD) model bir universal çekme-basma test cihazında gerçekleştirildi (Şekil 4). Numuneler hem TMK (5-TMK ve 7-TMK) hem de MİL plaklardan (5-MİL ve 7-MİL) ve CP1-Ti ve AA1100-O saclardan tel erozyon yardımıyla Şekil 16-d’de görülen ölçülerde hazırlandı. Her bir malzemenin test esnasında destek açıklığı standartta belirtildiği üzere numune kalınlığının 16 katı olarak ayarlandı. Test koşullarının her biri en az üç kez tekrar edildi. Tüm üç nokta eğme testleri 1 mm/dk çene hızında gerçekleştirilirken kuvvet-yer değiştirme verileri bilgisayara kaydedildi. Elde edilen bu kuvvet-yer değiştirme eğrileri kullanılarak kesitte oluşan maksimum eğme gerilmesi değerleri Denklem-(1)’e göre hesaplanmış ve ortalama değerler sonuçlarda raporlanmıştır.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2BH^2} \quad (1)$$

Burada, F maksimum kopma yükünü (N), L destekler arası mesafeyi (mm), B numune genişliğini (mm) ve H numune kalınlığını (mm) ifade eder. Üç nokta eğme testine tabi tutulan malzemeler ve test koşulları Tablo 5’te detaylandırmıştır.



Şekil 16. Üç nokta eğme test düzeneği genel görünümü, b) eğme işlemi öncesi numune görünümü, eğme işlemi sonrası numune görünümü, d) eğme numunesine ait boyutlar

2.5.1. Çentik Darbe Testleri

TMK plaklara (5-TMK ve 7-TMK) uygulanan ısıtma işlemi öncesi ve sonrasındaki (MİL) çentik darbe davranışını belirlemek için kullanılan numuneler DIN 50115 standardı dikkate alınarak tel erozyon cihazı yardımıyla üretildi. Aynı standart referans alınarak, karşılaştırma yapmak amacıyla CP1-Ti ve AA 1100-O malzemelerden de çentik darbe numuneleri hazırlandı. Çentik darbe deneyleri Instron (Instron Inc., Norwood, MA, ABD) marka 50 J kapasiteli Ceast 9250 model çentik darbe test cihazında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi (Şekil 17-a). Her bir malzeme tipi için en az üç tekrar gerçekleştirilmiş olup elde edilen verilerin ortalamaları raporlandı. Çentik darbe deneyinde kullanılan numuneler geometrisi Şekil 17-d’de ve gerçekleştirilen testlere ait plan Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 5. Üç nokta eğme test planı

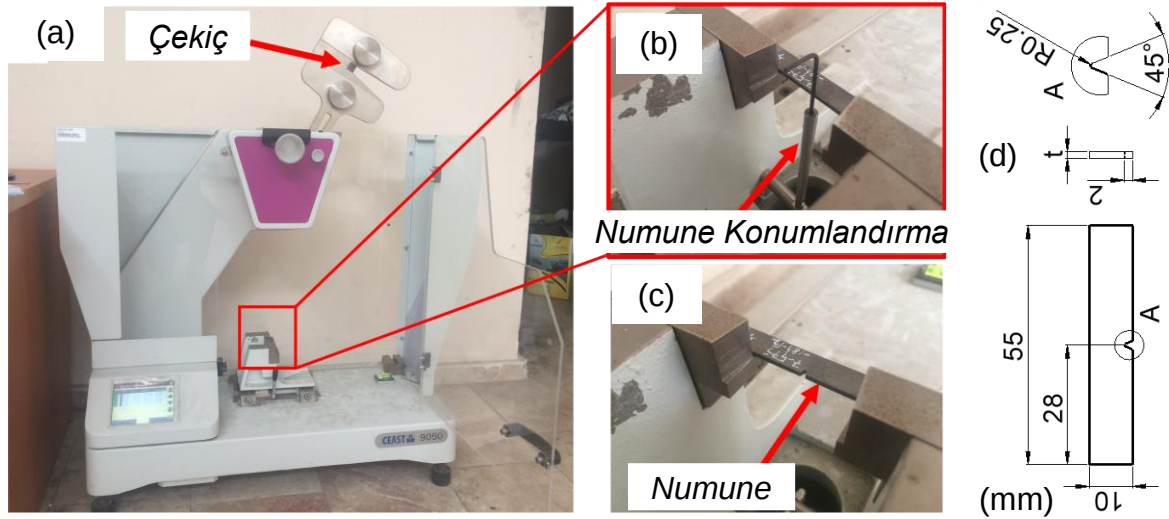
Test #	Malzeme	Test Cihazı	Deformasyon Hızı	Sıcaklık
1	CP1-Ti	Instron 3382	1.0 mm/dk	Oda Sıcaklığında
2	AA 1100-O			
3	5-TMK			
4	5-MİL-575C-6h			
5	5-MİL-575C-12h			
6	5-MİL-575C-18h			
7	5-MİL-575C-24h			
8	5-MİL-575C-30h			
9	5-MİL-575C-36h			
10	5-MİL-600C-6h			
11	5-MİL-600C-12h			
12	5-MİL-600C-18h			
13	5-MİL-600C-24h			
14	5-MİL-600C-30h			
15	5-MİL-600C-36h			
16	7-TMK			
17	7-MİL-575C-6h			
18	7-MİL-575C-12h			
19	7-MİL-575C-18h			
20	7-MİL-575C-24h			
21	7-MİL-575C-30h			
22	7-MİL-575C-36h			
23	7-MİL-600C-6h			
24	7-MİL-600C-12h			
25	7-MİL-600C-18h			
26	7-MİL-600C-24h			
27	7-MİL-600C-30h			
28	7-MİL-600C-36h			

Test Standardı: ASTM D790-03

Tablo 6. Uygulanan çentik darbe test planı

Test #	Malzeme	Çekiç Düşme Açısı	Sıcaklık	Kalınlık
1	CP1-Ti	150°	Oda Sıcaklığında	1.55 mm
2	AA 1100-O			
3	5TMK			
4	5-MİL-575C-18h			1.397 mm
5	5-MİL-575C-36h			
6	5-MİL-600C-18h			
7	5-MİL-600C-36h			
8	7-TMK			1.905 mm
9	7-MİL-575C-18h			
10	7-MİL-575C-36h			
11	7-MİL-600C-18h			
12	7-MİL-600C-36h			

Test Standardı: DIN 50115



Şekil 17. a) Ceast (Instron) Çentik darbe test düzeneği, b) numunenin cihaz üzerinde merkezlenerek konumlandırılması, c) teste hazır numunenin görüntüsü, d) numune boyutları

2.6. Şekillendirme Testleri

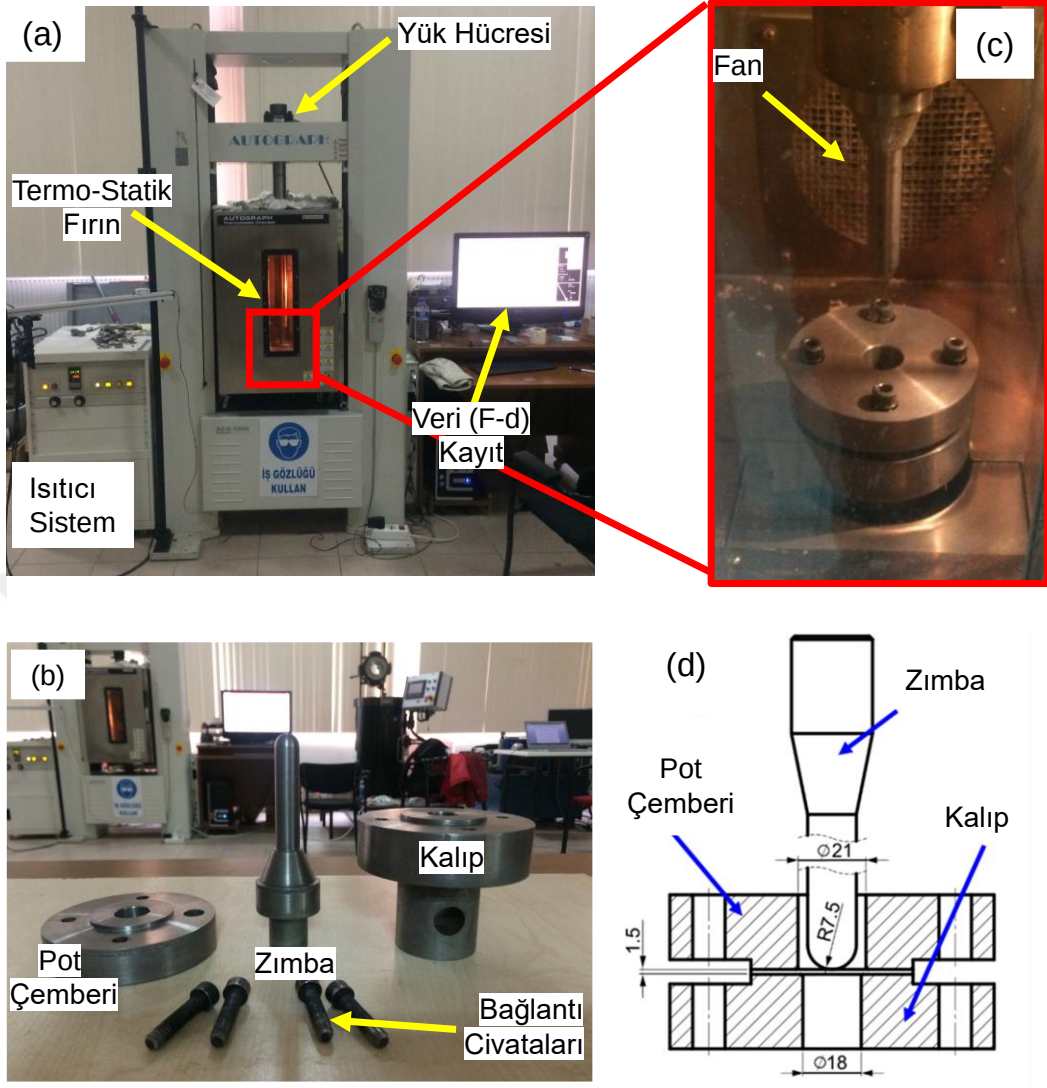
2.6.1. Erichsen Testleri

Erichsen şekillendirme deneylerinin gerçekleştirilmesinde ISO-20482 standardı dikkate alınmış ve deney numuneleri ilgili standart referans alınarak küçültülmüş ve üretilmiştir. Kalıp ve zımba sıcak iş çeliğinden üretilerek yüzeylerinin sertleştirilmesi için ısıtılma tabi tutulmuşlardır (Şekil 18-b). Erichsen deneyleri iki farklı deformasyon hızında (0.001 s^{-1} ve 0.01 s^{-1}) ve dört farklı sıcaklık (25, 15, 225 ve $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$) koşulunda gerçekleştirildi. Deneylerde aynı kalınlıkta (1.5 mm) olmaları sebebiyle 5-TMK, CP1-Ti ve AA-1100-O malzemelerden numune üretilmiştir. Numuneler $50 \times 50 \times 1.5 \text{ mm}^3$ olarak üretildi (Tablo 7). Tüm deneyler Şekil 18-a’da görülen Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünde bulunan sıcaklık koşullandırma odasına sahip Shimadzu Autograph (100 kN) çekme-basma tipi test cihazında (Shimadzu Corp., Kyoto, Japonya) gerçekleştirildi. Erichsen deneyine ait şematik görünüm ve ilgili boyutlar Şekil 18-d’de detaylandırılmıştır.

Tablo 7. Erichsen şekillendirme test planı

Test#	Malzeme	Test Cihazı	Deformasyon Hızı (1/s)	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
1	5-TMK - CP1-Ti - AA1100-O	Shimadzu AG-I Autograph (100 kN)	0.001	Oda Sıcaklığı
2			0.01	
3			0.001	150
4			0.01	
5			0.001	225
6			0.01	
7			0.001	300
8			0.01	

Test Standardı: ISO- 20482



Şekil 18. a) Erichsen deneylerinin gerçekleştirildiği universal çekme-basma test düzeneği, b) kullanılan kalıp, zimba ve pot çemberi görüntüleri, c) sıcaklık koşullandırma ortamı (fırın) içerisinde kalıp ve zimba görüntüsü, d) küçültülmüş Erichsen deney düzeneği

2.7. Yüksek Hızlı Deformasyon Karakterizasyonu

Tabakalı metal kompozit plakaların (5-TMK ve 7-TMK) yüksek hızlı deformasyon karakterizasyonu ve deformasyon hızı hassasiyeti çekme tipi bir Split-Hopkinson Çekme Çubuğu, SHÇÇ (Split-Hopkinson Tension Bar: SHTB) test cihazı ile İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü bünyesindeki Dinamik Test ve Modelleme Laboratuvarında gerçekleştirildi. Test düzeneğinin genel görünümü Şekil 19’da görülmektedir.



Şekil 19. Split-Hopkinson çekme çubuğu (SHÇÇ) test düzeneği (İYTE-DTMLab)

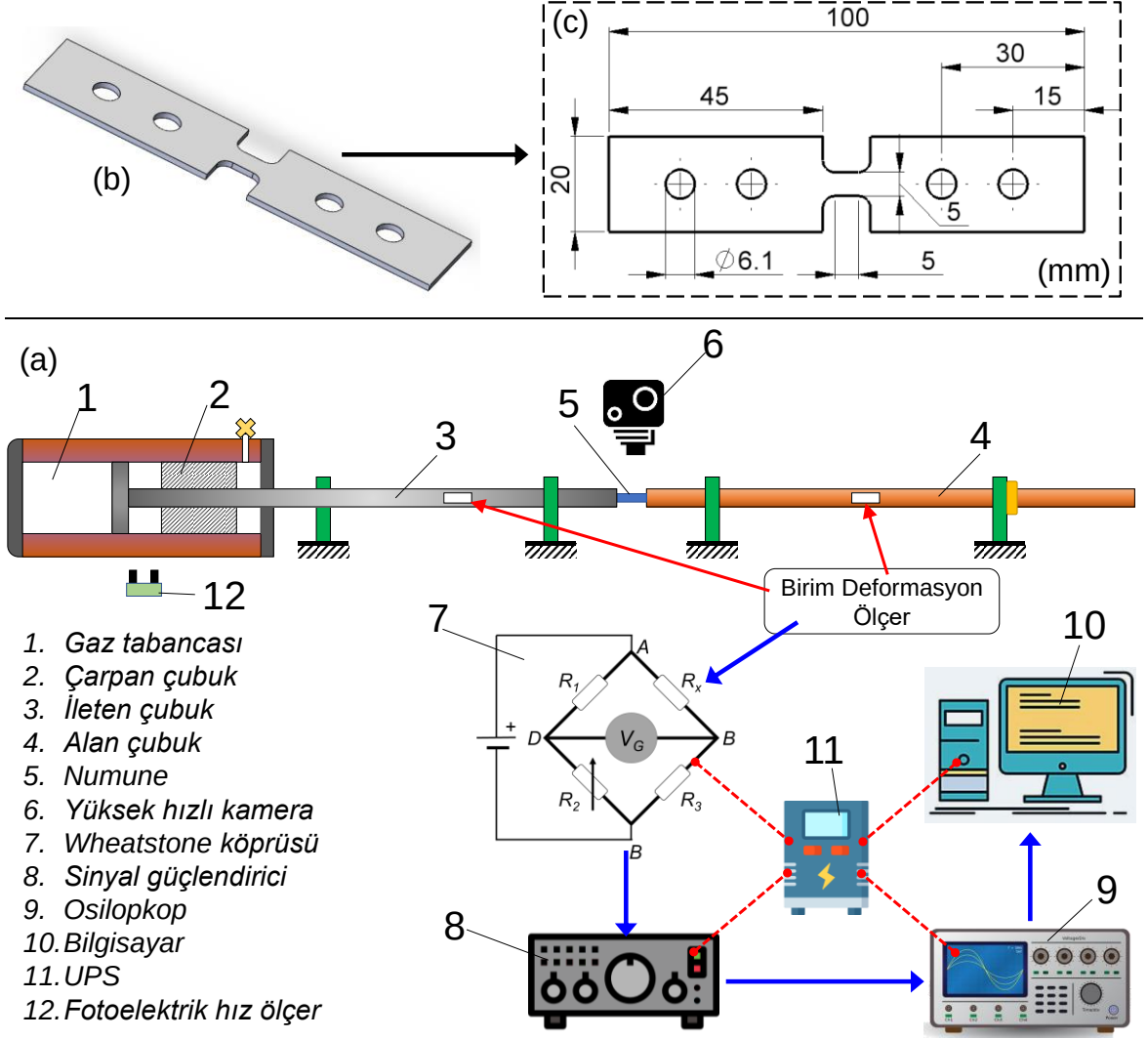
SHÇÇ yüksek deformasyon hızlarında çekme gerilme dalgaları oluşturarak numunede hasar oluşturan bir deney düzeneğidir. Şekilde görülen test düzeneği alan çubuk (incident bar), ileten çubuk (transmitter bar), boru şeklinde vurucu (tubular striker) ve gaz tabancası ana elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanların her biri 316L paslanmaz çelikten üretilmiştir. Alan ve çarpan çubuklar üzerine uygun birim deformasyon ölçerler (strain gage) yerleştirilmiştir.

$$\varepsilon(t) = \frac{4x \text{Voltaj}(t)}{V_{exc} x G F x K_{kazanç}} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_b}{L_s} \varepsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = -\frac{2C_b}{L_s} \int \varepsilon_r(t) dt \quad (3)$$

$$\sigma(t) = -\frac{E_b A_b}{A_s} \varepsilon_t(t) \quad (4)$$



Şekil 20. a) Split-Hopkinson basınç bar çekme test düzeneği şematik görünümü ve elemanları, b) yüksek hızlı çekme numunesi, c) yüksek hızlı çekme numunesi boyutları

2.7.1. Johnson-Cook Malzeme Modeli

Yüksek hızlı deformasyonun meydana geldiği olayların ve proseslerin sayısal modellenmesin yaygın olarak kullanılan malzeme modellerinin başında Johnson-Cook (JC)

malzeme modeli gelmektedir. Bu malzeme modeli, malzemenin dinamik yüklemeler altında sadece yüksek deformasyon davranışını değil aynı zaman yüksek hızlı birim şekil değiştirme ve sıcaklık davranışını da sergilemektedir (Johnson, G.R.; Cook, 1983). Denklem (5)'de JC malzeme modeline ait denklem verilmiştir. Denklem (5)'de görülen birinci parantez içerisindeki ifade malzemenin deformasyon sertleşmesi davranışını, ikinci parantez içerisindeki ifade malzemenin şekilde değiştirme hızı davranışını belirlerken üçüncü parantez içerisindeki ifade malzeme üzerinde sıcaklığın etkisini göstermektedir.

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = [A + B\varepsilon_p^n] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 - (T^*)^m] \quad (5)$$

Burada; A, B, n, C, m malzeme modeli sabitlerini ifade ederken denklemdeki tüm bilinmeyenler aşağıdaki detaylandırılabilir:

σ	: akma mukavemeti (MPa)
A	: %0.2 birim şekil değişimine karşılık gelen akma gerilmesi (MPa)
B	: pekleşme katsayısı (MPa)
ε_p	: efektif plastik birim şekil değişimi
n	: deformasyon sertleşmesi üssü
C	: birim şekil değiştirme hızı sabiti
$\dot{\varepsilon}^*$	: normalize edilmiş birim şekil değiştirme hızı
$\dot{\varepsilon}_{ef}^p$	: efektif plastik birim şekil değiştirme hızı (s^{-1})
$\dot{\varepsilon}_0$	: referans birim şekilde değiştirme hızı (s^{-1})
T^*	: benzeş sıcaklık
m	: ısıl yumuşama üssü

Denklem (5) içinde verilen normalize edilmiş birim şekil değiştirme hızı teriminin açık hali denklem (6)'te verilmiştir. Burada, $\dot{\varepsilon}^*$, $\dot{\varepsilon}_{ef}^p$ ve $\dot{\varepsilon}_0$ sırasıyla normalize edilmiş birim şekilde değiştirme hızını, efektif plastik birim şekil değiştirme hızını (s^{-1}) ve referans birim şekilde değiştirme hızını (s^{-1}) ifade eder.

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}_{ef}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (6)$$

Denklem (5) içerisinde verilen benzeş sıcaklık teriminin açık hali denklem (7)'te verilmiştir. Burada, T^* , T , T_r ve T_m (°K) sırasıyla benzeş sıcaklığı, mutlak sıcaklığı, oda sıcaklığı ve malzemenin ergime sıcaklığına karşılık gelmektedir.

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (7)$$

Johnson-Cook malzeme modelinin içerisinde malzeme modelin yanı sıra hasar modeli de mevcuttur. Bu hasar modelinde, hasarın gerçekleşeceği kırılma birim şekil değişimi değeri aşağıda verilen Denklem (8) ile belirlenmektedir.

$$\varepsilon_f(\sigma^*, \dot{\varepsilon}, T) = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] (1 + D_5 T^*) \quad (8)$$

Burada D_1 , D_2 , D_3 , D_4 ve D_5 Johnson-Cook hasar modeline ait hasar parametreleridir. σ^* , ifadesi ise gerilme üç eksenliliğini temsil etmektedir ve denklem (9)'te hidrostatik gerilme (σ_m) ile efektif eşdeğer gerilmenin (σ_{vm}) oranı olarak verilmiştir.

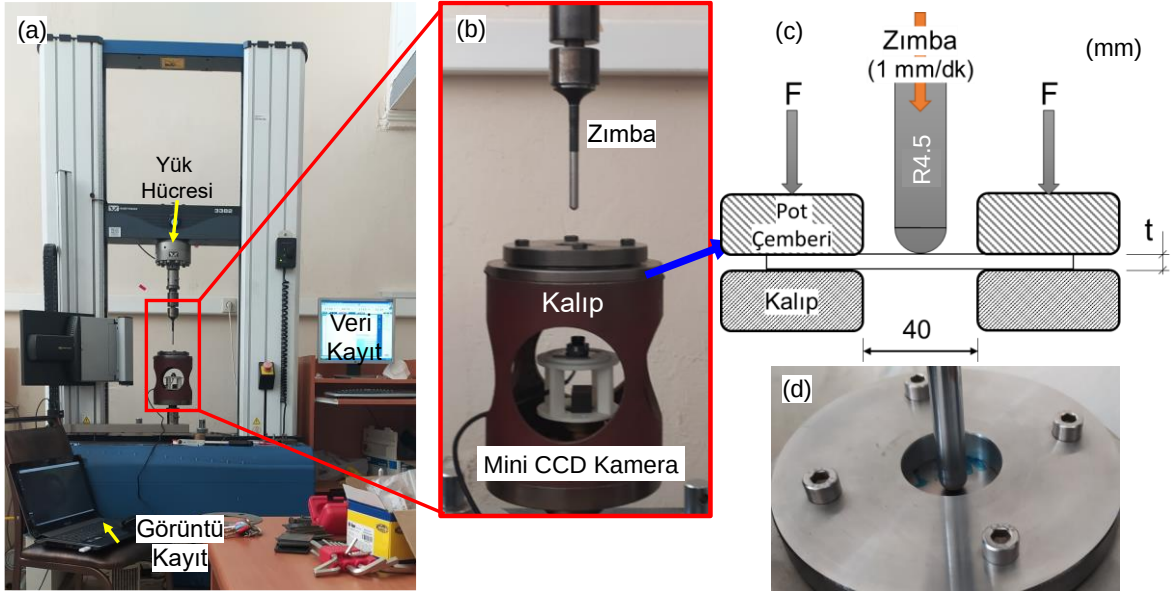
$$\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}} \quad (9)$$

Denklem (8)'te birinci parantez içerisindeki hasar katsayılarının belirlenmesinde statik testler yeterli iken, ikinci parantez içerisindeki katsayı için farklı birim şekil değiştirme hızlarında testler gerekmektedir. Üçüncü parantez içerisindeki katsayının belirlenmesinde ise farklı sıcaklıklarda testler gerekir. Ancak sayısal modelleme çalışmalarında bu ifade genellikle ihmal edilir.

2.8. Deformasyon Dayanımı İncelemeleri

2.8.1. Statik-Eşdeğer Delinme Direnci Testleri

Statik-eşdeğer delinme deneyleri Instron 3382 test cihazına göre özel olarak tasarlanmış kalıp ve zımba bağlantı aparatlarıyla gerçekleştirildi. İlgili kalıp ve zımba bağlantıları Şekil 21’de verilmektedir. Burada numunenin merkezi zımbanın ucuna denk gelecek şekilde numune kalıp ile pot çemberi arasında dört adet cıvata ile kalıp içerisine numune akmayacak şekilde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi için her bir cıvataya tork anahtarı yardımıyla 11 N.m moment uygulanmıştır. Ardından kalıp içerisinde numunenin alt tarafına bir adet mini CCD kamera numunenin alt yüzeyini izleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde bir yandan da numunenin uğradığı hasar takip edilmeye çalışıldı. Statik-eşdeğer delinme direnci testleri 7-TMK ve 7-MİL numuneler üzerinde üç farklı zımba (delici uç) tipi ile test edilmiştir. Bu zımba tipleri uçlarının geometrisine göre sırasıyla yarı küresel (YK), düz (D) ve konik (K) olarak adlandırılmıştır. Test esnasında zımbanın ilerleme hızı 1 mm/dk olarak sabitlenmiştir. Testlerin sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 21. (a) Statik-eşdeğer delinme test düzeneği genel görünümü, (b) Zımba ve kalıp detay görünümü, (c) Test düzeneği şematik görünümü ve boyutları, (d) Zımba-numune teması

Tablo 8. Statik-Eşdeğer delinme direnci test planı

Test Malzemesi	Zımba Uç Tipi	Test Cihazı	Deformasyon Hızı
7-TMK	- Yarı Küresel - Konik - Düz	Instron 3382	1.0 mm/dk
7-MİL-600C-12h 7-MİL-600C-24h 7-MİL-600C-36h	Yarı Küresel		
7-MİL-600C-24h	- Konik - Düz		

2.8.2. Düşük Hızlı Darbe Testi

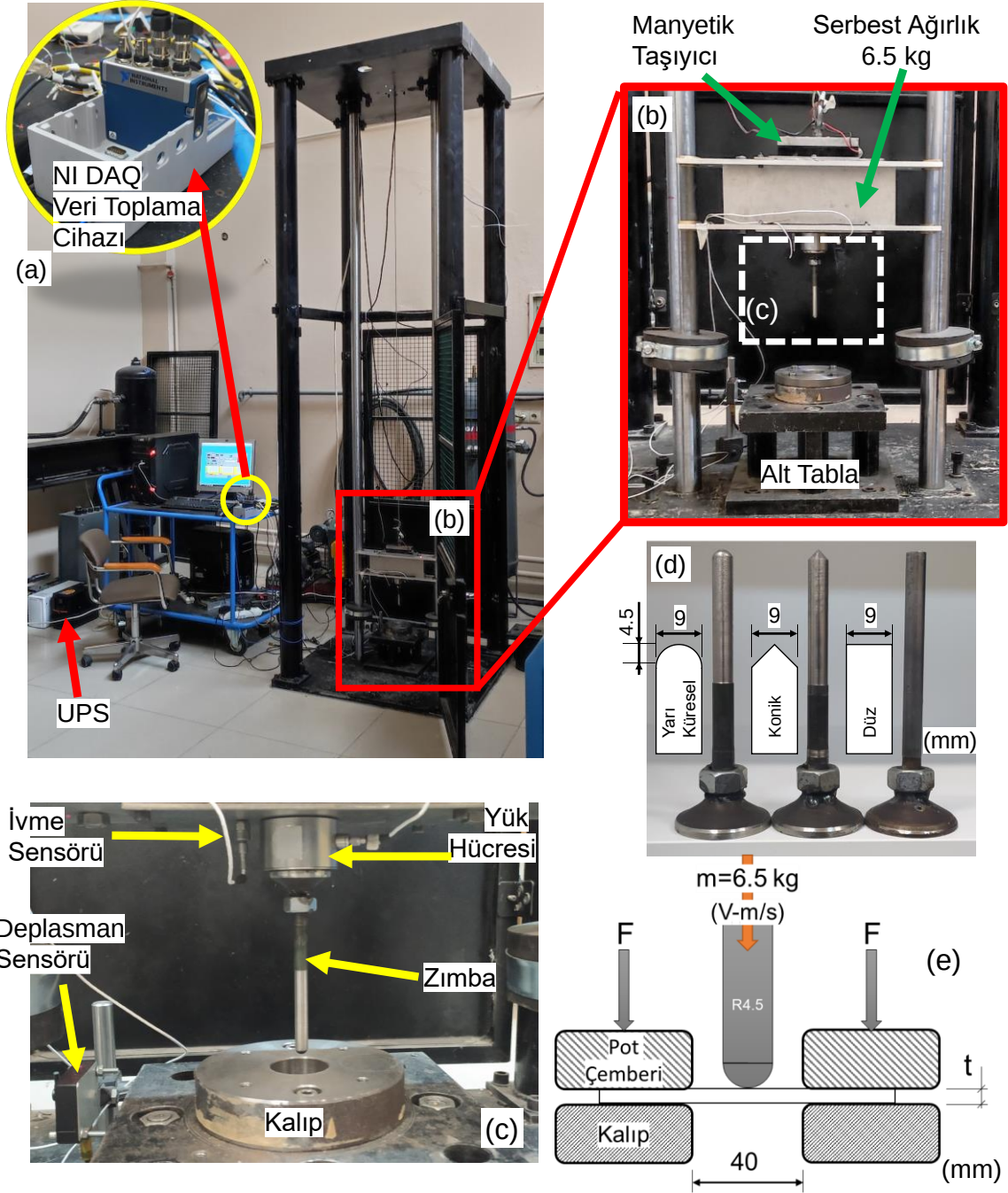
Düşük hızlı darbe deneyleri KTÜ Mekanik Laboratuvarında bulunan özel üretim bir düşürme kulesi test cihazı kullanılarak ve ASTM D7136 standardı referans alınarak gerçekleştirildi. Deney düzeneği uygulama prensiplerine ait detaylar Şekil 22’de verilmiştir. Çalışma kapsamında her biri 9 mm çapında uç geometrileri yarı küresel (YK), konik (K) ve düz (D) olan üç farklı vurucu uç (zımba) tipi kullanıldı (Şekil 22-d). Farklı uç tipleri kullanılarak meydana gelen farklı hasar mekanizmaları incelenmeye çalışıldı. Bu vurucu uçlar deney esnasında 0.04 mV/N ölçüm hassasiyetine ve 222 kN yük kapasitesine sahip Dytran 1061v5 (Dytran Instruments Inc., Chatsworth, CA, ABD) model piezo-elektrik tip bir yük hücresine vidalandı. Ayrıca yük hücresinin yanı sıra bir adet tek eksenli ivme ölçer sensör (Dytran 3200B5) de kullanıldı. Vurucu ucun numuneleri ne kadar deformasyona uğrattığını ve numunede meydana gelen çökme miktarını belirlemek amacıyla bir adet lazer yer değiştirme sensörü de kullanıldı. Her üç sensörden veriler 15 kHz örnekleme hızıyla NI Labview veri toplama kartı (National Instruments Inc., Austin, Texas, ABD) kullanılarak bilgisayara kaydedildi. Deneyler gerçekleştirilirken numuneler, 40 mm iç delik çapına sahip kalıp ile pot çemberi arasına merkezi bir şekilde yerleştirildi ve dört adet cıvata ile sıkıştırıldı. Bu işlem esnasında cıvataların her birine bir tork anahtarı yardımıyla 11 Nm yük uygulandı.

Vurucu ucun darbe enerjisi serbest düşürülen ağırlığın (6.5 kg) yüksekliği değiştirilerek elde ayarlandı. Gerçekleştirilen ön deneyler ve literatürdeki çalışmalardan

faydalanarak, testlerde kullanılan üç farklı darbe enerjisi seviyesi sırasıyla 10 J (1.75 m/s), 20 J (2.45 m/s) ve 50 J (3.92 m/s) olarak belirlendi. Testler ile ilgili planlama Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Düşük hızlı darbe test planı

Malzeme	Zımba Uç Tipi	Test Cihazı	Enerji	Hız	Yükseklik
7-TMK	• Yarı küresel • Konik • Düz	Serbest Ağırlık Düşürme Kulesi	10 J	1.75 m/s	0.157 m
			20 J	2.45 m/s	0.314 m
			50 J	3.92 m/s	0.784 m



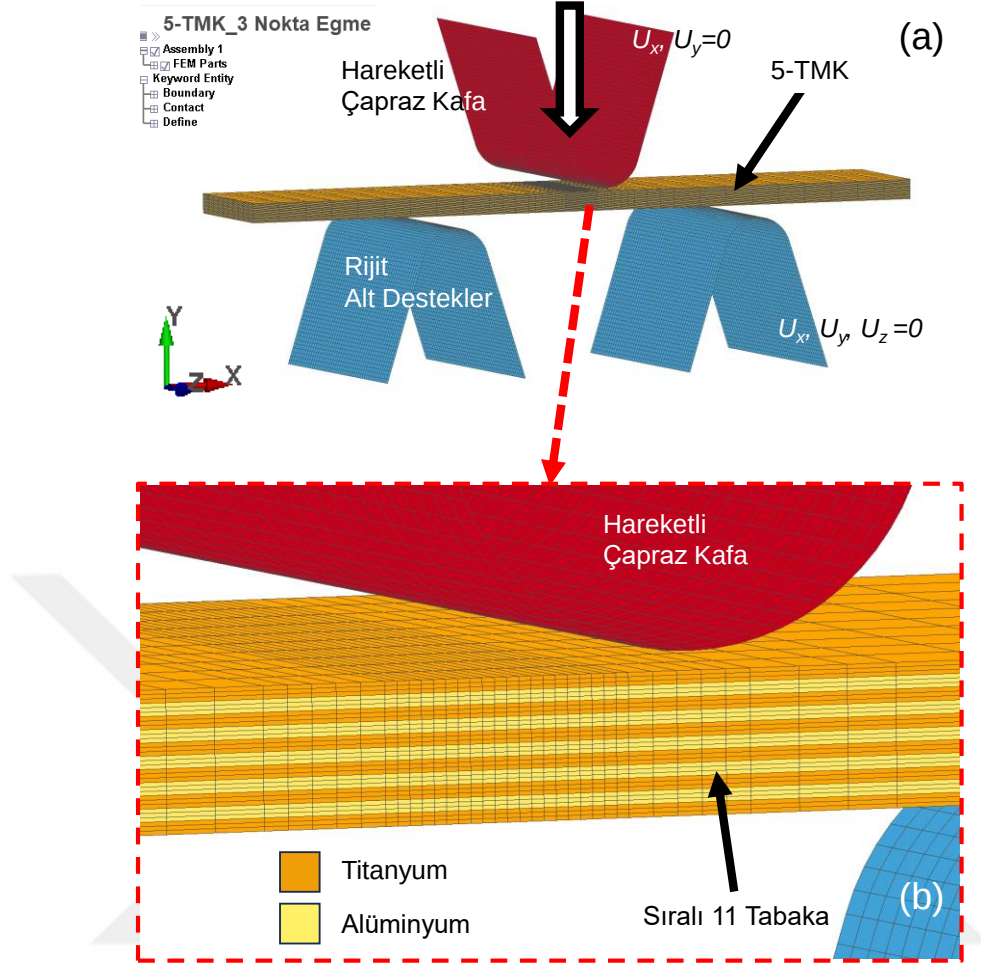
Şekil 22. a) Düşürme kulesi test düzeneği genel görünümü, b) vurucu uç-numune çarpışma bölgesi görünümü, c) vurucu uç, sensörler ve kalıp detay görünümü, d) deneylerde kullanılan farklı uç tiplerindeki vurucu uçlar ve geometrik boyutları, e) kalıp şematik görünümü

2.9. Sayısal Çalışmalar

Tüm sayısal modellerin ağ yapılarının oluşturulmasında, malzeme modellerinin ve sınır koşullarının tanımlanmasında ve analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde Livermore Software Technology Corporation, LSTC (Livermore, CA, ABD) firmasına ait ticari sonlu elemanlar ön işlemci yazılımı LS-Prepost'un v4.8.7 versiyonu kullanılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modellerinin analizleri ise yine aynı firmaya ait LS-Dyna sonlu elemanlar çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıda oluşturulan her bir sonlu elemanlar modelinin hazırlanmasında izlenen yol ve kullanılan parametreler ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

2.9.1. Eğilme Testi Sonlu Elemanlar Modeli

Eğilme testine ait sonlu elemanlar modelinin genel görünümü Şekil 23'te verilmiştir. Numune üzerine yüklemeyi gerçekleştiren hareketli çapraz kafa 4140 adet dörtgen kabuk elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Çapraz kafanın malzemesi çelik olarak seçilmiş ve MAT_20_RIGID malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Yine deney düzeneğine ait alt destekler aynı hareketli çapraz kafada olduğu gibi dörtgen kabuk elemanlar (8280 adet) ve MAT_20_RIGID malzeme modeli ile oluşturulmuştur. Hareketli çapraz kafa ve alt desteklerin örülmesinde kullanılan kabuk elemanlara LS-Dyna'ya özgü -2- numaralı Belytschko-Tsay kabuk eleman formülasyonu ve 3 integrasyon noktası tanımlanmıştır. Alt desteklerin, hem x, y, z, eksenleri doğrultusunda hem de bu eksenler etrafındaki tüm hareketleri sınırlandırılmıştır. Hareketli çapraz kafanın ise sadece y eksenine doğrultusunda hareketi serbest bırakılmıştır. Eğilmeye maruz kalan 5-TMK numune ise 11 tabakalı yapısına uygun olarak modellenmiştir. Her bir tabakanın ağ yapısının oluşturulmasında 3'er sıra -1- numaralı sabit gerilme katı (constant stress solid) elemanlar kullanılmıştır. Çapraz kafanın hareketinin verilmesi PRESCRIBED_RIGID_MOTION kartı ile eklenmiştir. Rijit çapraz kafa ve alt desteklerin 5-TMK ile temas davranışını tanımlamak için AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE temas kartı kullanılırken, 5-TMK'nın her bir tabakasının birbiri ile teması AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE temas kartı kullanılmıştır.

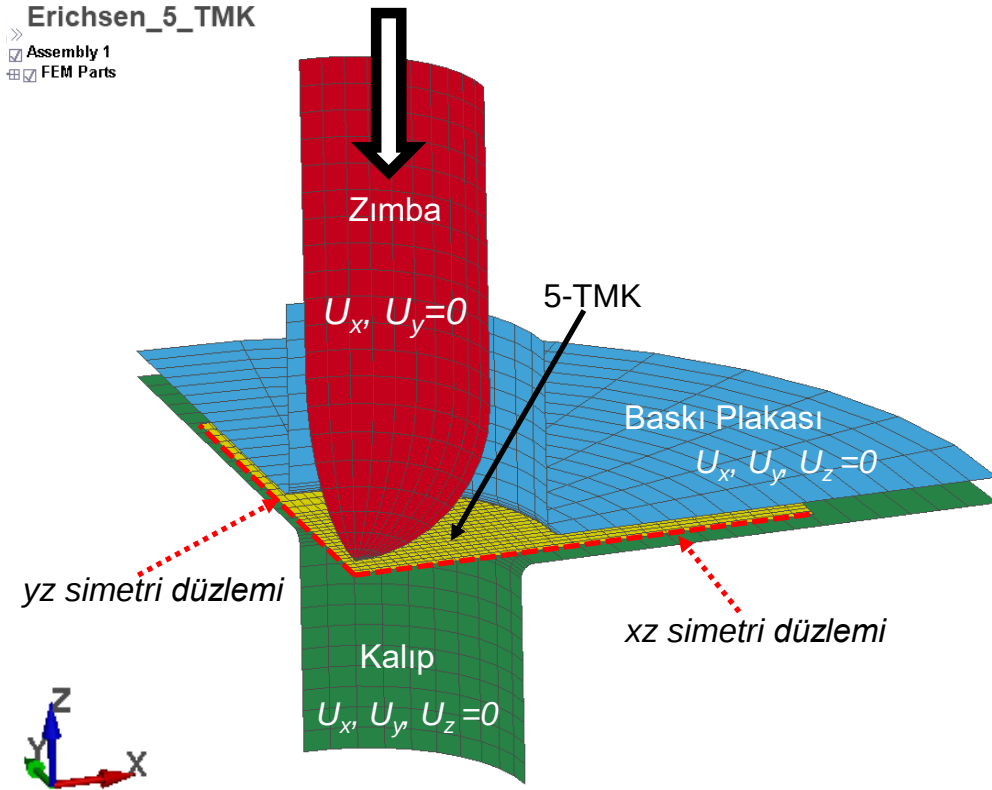


Şekil 23. 5-TMK ve 7-TMK plakaların statik-eşdeğer üç nokta eğme testi sonlu elemanlar modeli, a) izometrik görünümü ve sınır şartları, b) çapraz kafa-TMK temas bölgesi ve bu bölgedeki TMK ağ örgüsü detayı

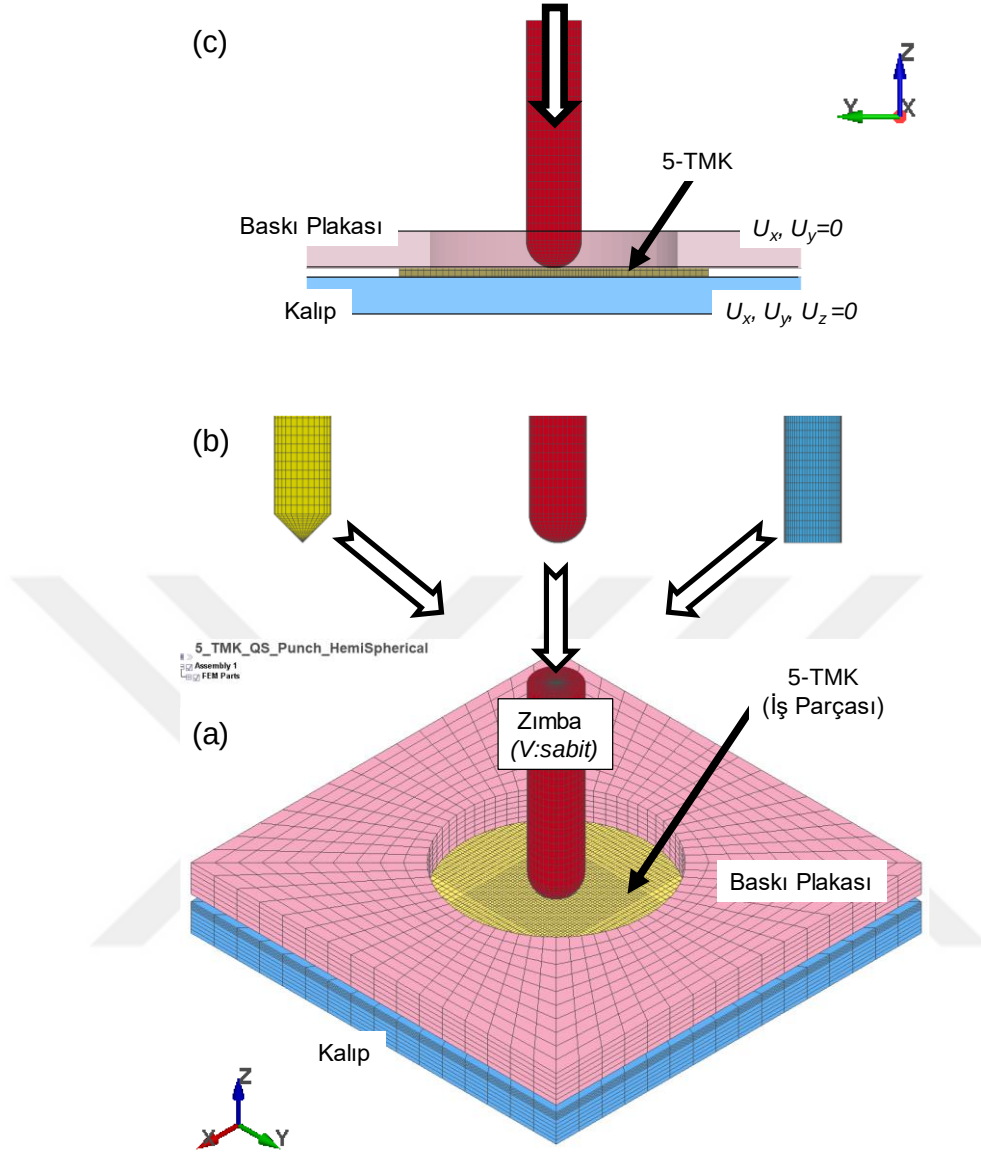
2.9.2. Erichsen Şekillendirme Testi Sonlu Elemanlar Modeli

Erichsen şekillendirme testine ait sonlu elemanlar modeli genel görünümü ve sınır koşulları Şekil 24’te görülmektedir. Tüm şekillendirme parçalarının (kalıp: 385 adet, baskı plakası: 385 adet ve zımba: 200 adet) ağ yapısında 3 integrasyon noktasına sahip -2-numaralı Belytschko-Tsay kabuk eleman formülasyonu kullanılmıştır. Aynı zamanda şekillendirme parçalarının her biri çelik malzeme özellikleri esas alınarak MAT_20_RIGID malzeme kartı ile rijit olarak ele alınmıştır. Kalıbın hareketleri tüm doğrultu ve rotasyonlarda tamamen sabitlenirken baskı plakası ve zımbanın hareketi sadece şekillendirme yönü olan z doğrultusu serbest bırakılmış ve diğer doğrultu ve rotasyonlarda sabitlenmiştir. Baskı plakasına z doğrultusunda iş parçasını (5-TMK) sıkıştırarak doğrultuda kuvvet uygulanırken, zımbanın hareketinin tanımlanmasında PRESCRIBED_RIGID_MOTION

kartı aktif hale getirilmiştir. 5-TMK plakanın modellenmesinde yine dörtgen kabuk elemanlar (1225 adet) kullanılırken eleman formülasyonu olarak yüksek deformasyon miktarını karşılamak amacıyla -16- numaralı tam integrasyonlu (fully integrated) eleman formülasyonu kullanılmıştır. Erichsen testi sonlu eleman modelinin, çözüm süresini kısaltmak amacıyla sadece 4'te 1'i modellenmiştir. Dolayısıyla xz ve yz düzlemleri esas alınarak simetri koşulları uygulanmıştır. 5-TMK plakanın Ti ve Al tabakalarının her birinin malzeme özellikleri MAT106_ELASTIC_VISCOPLASTIC_THERMAL malzeme kartı içerisinde sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı olacak şekilde tablo verisi olarak aktarılmıştır. 5-TMK'nın 6 adet Ti ve 5 adet Al tabakasının tek sıra kabuk elemanlarla oluşturulmuş iş parçasına PART_COMPOSITE_SHELL kartı ile tanımlanmıştır. Bu şekilde 11 integrasyon noktası tanımlanmış olmaktadır. Tüm parçalar arasındaki temas davranışı FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE temas kartı ile belirlenmiştir.



Şekil 24. 5-TMK plakanın Erichsen şekillendirme testi sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları



Şekil 25. 5-TMK plakanın farklı zımba uçları ile statik-eşdeğer delinme testi sonlu elemanlar modeli, a) sonlu eleman modelinin izometrik görünümü, b) düz, yarı küresel ve düz uçlu zımbalar, c) kesit görünümü ve sınır şartları

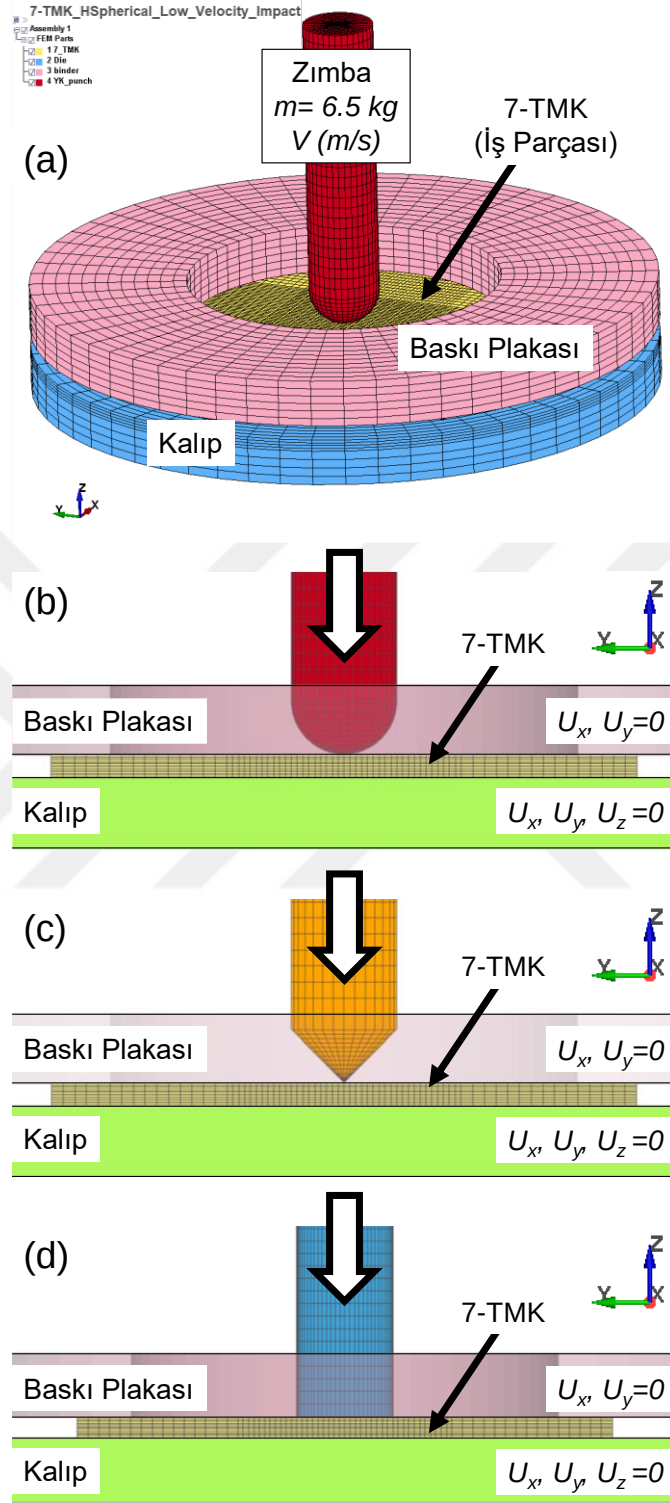
2.9.3. Statik-Eşdeğer Delinme Sonlu Elemanlar Modeli

Statik-eşdeğer delinme testi sonlu elemanlar modeline ait izometrik genel görünüm Şekil 25-a’da verilmiştir. Şekil 25-b’de deneylerde kullanılan farklı delici uç (zımba) tipleri ve ağ yapıları görülürken Şekil 25-c’de ise zımba iş parçası (7-TMK) temas detayı ve sınır koşulları mevcuttur. Kalıp, baskı plakası ve delici uçların her birinin oluşturulmasında sırasıyla, 15552, 3840 ve 15120 adet elemanın kesit (SECTION) özellikleri için -1- numaralı

sabit gerilme (constant stress solid) katı eleman formilasyonu esas alınmıştır. 7-TMK modellenirken 11 tabakanın her biri için bir sıra eleman öngörümü (toplam 53900 adet) ve malzeme özellikleri MAT24_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme kartına gömülmüştür. Diğer parçalara çelik malzeme özellikleri MAT20_RIGID kartı ile ilişkilendirilmiştir. Kalıbın hareketi tüm doğrultu ve rotasyonlarda sabitlenirken delici uç ve baskı plakasının hareketleri delme doğrultusu olan z hariç tüm doğrultu ve rotasyonlarda sabitlenmiştir. Delici uca hareketi PRESCRIBED_RIGID_MOTION kartıyla zamana bağlı konum olarak tanımlanmıştır. Rijit parçalar işle 7-TMK arasındaki temas davranışı AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE temas kartı ile tanımlanırken, delici uçlar ile 7-TMK arasındaki temas davranışı ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması ile tanımlanmıştır.

2.9.4. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonlu Elemanlar Modeli

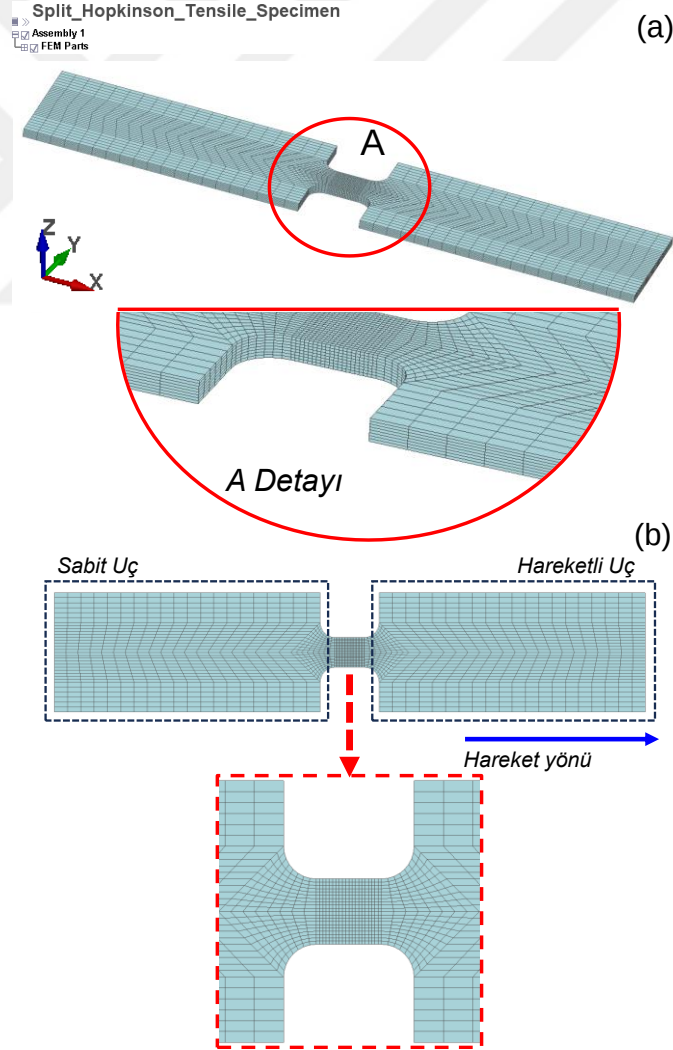
Düşük hızlı darbe deneyine ait sonlu elemanlar modelin izometrik genel görünümü Şekil 26'de sunulmuştur. Şekil 26-b-d'de ise sırasıyla yarı küresel, konik ve düz delici uç tipleri ve modelin sınır koşulları detaylandırılmıştır. Modelin, iş parçası (7-TMK) dahil tüm parçalarının ağ yapısının örülmesinde -1- numaralı sabit gerilme katı (constant stress solid) katı elemanlardan faydalanılmıştır. Kalıp, baskı plakası, delici uç ve 7-TMK için sırasıyla 9540, 4320, 15120 ve 73500 adet eleman ile oluşturulmuştur. Statik-eşdeğer delinme testi modelinde olduğu gibi kalıbın hareketi tüm doğrultu ve rotasyonlarda engellenmiştir. Delici uç ve baskı plakasının hareketleri de sadece z doğrultusunda serbest bırakılırken diğer doğrultu ve rotasyonlarda engellenmiştir. Kalıp, baskı plakası ve delici uçlar için MAT20_RIGID kartı ile çelik malzeme özellikleri tanımlanmıştır. 7-TMK için ise malzeme özellikleri deformasyon sertleşmesi ve deformasyon hızı etkilerini birlikte yansıtan MAT98_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme kartı ile ilişkilendirilmiştir. Rijit parçalar ile 7-TMK arasındaki temas davranışı AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE temas kartı ile tanımlanırken, delici uçlar ile 7-TMK arasındaki temas davranışı ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması ile tanımlanmıştır. Serbest ağırlık olarak düşürülen parçalar sonlu elemanlar modelinde dikkate alınmaz iken ağırlıkları delici uçlara tanımlanmıştır. Farklı enerji seviyelerine karşılık gelen delici uç hızları INITIAL_VELOCITY kartı ile verilmiştir.



Şekil 26. 7-TMK plakanın farklı zımba uçları ile düşük hızlı darbe deneyi sonlu elemanlar modeli ve sınır koşulları, a) sonlu eleman modelinin genel izometrik görünümü, b) yarı küresel uçlu zımba modeli, c) konik uçlu zımba modeli, d) düz uçlu zımba

2.9.5. Split-Hopkinson Çekme Testi Sonlu Elemanlar Modeli

Split-Hopkinson testlerinden elde edilen verilerle belirlenen Johnson-Cook malzeme modeli katsayılarının doğrulanması için bu testte gerçekleştirilen yüksek hızlı çekme deneyi modellenmeye çalışılmıştır. Modellenen yüksek hızlı çekme numunesinin sonlu elemanlar modeli genel görünümü, sınır koşulları ve ölçü bölgesi ağ yapısı Şekil 27’de görülmektedir. Modelin oluşturulmasında 16000 adet -1- numaralı sabit gerilme (constant stress solid) katı elemanlardan yararlanılmıştır. Veri alımının ve esas deformasyonun gerçekleştiği ölçü bölgesinde daha ince ağ yapısı kullanılmıştır. Numunenin bir ucunun hareketi tüm doğrultularda kısıtlanırken diğer ucunun hareketi ise sadece çekme doğrultusunda serbest bırakılmıştır. Çekme doğrultusunda numunenin hareketli ucuna uygulanan hız değeri VELOCITY_GENERATION kartı ile uygulanmıştır.



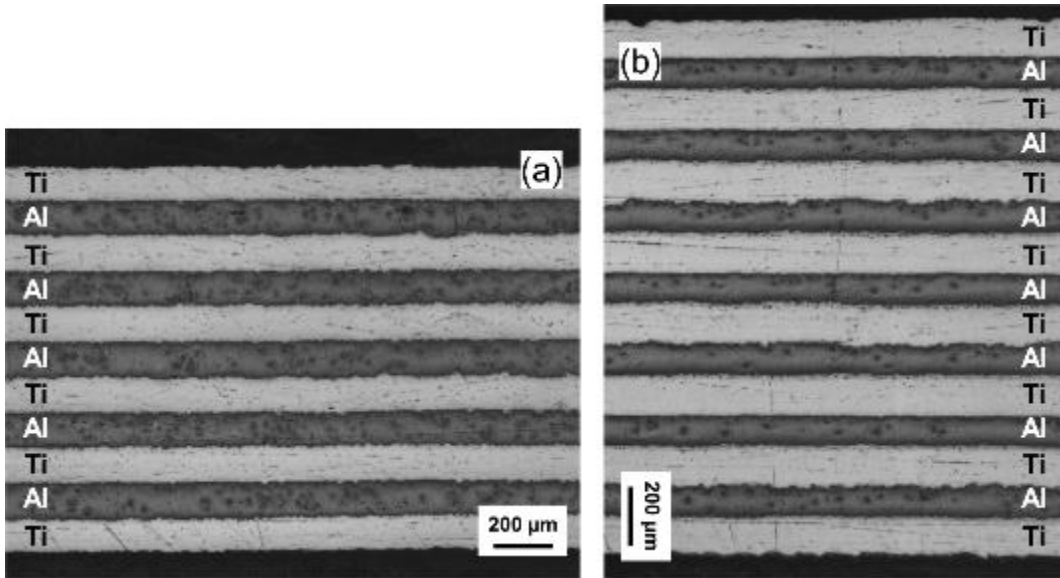
Şekil 27. Split-hopkinson basınç barı çekme numunesi sonlu elemanlar modeli a) izometrik görünümü ve ağ yapısı, b) sınır koşulları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

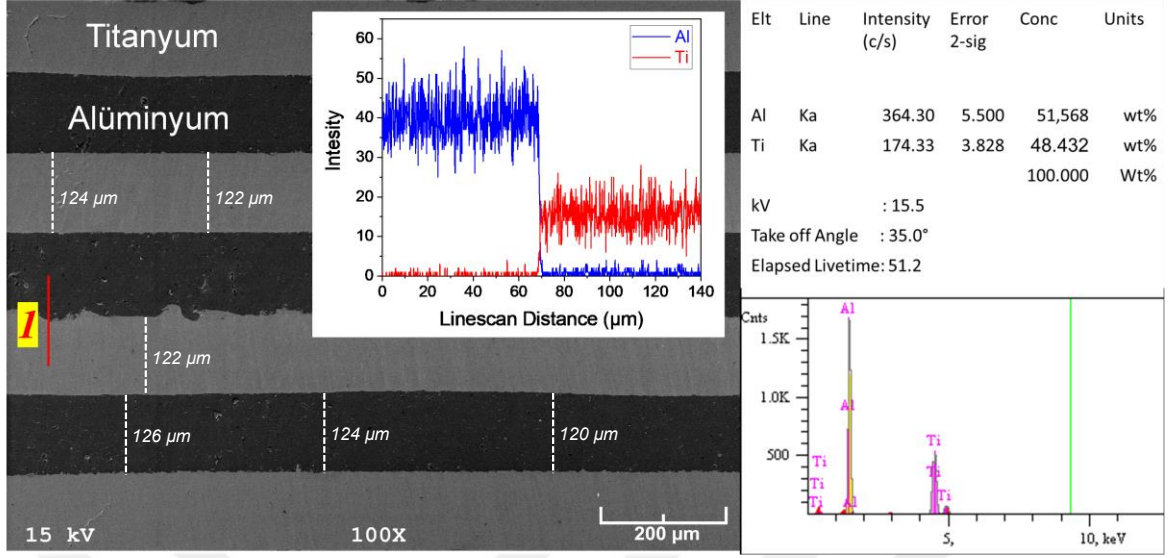
3.1. İç Yapı

3.1.1. Isıl İşlem Öncesi İç Yapı

UEİ yöntemiyle üretilmiş 5-TMK ve 7-TMK plakalardan kalınlıkları doğrultusunda alınan metalografi numunelerinin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 28-a ve b'de görülmektedir. Kesitlerde görülen tabakalardan açık renkli olanlar titanyuma karşılık gelirken koyu renkli tabakalar alüminyum tabakalarına karşılık gelmektedir. Bu sebeple zımparalama ve parlatma işlemlerine müteakip titanyum ve alüminyum tabakalarını birbirinden ayırt etmek amacıyla herhangi bir dağlama işlemine gerek duyulmamıştır. Şekil 28-a'da görüldüğü üzere 5-TMK plaka sırayla dizilmiş 6'sı titanyum ve 5'i alüminyum olmak üzere 11 adet tabakadan oluşmaktadır. 7-TMK plaka ise yine sırayla dizilmiş 7'si titanyum ve 6'sı alüminyum olmak üzere 15 adet tabakadan oluşmaktadır. Dizilim en altta titanyum ile başlamış ve istenilen çift tabaka sayısına ulaşıldıktan sonra son bir titanyum tabaka ile kapatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 28. Isıl işlem öncesi TMK plakaların kesitlerine ait optik mikroskop görüntüleri, a) 5-TMK, b) 7-TMK

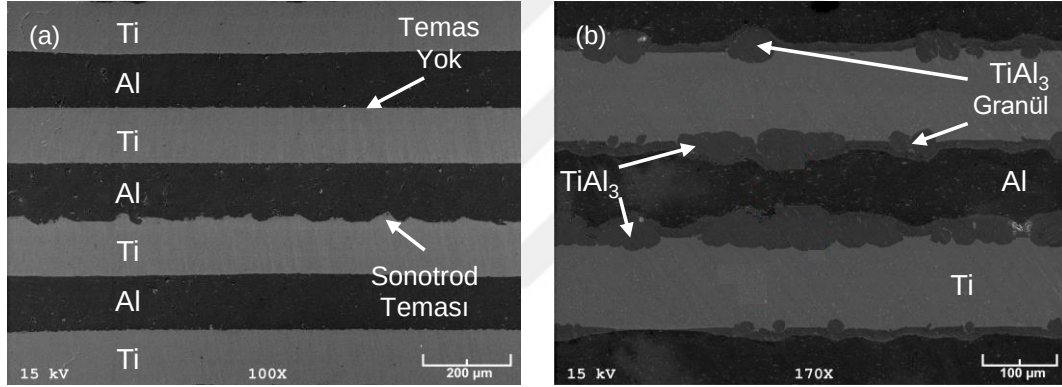


Şekil 29. a) Isıl işlem öncesi TMK plakanın kesitinden alınan TEM görüntüsü, b) şekildeki -1- numaralı kırmızı çizgi boyunca alınan EDS'e ait tarama grafiği, c) -1- numaralı kırmızı çizgi boyunca EDS'e ait element dağılımı

Şekil 29-a'daki TEM görüntüsünde yine açık renkli tabaka titanyumu, koyu renkli tabaka alüminyuma karşılık gelmektedir. Yine aynı şekildeki TEM görüntüsü üzerindeki -1- numaralı kırmızı çizgi boyunca alınan EDS verisi de bu ayrımı doğrulamaktadır. Hem titanyum hem de alüminyum tabakaların farklı noktalarında yapılan tabaka kalınlık ölçümleri sonucunda birleşme işlemi sonucunda titanyum kalınlığı ortalama 124 μm iken alüminyumun ortalama kalınlık değeri 123 μm olarak ölçülmüştür. Folyoların her ikisi için de birleşme işlemi öncesi kalınlıkları 127 μm olduğu dikkate alınırse folyoların kalınlıkları titanyum ve alüminyum için sırasıyla 3 ve 4 μm civarında azalmıştır. Birleşme esnasında folyolar arasında metalurjik bağ oluşumunda difüzyon ve plastik deformasyon ile gerçekleşir. Folyoların birbirine temas ettiği arayüzeyde meydana gelen plastik deformasyon arayüzey çevresinde birleştirilen malzeme özellikleri ev birleştirme değişkenlerine bağlı olarak 20-60 μm aralığında değişmektedir. Folyoların kalınlıklarındaki bu difüzyon ve plastik deformasyon mekanizmalarının bileşik etkisi ile açıklanabilir (de Vries, 2004; Mao, 2016).

3.1.2. Isıl İşlem Sonrası İç Yapı

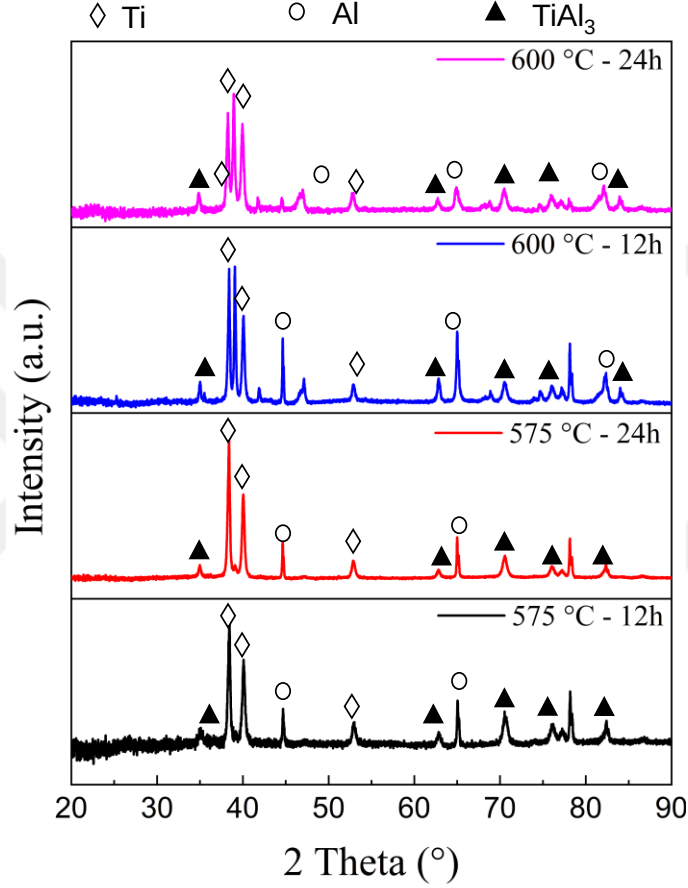
Şekil 30-a'da TMK numunenin ısıtıl işlem öncesi kesitine ait TEM görüntüsü ve Şekil 30-b'de ısıtıl işlem sonrası kesite ait TEM görüntü mevcuttur. Şekil 30-b'de titanyum ve alüminyum tabakalar yine sırasıyla açık ve koyu renkli olarak görülmektedir. Öte yandan her bir alüminyum-titanyum tabaksı arasında farklı bir tabaka meydana gelmiştir. Bu tabaka titanyum ve alüminyum bileşiklerinden meydana gelen intermetalik fazının oluşturduğu tabakadır. Bu bileşikler veya diğer adıyla titanyum aluminidler arasında $TiAl$, Ti_3Al , $TiAl_3$ vb. titanyum bileşikleri yer almaktadır. Şekil 30'dan da görüleceği üzere bu tabakanın rengi alüminyumun koyu ve titanyumun açık renkleri arasında bir tonda gri renktedir. Bu da fazın diğer tabakalardan herhangi bir analiz işlemi gerektirmeden ayırt edilmesini sağlar.



Şekil 30. a) Isıl işlem öncesi TMK numuneye ait kesitin TEM görüntüsü, b) ısıtıl işlem sonrasında MİL numuneye ait kesitin TEM görünümü ve $TiAl_3$ oluşumu

Farklı sıcaklık ve ısıtıl işlem süresi gibi parametrelerde üretilen MİL plakalardan alınan numuneler bu bileşiklerin varlığını teyit etmek için XRD analizine tabi tutulmuştur. Bu XRD analizler arasında 575 °C sıcaklıkta 12 ve 24 süre ile ve 600 °C sıcaklıkta 12 ve 24 saat ısıtıl işlem sürelerinde üretilen numunelere ait XRD analizleri Şekil 31'de verilmiştir. XRD analizleri incelendiğinde ısıtıl işlem sonrasında Ti-Al TMK plakaların titanyum ve alüminyum tabakaları arasında oluşan titanyum bileşiğinin (intermetalik faz) $TiAl_3$ olduğu görülmüştür (Boulechar vd., 2010; Clark, 1949; Hansen vd., 1952; Schubert vd., 1962; Vailionis vd., 2011). Diğer titanyum bileşiklerinden çok az miktarda yer alsa da esas intermetalik fazı $TiAl_3$ oluşturmaktadır. Literatürdeki çalışmalar $TiAl_3$ 'ün diğer titanyum aluminidlerden daha önce oluştuğunu göstermiştir (L. M. Peng, Li, vd., 2005). Literatürde verilen serbest enerji hesaplamaları sonucunda, 25-1200 °C sıcaklık aralığında $TiAl_3$ 'ün

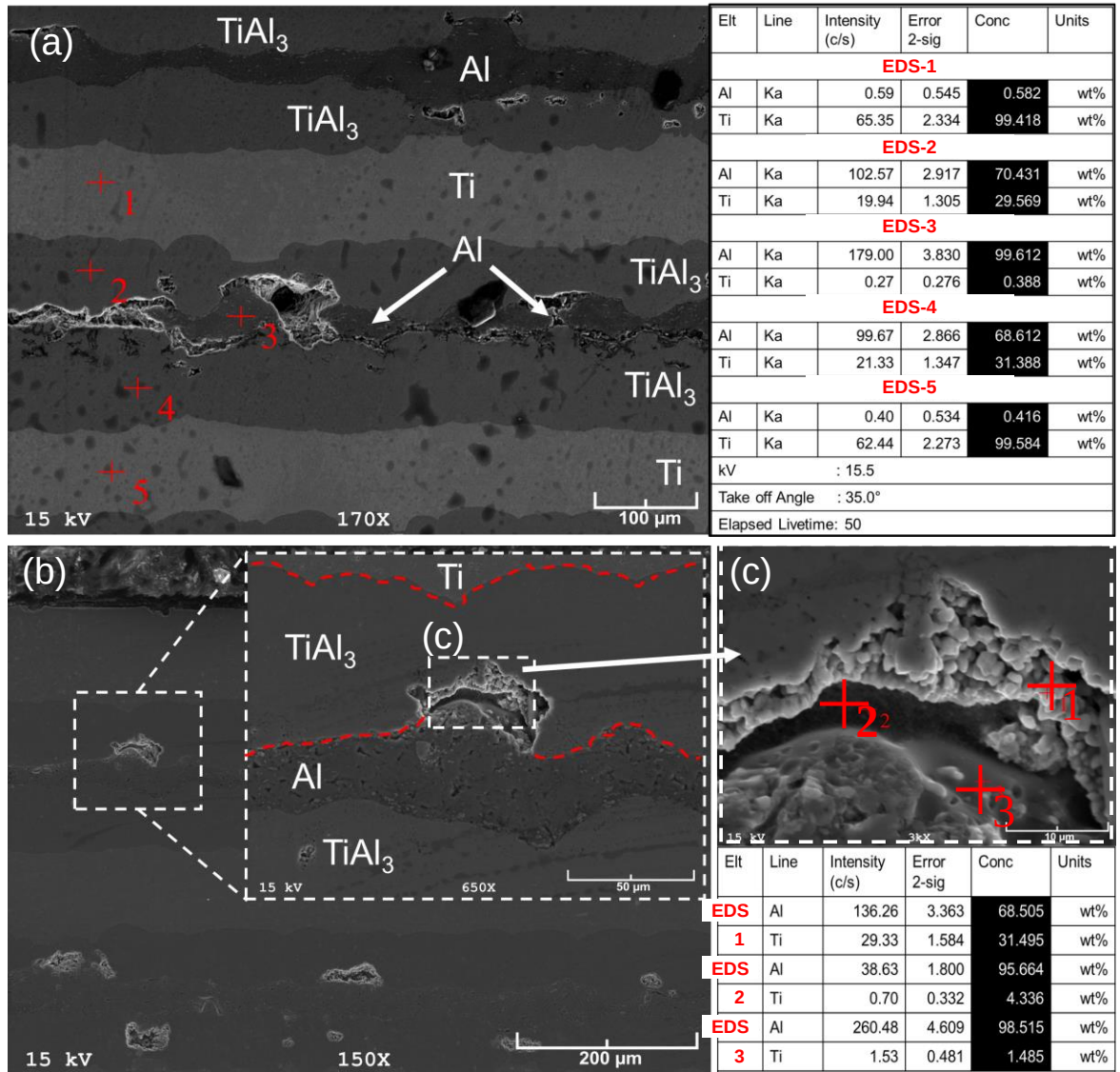
serbest enerjisinin diğer Ti-Al bileşiklerine nazaran çok daha düşük olduğu bilinmektedir (L. M. Peng, Li, vd., 2005; L. M. Peng, Wang, vd., 2005). Dolayısıyla oluşan fazın katı fazdaki titanyum ve sıvı fazdaki alüminyumun termodinamik reaksiyonu sonucunda $TiAl_3$ oluşması hem doğal hem de XRD analizi sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 31. Farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen ısıt işlemler sonucu MİL numunelerin kesitleri üzerinde elde edilen X-ışını kırınım ölçer sonuçları

Çalışma kapsamında kullanılan Ti-Al TMK plakaların imalatı esnasında sonotrotun tüm Ti ve Al tabakalarına temas etmediği 2-3 kat folyo serildikten sonra sonotrotun temas ettiği ve birleştirme işleminin bu şekilde gerçekleştirildiği “Ultrasonik Eklemeli İmalat Yöntemiyle Plaka Üretimi” başlığı altında belirtilmişti. Şekil 30-a’da sonotrot temasının olduğu ve olmadığı yüzeyler ok işaretleriyle gösterilmiştir. Burada sonotrotun yüzey dokusu sebebiyle sonotrot-folyo (Ti) temas arayüzeyinde pürüzlü bir yapı meydana gelmiştir. Bu pürüzlü yapı, birleştirme işleminin ardından eklenen Al folyo ile sonotrot temasının gerçekleştiği Ti folyo arasındaki Ti-Al arayüzeyindeki temas alanını arttırmaktadır. Temas

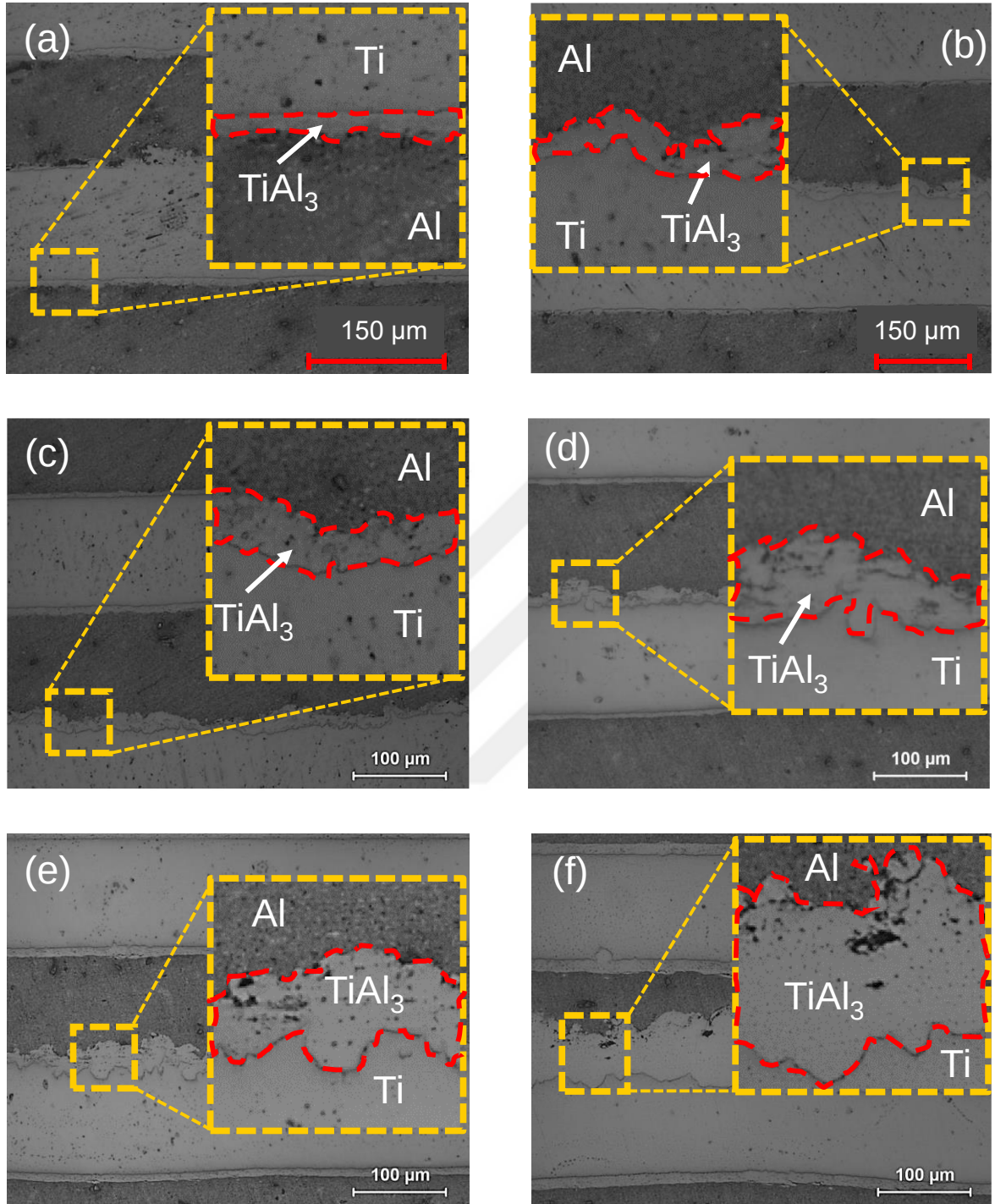
alanının artışı ile ısıtıl işlem esnasında Ti ve Al atomlarının difüzyonun sağlandığı temas arayüzeyi de artmış olmaktadır. Şekil 30-c’de meydana gelen daha kalın intermetalik tabakası oluşumu Ti-Al temas arayüzeyinde meydana gelen temas halindeki bu alan artışı ile açıklanabilir. $TiAl_3$ granüllü yapılar, bu düzgünsüzlük kaynaklı bölgelerde çok daha önceleri oluşmaya başladığından granüllerin yayılmasıyla oluşan intermetalik tabaka kalınlığı daha önce artmış ve sonotrot temasının gerçekleştiği yüzeylerde çok daha fazla miktarda (kalınlıkta) $TiAl_3$ faz oluşmuştur.



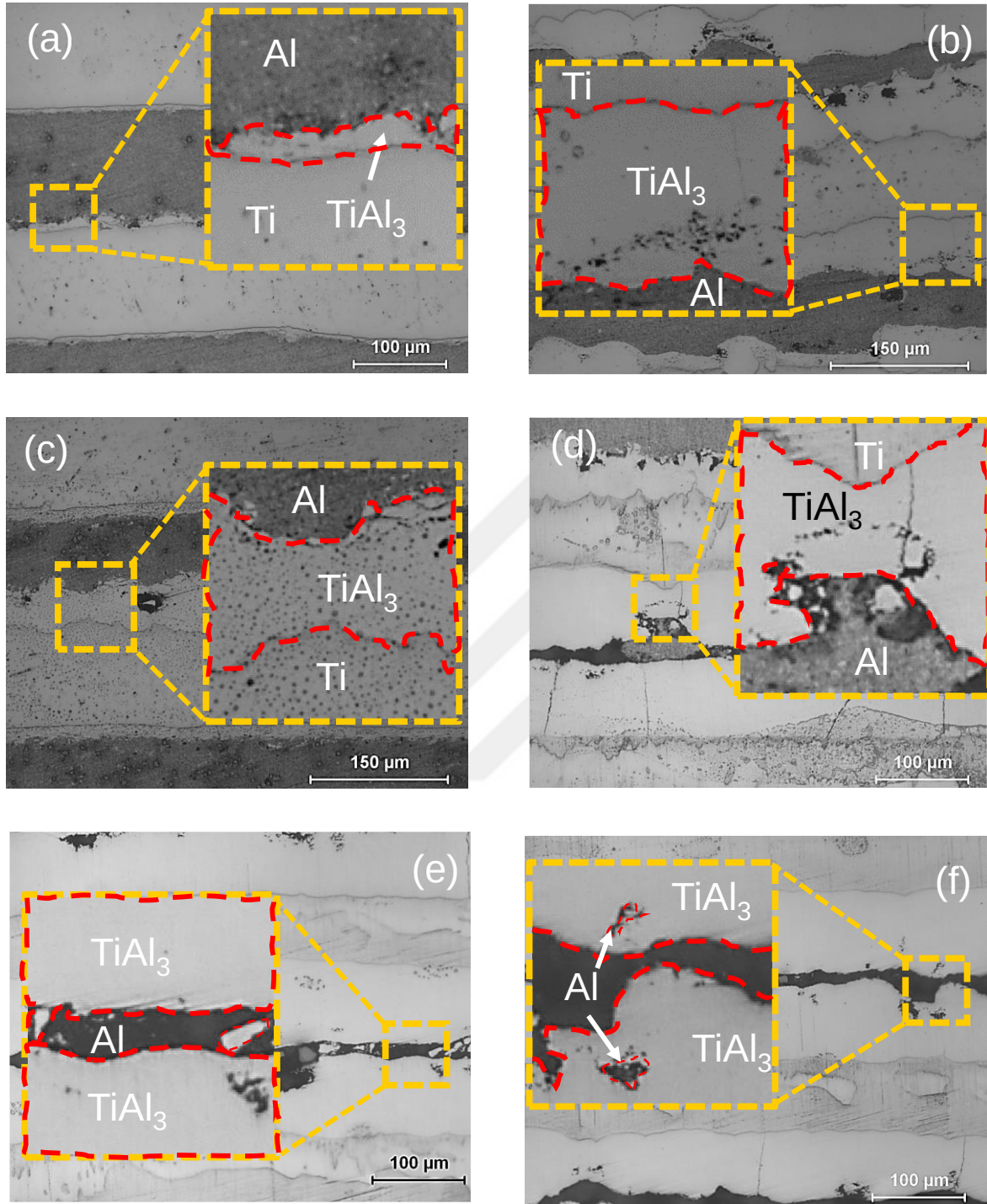
Şekil 32.TMK numunelerin ısıtıl işlem (600 °C ve 36 saat) sonrasında oluşan MİL kesitinde $TiAl_3$ oluşumun detaylı görünümü ve EDS analizi sonuçları

Şekil 32-a'da TMK numunelerin 600 °C ve 36 süresince ısıtılma işlemi ardında oluşan MİL numunenin kesitinden alınan bir TEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 32-a'daki tabloda farklı noktalardan alınan EDS analizleri bulunmaktadır. #1 ve #5 numaralı noktalardaki EDS analizi sonucunda ağırlıkça %99.5 civarında Ti elementi gözlemlenirken #3 numaralı noktada alınan EDS analizi sonucunda ağırlıkça %99.6 Al elementi olduğu ölçülmüştür. Öte yandan Ti ve Al tabakalar arasındaki intermetalik faz tabakalarındaki #2 ve #4 noktalarından alınan EDS ölçümleri sonucunda sırasıyla ağırlıkça %70.4 Al - %29.6 Ti ve %68.6 Al - %31.4 Ti tespit edilmiştir. Bu oranlar $TiAl_3$ intermetalik fazının varlığına işaret ederken XRD analizlerindeki bulguları desteklemektedir.

Şekil 32-a ve b detaylı incelendiğinde titanyum ve alüminyum arasında oluşan $TiAl_3$ intermetalik faz tabakasının alüminyum ile birleştiği arayüzeyde bazı bölgelerde çukurcuklar olduğu görülmektedir. Çukurcukların olduğu bölgelerden bir tanesine ait TEM görüntüsü Şekil 32-c'de büyütülerek verilmiştir. Bu çukurcuk içerisinde 3 intermetalik faz tarafından alüminyuma doğru 3 farklı noktada EDS verisi alınmıştır. #1 numaralı noktada alınan veriler buradaki Ti ağırlıkça oranının %31.5 ve Al oranının %68.5 olduğunu göstermiştir. Öte yandan #2 ve #3 numaralı noktalardaki EDS verileri buralarda sırasıyla ağırlıkça %95.6 ve %98.5 oranlarında Al elementi varlığını göstermektedir. Bu veriler değerlendirilirse #3-2-1 doğrultusunda Al ağırlıkça oranı azalmakta ve Ti oranı artmaktadır. Dolayısıyla intermetalik oluşum süreci devam etmektedir. Ayrıca Şekil 32-c'deki #1 numaralı noktaya dikkatlice bakıldığında burada gri renkli çekirdeklenme şeklinde bir oluşum meydana gelmiştir. Bu durum, intermetalik oluşumu esnasında bölgenin Ti ve Al elementlerince zenginleştiği ve $TiAl_3$ intermetalik fazın oluşmaya başladığı veya devam ettiğinin bir göstergesidir (Harach & Vecchio, 2001).



Şekil 33. TMK numunelere 575 °C sıcaklıkta ve farklı sürelerde uygulanan ısıtıl işlemin ardından elde edilen MİL numunelerin kesitlerine ait optik mikroskobu görüntüleri, a) 6 saat, b) 12 saat, c) 18 saat, d) 24 saat, e) 30 saat, f) 36 saat

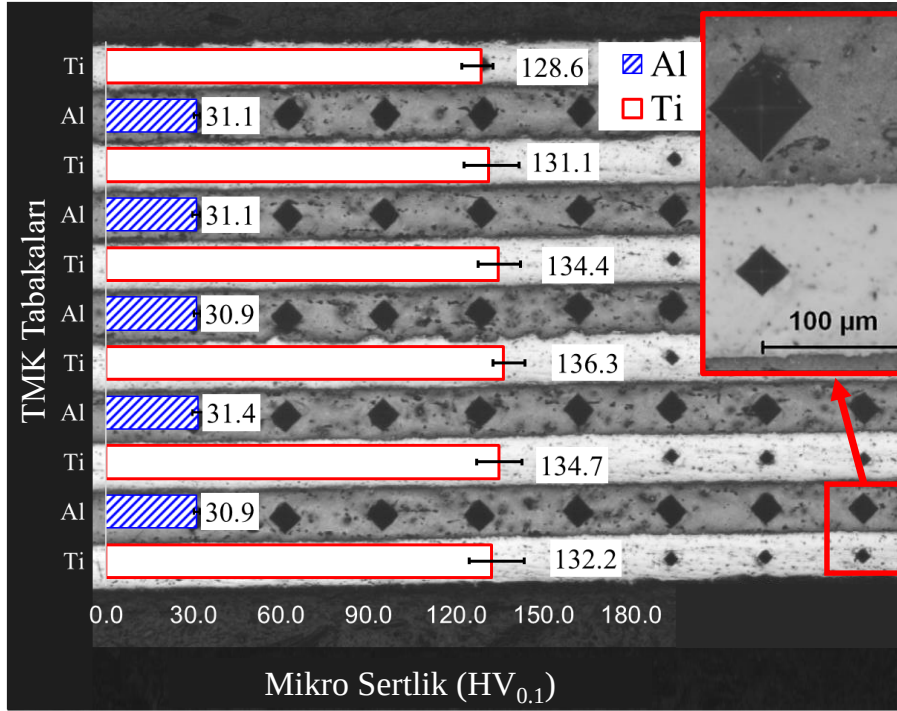


Şekil 34. TMK numunelere 600 °C sıcaklıkta ve farklı sürelerde uygulanan ısıtıl işlemin ardından elde edilen MİL numunelerin kesitlerine ait optik mikroskobu görüntüleri, a) 6 saat, b) 12 saat, c) 18 saat, d) 24 saat, e) 30 saat, f) 36 saat

3.2. Mekanik Özellik İncelemeleri

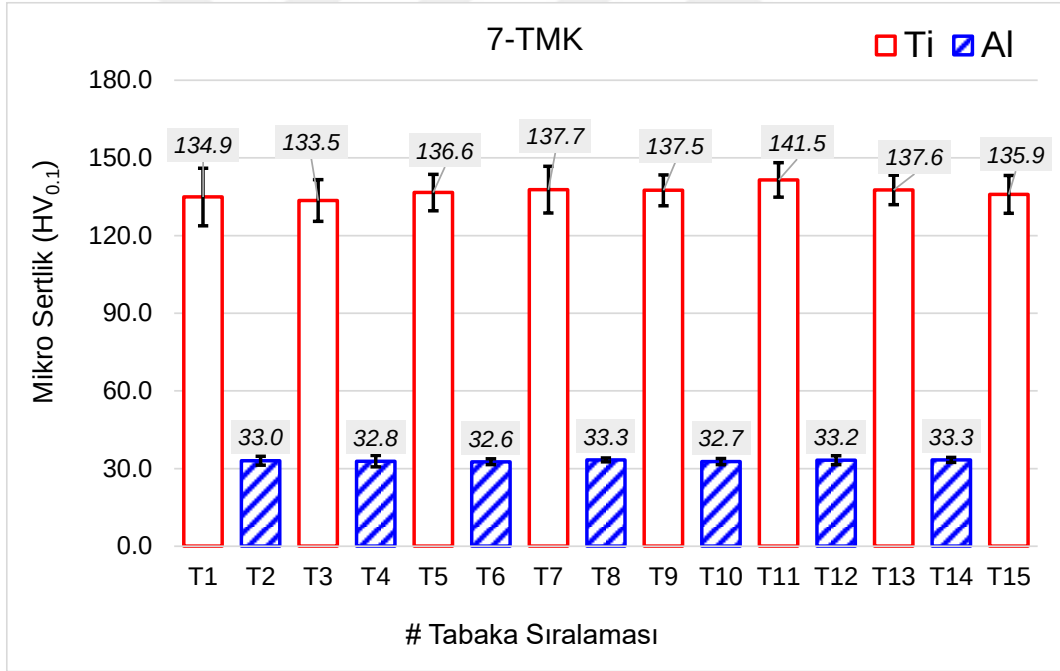
3.2.1. Sertlik Özellikleri

Sertlik ölçümleri Vickers sertlik skalasına göre gerçekleştirilmiştir. Buradaki sertlik ölçümlerini ısıtma işlem öncesi ve sonrası olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Isıtma işlem öncesi sertlik ölçümleri 100 g yük altında hem 5-TMK ve 7-TMK numunelerin hem titanyum hem de alüminyum tabakalarında en üst tabakadan en alt tabakaya doğru her tabakada onar ölçüm alınarak gerçekleştirildi. 5-TMK numunelerde ısıtma işlem öncesinde alınan sertlik ölçümlerinin optik mikroskop görüntüsü ve ölçülen değerleri gösteren sütun grafik Şekil 35’te verilmiştir. Grafik üzerindeki her bir sütun farklı bir tabakadaki (Ti veya Al) ölçümlere karşılık gelmektedir. Her bir sütunun değeri karşıladığı tabakadan alınan on ölçümün ortalamasını ifade eder. Bu değerler alüminyum tabakalar için 30.9-31.4 $HV_{0.1}$ aralığında değişirken titanyum tabakalar için 128.6 ila 136.3 $HV_{0.1}$ aralığında değişmektedir. Tüm tabakadaki alüminyum tabakalardan alınan sertlik ölçümlerinin ortalama değeri 31 $HV_{0.1}$ iken yine tüm tabakadaki titanyum tabakalardan alınan sertlik ölçümlerinin ortalama değeri 133 $HV_{0.1}$ olarak hesaplanmıştır.



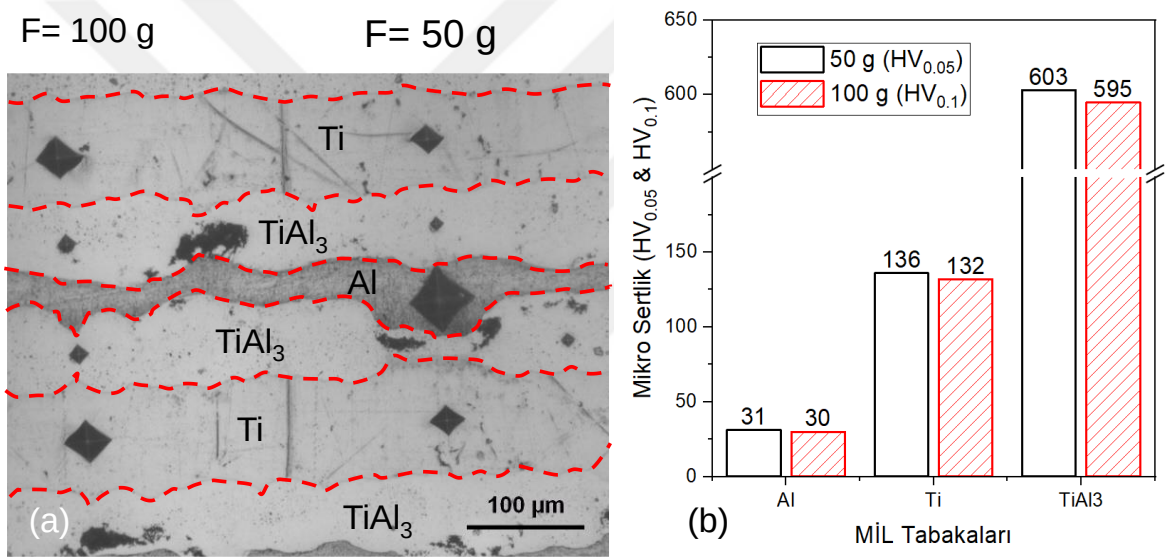
Şekil 35. Isıtma işlem öncesinde 5-TMK kesitinden Ti ve Al tabakalarından alınan mikro sertlik ölçüm değerleri ve optik görüntüleri

7-TMK ısıtıl işlem öncesinde her bir tabakadan alınan sertlik ölçümleri için yukarıda 5-TMK için izlenen prosedür tekrar edilmiştir. Buna göre 7-TMK plakanın alüminyum tabaklarından alınan sertlik değerleri 32.6-33.3 HV_{0.1} aralığında değişirken titanyum tabakalarının sertlik ortalama değerleri 134.9 ila 141.5 HV_{0.1} aralığında değişmektedir. Ancak numunenin tüm alüminyum tabakalarının ortalama sertlik değeri 33 HV_{0.1} ve tüm titanyum tabakalarının sertlik değeri ortalaması 137 HV_{0.1} olarak hesaplanmıştır. 7-TMK'dan alınan sertlik değerleri 5-TMKya göre biraz daha fazla çıkmasına rağmen birbirlerinden çok da farklılık göstermemektedir. Öte yandan alüminyum ve titanyumun folyo hallerinden alınan sertlik değerleri sırasıyla ise sırasıyla 31 HV_{0.1} ve 136 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla ultrasonik birleştirme sonucunda alüminyum ve titanyumun sertlik değişiminde bir etkisi yoktur.



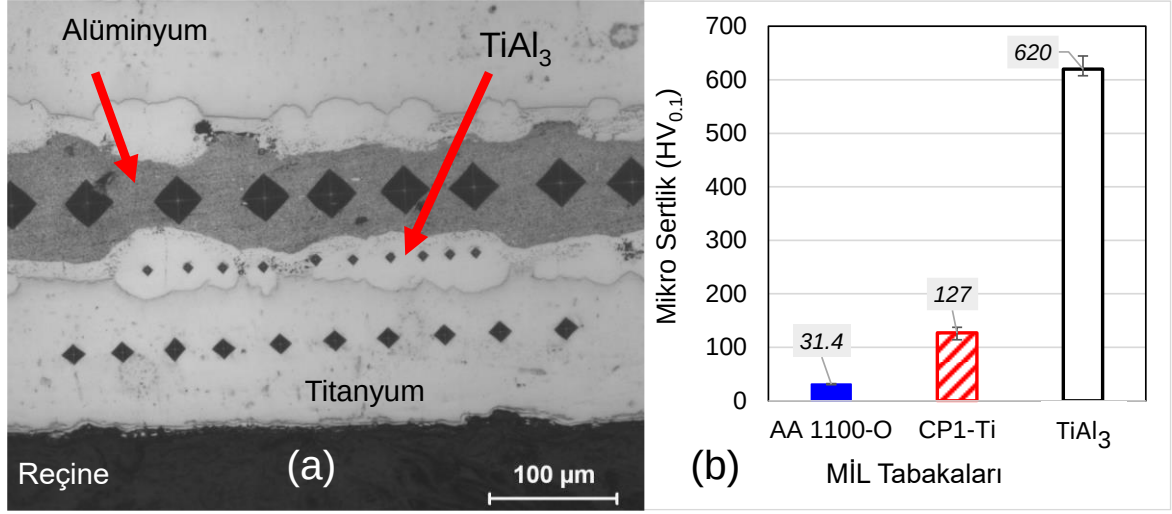
Şekil 36. Isıl işlem öncesinde 7-TMK plakanın kesitinden Ti ve Al tabakalarının her birinden alınan mikro sertlik ölçüm değerleri (T: Tabaka, tek numaralar Ti, çift numaralar Al)

Isıl işlem sonrasında yine arta kalan Ti ve Al tabakalar ile aralarında oluşan $TiAl_3$ intermetalik faz tabakasının sertlik değerleri yine Vickers sertlik skalasına göre ölçülmüştür. Bu bölgelerden alınan sertlik ölçümlerine ait izlerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 37-a'da bulunmaktadır. Isıl işlem öncesinde Ti ve Al tabakalar üzerinden alınan sertlik ölçümlerinde 100 g yük kullanılmıştı. Isıl işlem sonrasındaki ölçümlerde ise 100 g yük yanı sıra 50 g yük ile de ölçümler gerçekleştirilmiştir. 50 g yük ile alınan ölçümler de Şekil 37-a'da mevcuttur. Yük etkisinin karşılaştırmalı olarak incelemesi Şekil 37-b'deki grafikte görülmektedir. Grafikten de anlaşılabacağı üzere yük değişiminin ölçülen sertlik değerleri üzerinde bir etkisi yoktur.



Şekil 37. Sertlik ölçümü için farklı yük değerlerinin etkisi, a) optik mikroskop görüntüsü, b) sertlik ölçüm değerleri

Isıl işlem sonrasında intermetalik oluşumuna katılmayan metalik Ti ve Al tabakaların sertlik ortalama değerleri sırasıyla 31.4 HV_{0.1} ve 127 HV_{0.1} olarak ölçülmüşken ısıtıl işlem öncesindeki değerlerine oldukça yakındır. Bu ölçümlere ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 38-a'da ölçümlere ait grafik Şekil 38-b'de bulunmaktadır. Ancak intermetalik faz $TiAl_3$ üzerinden alınan sertlik değerlerinin ortalaması 600 HV_{0.1} civarında olduğu ve literatür ile uyumluk gösterdiği gözlemlenmiştir (L. Krüger vd., 2003). Bu değer Al tabakanın sertliğinin yaklaşık yirmi katı iken Ti tabakanın sertliğinin yaklaşık 5 katına yakındır. Bu sertlik değerinin yüksek oluşu $TiAl_3$ fazın yüksek gevrek davranışının da bir ifadesidir.

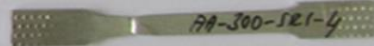
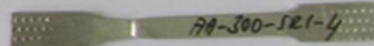


Şekil 38. Isıl işlem sonrasında, a) MİL kesitinde farklı tabakalarda alınan sertlik ölçümlerine ait optik mikroskop görüntüsü, b) MİL kesitinde farklı tabakalara ait sertlik ölçüm değerleri

3.2.2. Çekme Deneyinden Elde Edilen Özellikler

Malzemelerin dayanımları hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla gerçekleştirilen çekme testleri hem 5-TMK hem de 7-TMK numuneler üzerinde gerçekleştirilirken TMK'ların imalatında kullanılan ve 5-TMK ile aynı kalınlıktaki CP1-Ti ve AA100-O sac numuneler üzerinde de uygulanmıştır. Çekme testleri verilerinin karşılaştırması farklı deformasyon hızları (0.001, 0.01, 0.1 ve 1 s⁻¹) ve sıcaklık (25, 150, 225 ve 300 °C) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde kullanılan numunelere ait tekrarlardan birer tanesinin test sonrası fotoğrafları Şekil 39'da verilmiştir.

Deformasyon hızı etkisinin incelendiği çekme testleri oda sıcaklığında (25 °C) gerçekleştirilirken, sıcaklık etkisinin incelendiği çekme testleri sabit 0.001 s⁻¹ deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin yöne bağlılığının incelendiği haddeleme doğrultusu ile 45° ve 90° doğrultularda hazırlanan numuneler ise oda sıcaklığında (25 °C) ve 0.001 s⁻¹ deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Metnin bu noktasından itibaren testlerde kullanılan 0.001, 0.01, 0.1 ve 1.0 s⁻¹ deformasyon hızları sırasıyla SR1, SR2, SR3 ve SR4 olarak, testlerde kullanılan 25, 150, 225 ve 300 °C sıcaklıkları ise T1, T2, T3 ve T4 kısaltmaları ile tanımlanacaklardır.

10 mm 		5-TMK	7-TMK
@ 25 °C	0.001 s ⁻¹		
	0.01 s ⁻¹		
	0.1 s ⁻¹		
	1.0 s ⁻¹		
@ 0.001 s ⁻¹	150 °C		
	225 °C		
	300 °C		
Parametreler		CP1-Ti	AA1100-0
@ 25 °C	0.001 s ⁻¹		
	0.01 s ⁻¹		
	0.1 s ⁻¹		
	1.0 s ⁻¹		
@ 0.001 s ⁻¹	150 °C		
	225 °C		
	300 °C		

Şekil 39. Farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında çekme testine tabi tutulan 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O numuneler

Çekme testleri sonunda test cihazından alınan kuvvet-yer değiştirme verileri alınarak bu veriler işlenmiş ve mühendislik gerilmesi-mühendislik uzaması eğrileri elde edilmiştir. Bunun için sırasıyla Denklem (10), (11) ve (12)'den faydalanılmıştır.

$$\Delta l = l - l_0 \quad (10)$$

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12)$$

Burada Denklem (10), (11) ve (12) içerisinde,

Δl : net deformasyon miktarını

l_0 : başlangıç ölçü uzunluğunu

l : son ölçü uzunluğunu

F : ölçülen kuvvet değeri

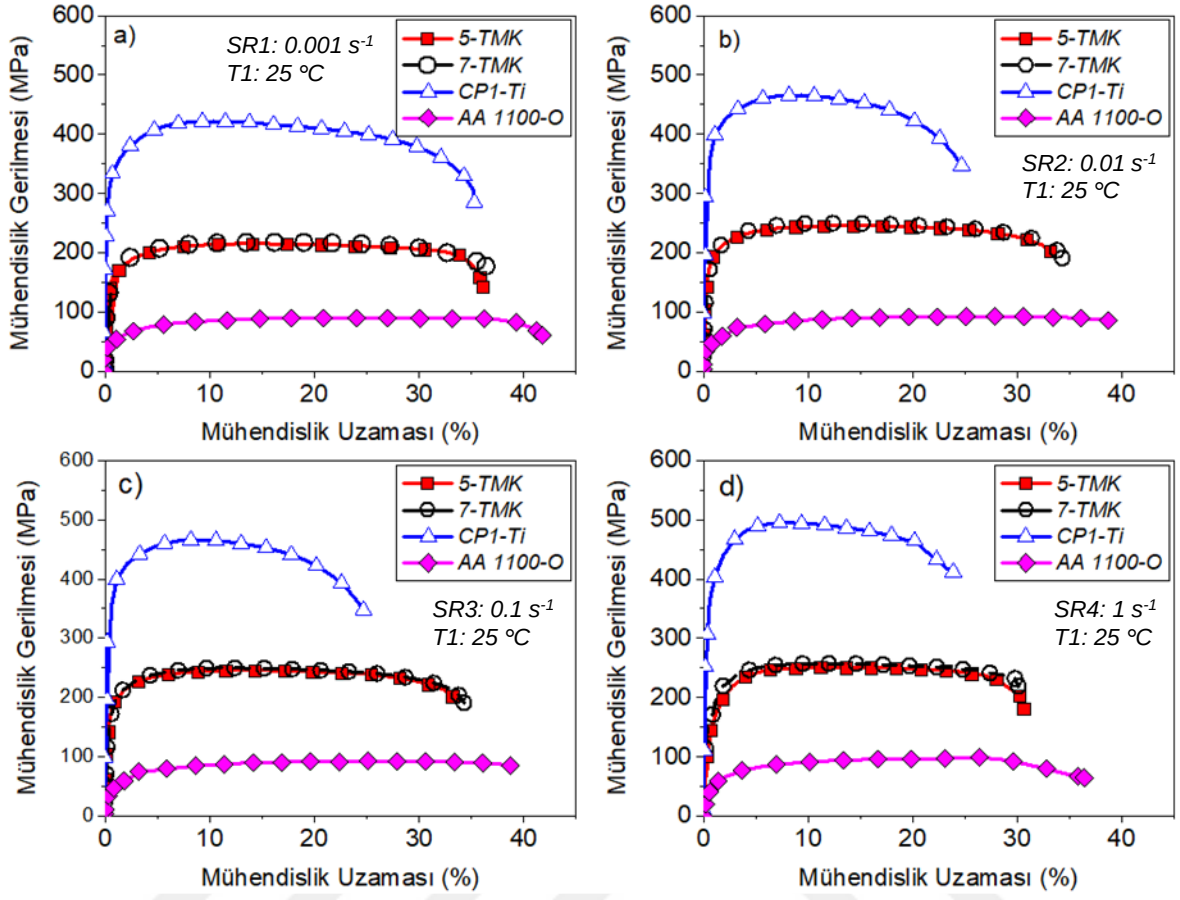
A_0 : başlangıç kesit alanı

$\sigma_{müh}$: mühendislik gerilmesi

$\varepsilon_{müh}$: mühendislik birim şekil değişimi değerlerini ifade eder.

Bu denklemler kullanılarak elde edilen mühendislik gerilmesi-mühendislik uzaması eğrileri çizdirilmiştir. Oda sıcaklığında ve farklı deformasyon hızlarında haddeme doğrultusunda gerçekleştiren çekme deneylerinden yukarıdaki denklemler kullanılarak çizdirilen 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O'ya ait mühendislik gerilmesi-mühendislik uzaması eğrileri Şekil 40'ta verilmiştir. Burada bu malzemelerin Şekil 40-a'da SR1 deformasyon hızındaki, Şekil 40-b'de SR2 deformasyon hızındaki, Şekil 40-c'de SR3 deformasyon hızındaki ve Şekil 40-d'de ise SR4 deformasyon hızındaki mühendislik gerilmesi-mühendislik uzaması eğrilerinin test edilen malzemeye göre karşılaştırması görülmektedir. Aynı denklemler kullanılarak sabit SR1 deformasyon hızında ve farklı sıcaklıklarda çizdirilen 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O'ya ait mühendislik gerilmesi-mühendislik uzaması eğrileri Şekil 41'de verilmiştir. Burada bu malzemelerin Şekil 41-a'da oda sıcaklığındaki (T1) sıcaklığındaki, Şekil 41-b'de T2 sıcaklığındaki, Şekil 41-c'de T3 sıcaklığındaki ve Şekil 41'de ise T4 sıcaklığındaki mühendislik gerilmesi-mühendislik uzaması eğrilerinin test edilen malzemeye göre karşılaştırması görülmektedir.

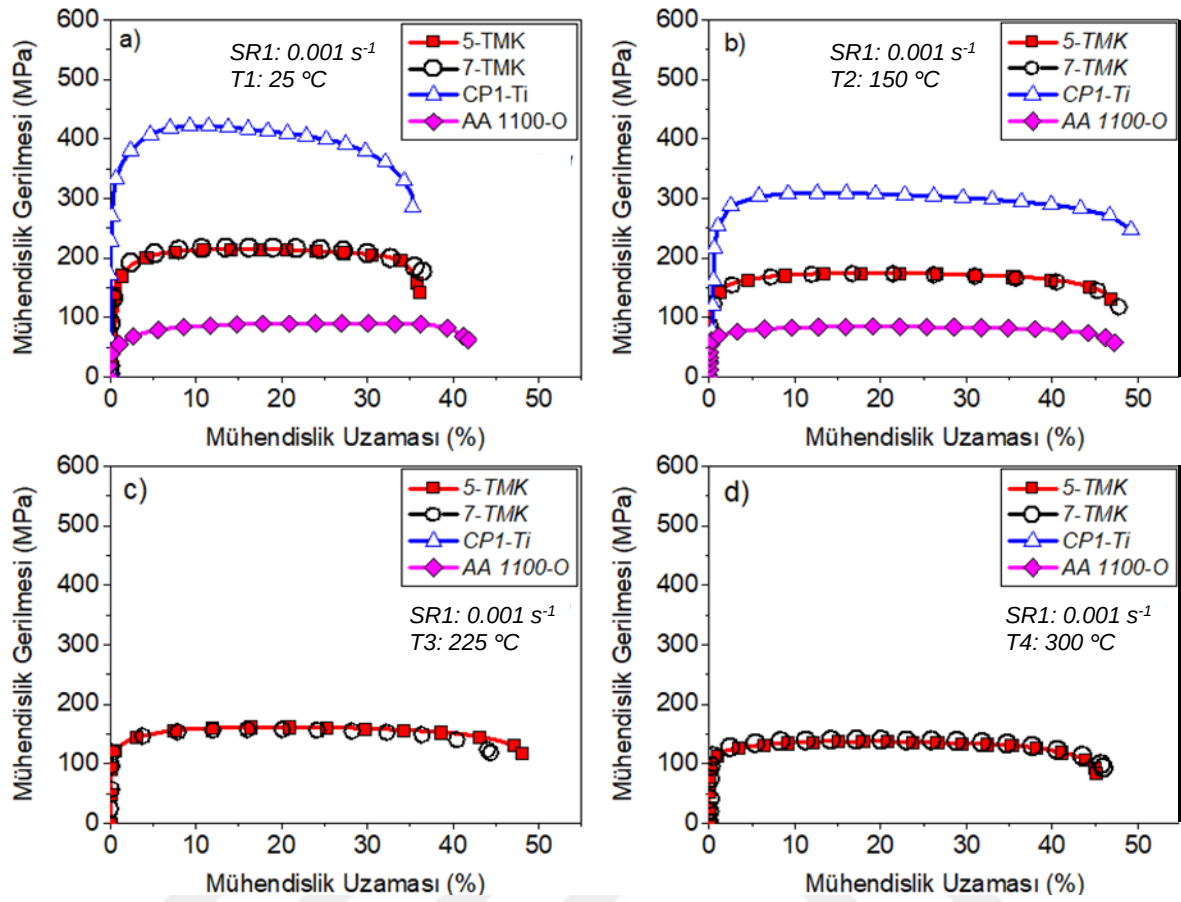
Şekil 40'daki eğrilerden faydalanılarak 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O'ya ait σ_{Ak} (MPa): akma gerilmesi, $\sigma_{Çek}$ (MPa): çekme gerilmesi, U_{Top} (%): toplam uzama miktarı özelliklerinin deformasyon hızına bağlı değişen değerleri hesaplanmış ve Tablo 10'da detaylandırılmıştır. Şekil 41'deki eğrilerden faydalanılarak 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O'ya ait aynı mekanik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişen değerleri hesaplanmış ve Tablo 11'de detaylandırılmıştır. Tablo 10 ve Tablo 11'de listelenen veriler üç başarılı tekrar ile elde edilmiş eğrilerden elde edilen değerlerin ortalamasıdır.



Şekil 40. Oda sıcaklığında ve farklı deformasyon hızlarında elde edilen mühendislik gerilmesi-uzaması eğrilerinin karşılaştırılması, a) SR1: 0.001 s⁻¹, b) SR2: 0.01 s⁻¹, c) SR3: 0.1 s⁻¹, d) SR4: 1 s⁻¹

Tablo 10. Oda sıcaklığında ve farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler

Malzeme	Mekanik Özellikler	Deformasyon Hızı (s ⁻¹)			
		0.001	0.01	0.1	1.0
5-TMK	σ_{Ak} (MPa)	148	161	176	205
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	222	226	243	251
	Uzama (%)	36	35	32	30
7-TMK	σ_{Ak} (MPa)	151	155	166	193
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	215	225	250	264
	Uzama (%)	36	37	35	31
CP1-Ti	σ_{Ak} (MPa)	303	333	345	363
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	420	444	463	494
	Uzama (%)	37	30	25	26
AA 1100-O	σ_{Ak} (MPa)	39	42	42	41
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	92	93	94	97
	Uzama (%)	55	39	37	37



Şekil 41. Sabit deformasyon hızında ($SR1: 1 \times 10^{-3} s^{-1}$) ve farklı sıcaklıklarda elde edilen mühendislik gerilmesi-uzaması eğrilerinin karşılaştırılması, a) T1: 25 °C, b) T2: 150 °C, c) T3: 225 °C, d) T4: 300 °C

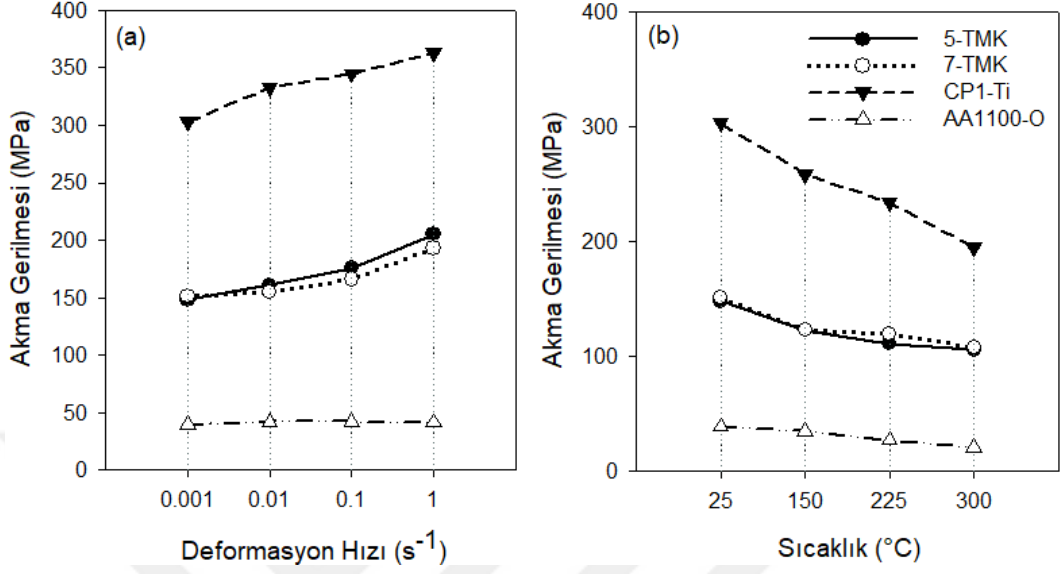
Tablo 11. Sabit $0.001 s^{-1}$ deformasyon hızında farklı test sıcaklıklarında gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler

Malzemeler	Mekanik Özellikler	Test Sıcaklığı (°C)			
		25	150	225	300
5-TMK	σ_{Ak} (MPa)	148	123	111	106
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	222	168	147	138
	Uzama (%)	36	50	45	46
7-TMK	σ_{Ak} (MPa)	151	123	120	108
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	215	168	157	139
	Uzama (%)	36	45	56	45
CP1-Ti	σ_{Ak} (MPa)	303	259	234	195
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	420	310	241	206
	Uzama (%)	37	51	43	46
AA 1100-O	σ_{Ak} (MPa)	39	35	27	21
	$\sigma_{Çek}$ (MPa)	92	85	68	49
	Uzama (%)	55	47	54	59

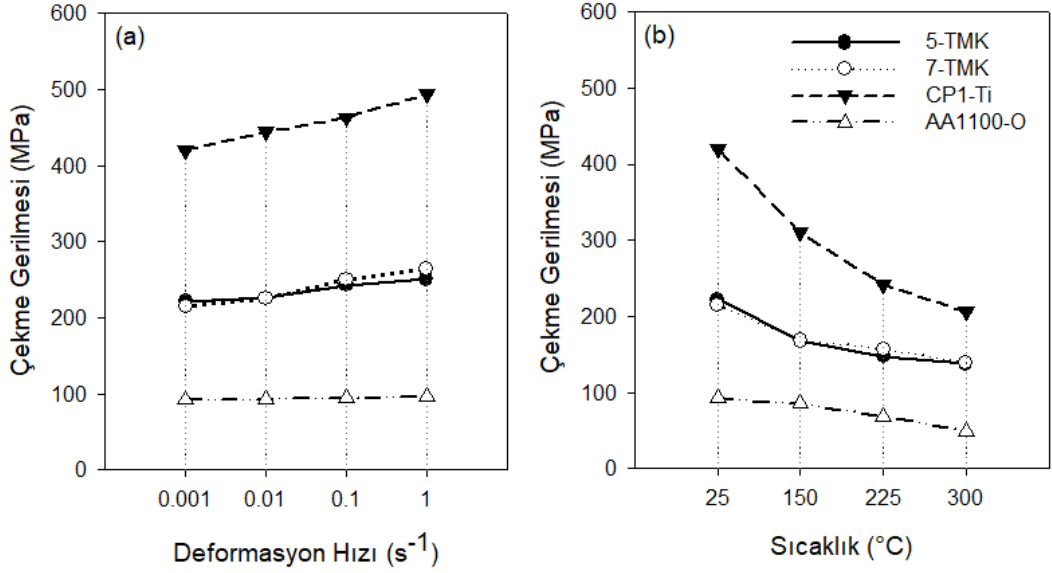
Tablo 10'daki veriler incelendiğinde deformasyon hızına bağlı olarak 5-TMK plakanın akma gerilmesi 148 MPa ile 205 MPa, çekme gerilmesi 222 MPa ile 251 MPa değerleri arasında değişirken, 7-TMK için akma gerilmesi 151 MPa ile 193 MPa, çekme gerilmesi değeri ise 215 ile 264 MPa arasında artan değerler olarak değişmektedir. CP1-Ti için de benzer bir durum söz konusudur. CP1-Ti'nin akma gerilmesi deformasyon hızına bağlı olarak 303 MPa ile 363 MPa arasında değişirken çekme gerilmesi 420 MPa ile 494 MPa arasında artan şekilde değişmektedir. Ancak, AA1100-O'yu değerlendirdiğimizde tam tersi bir davranış sergilediği görülmektedir. AA1100-O'nun deformasyon hızına bağlı olarak akma gerilmesi 39-42 MPa, çekme gerilmesi ise 92-97 gibi dar bir aralık değişmektedir. Aslında AA1100-O'nun değerlerinin yakınlığından da anlaşılacağı üzere deformasyon hızının AA1100-O mekanik özellikleri üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Ancak hem CP1-Ti, hem de 5-TMK ve 7-TMK deformasyon hızı ile değişim göstermektedir. 5-TMK ve 7-TMK plakaları, CP1-Ti ve AA1100-O folyoların bir araya gelmesiyle üretilmiş birer kompozit malzeme olduklarına göre hem 5-TMK hem de 7-TMK'nın deformasyon hızına bağlı özellikleri üzerinde CP1-Ti katkısının etkin olduğu aşikardır. Şekil 42-a'da 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O malzemelerinin akma gerilmesi değerlerinin deformasyon hızına bağlı değişim grafiği verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere CP1-Ti, 5-TMK ve 7-TMK'nın akma artan yönde değişirken AA1100-O'nun akma gerilmesi değerlerinin değişim eğrisi yatay bir trend sergilemektedir. Şekil 43-a'da ise çekme gerilmesi değerlerinin deformasyon hızına göre değişim grafikleri verilmiştir. Çekme gerilmesi değerlerinde de akma gerilmesi değerlerine benzer biçimde CP1-Ti, 5-TMK ve 7-TMK deformasyon hızıyla artan yönde değişim görülmektedir. Öte yandan yine AA1100-O'nun çekme gerilmesini deformasyon hızına göre değişimini tanımlayan eğride yine yatay bir trend vardır. Dolayısıyla açık bir şekilde görülmektedir ki deformasyon hızının AA1100-O'nun akma ve çekme gerilmesi değerleri üzerinde hiçbir etkisi yoktur.

Ancak Şekil 43'te verilen malzemelerin toplam uzama değerlerinin deformasyon hızına bağlı değişim grafiği incelendiğinde tüm malzemelerin kopma uzaması değerlerinde deformasyon hızına bağlı olarak düşüş gözlenmektedir. Deformasyon hızının AA1100-O'nun akma ve çekme gerilmesi üzerinde herhangi bir etkisi bulunmazken AA1100-O'nun kopma uzamasındaki deformasyon hızına bağlı düşüş hızı diğer malzemelere nispeten çok daha fazladır. En düşük kopma uzaması değerleri CP1-Ti'de görülürken 5-TMK ve 7-TMK'nın kopma uzaması değerleri SR1 hariç diğer deformasyon hızlarında AA1100-O'nun

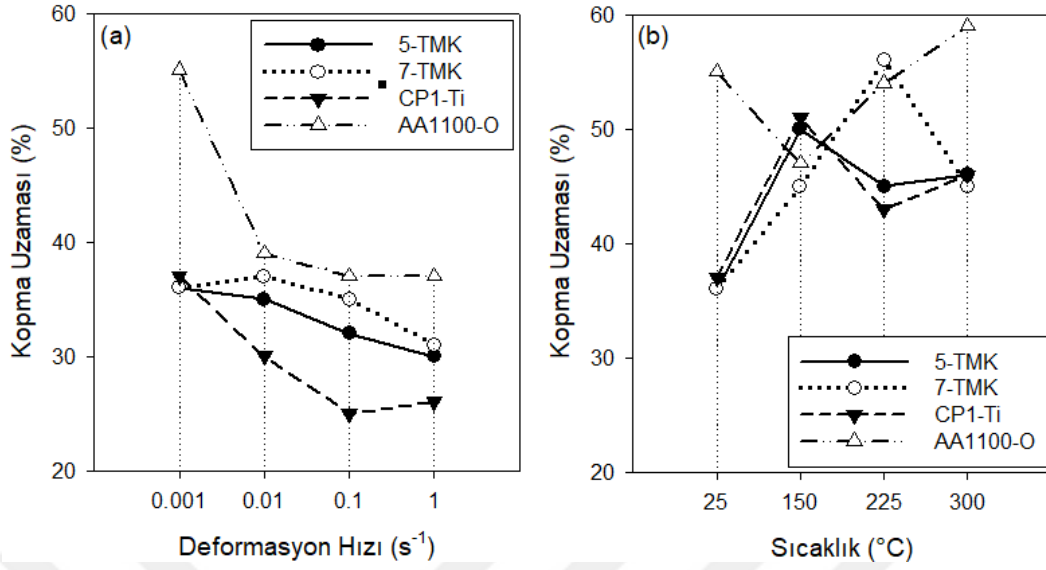
kopma uzaması değerlerine çok yakındır. Buradan anlaşıldığı üzere 5-TMK ve 7-TMK plakaların kopma uzaması değerleri üzerinde AA1100-O katkısı daha etkindir.



Şekil 42. Test edilen malzemelerin akma gerilmesi üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkisi



Şekil 43. Test edilen malzemelerin çekme gerilmesi üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkisi



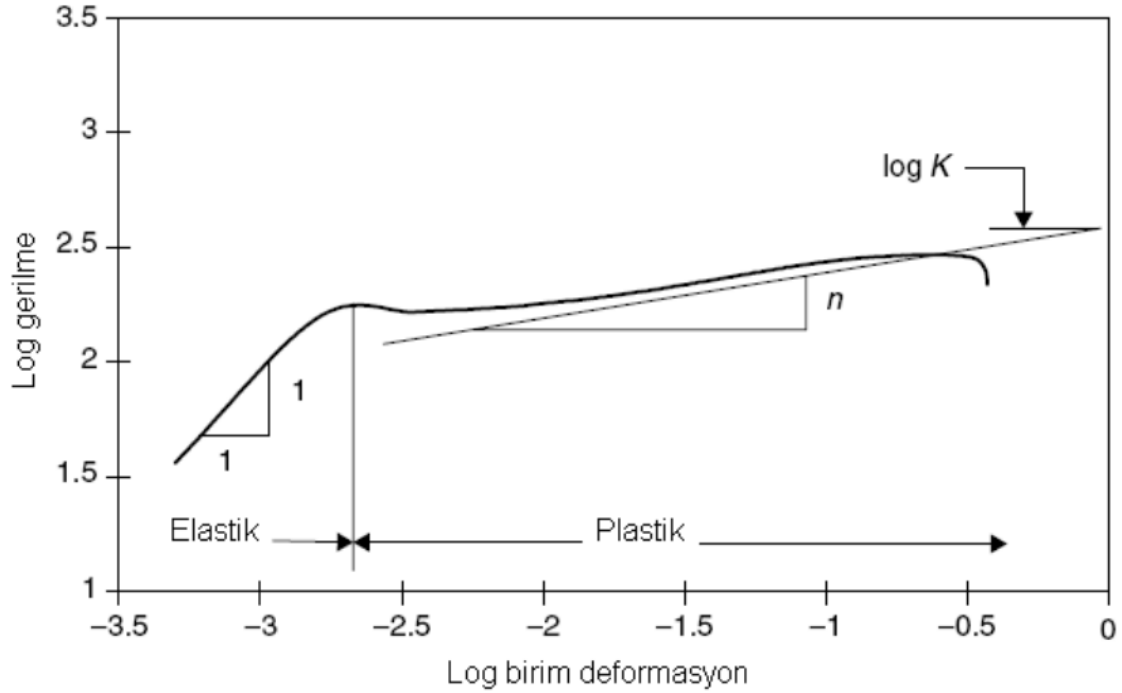
Şekil 44. Test edilen malzemelerin kopma uzaması üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkisi

Şekil 42-b ve Şekil 43-b sırasıyla malzemelerin akma ve çekme gerilmelerinin sıcaklığa bağlı değişimlerini tanımlamaktadır. Her iki grafikte de görüldüğü üzere sıcaklığın artışı ile tüm malzemelerin akma ve çekme gerilmesi değerleri düşüş sergilemektedirler. Ancak Şekil 44-b'ye bakıldığında sıcaklığın malzemelerin kopma uzaması üzerinde bir etkisi olmakla birlikte bu etkinin trendi hakkında net bir tanımlama yapılamamaktadır.

Tablo 10'a bakıldığında SR1, SR2, SR3 ve SR4 deformasyon hızları ile 5-TMK akma gerilmesi değerleri sırasıyla 148 MPa, 161 MPa, 176 MPa ve 205 MPa, çekme gerilmesi değerleri 222 MPa, 226 MPa, 243 MPa ve 251 MPa olarak belirlenmiştir. 7-TMK için akma gerilmesi değerleri SR1, SR2, S3 ve SR4 için sırasıyla 151 MPa, 155 MPa, 166 MPa ve 193 MPa olarak belirlenirken çekme gerilmesi değerleri 215 MPa, 225 MPa, 250 MPa ve 264 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Tablo 11'e bakıldığında T1, T2, T3 ve T4 deformasyon hızları ile 5-TMK akma gerilmesi değerleri sırasıyla 148 MPa, 123 MPa, 111 MPa ve 106 MPa, çekme gerilmesi değerleri ise 222 MPa, 167 MPa, 147 MPa ve 138 MPa olarak belirlenmiştir. 7-TMK için akma gerilmesi değerleri T1, T2, T3 ve T4 için sırasıyla 151 MPa, 123 MPa, 120 MPa ve 108 MPa olarak belirlenirken çekme gerilmesi değerleri 215 MPa, 168 MPa, 157 MPa ve 138 MPa olarak belirlenmiştir. 5-TMK ve 7-TMK için farklı deformasyon hızlarında veya sıcaklıklarda akma ve çekme gerilmesi değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Hatta Şekil 42 ve Şekil 43'teki 5-TMK ve 7-

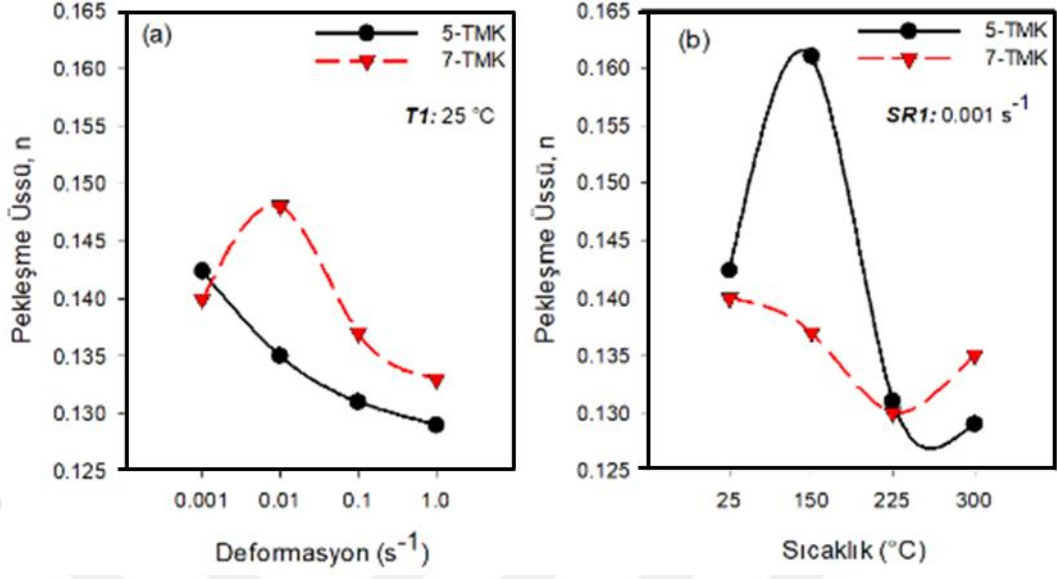
TMK'nın deformasyon hızına ve sıcaklığa akma ve çekme gerilmesi eğrileri incelendiğinde bu eğrilerin birbiri ile neredeyse örtüştüğü rahatlıkla görülebilir. Dolayısıyla tabaka sayısının akma ve çekme gerilmeleri üzerinde bir etkisi olmadığı rahatlıkla anlaşılmaktadır. Ancak, akma ve çekme gerilmesi değerlerindeki bu benzerlik 5-TMK ve 7-TMK plakaların içerisindeki titanyum ve alüminyum oranlarının yakınlığı ile açıklanabilir. 5-TMK içerisindeki titanyum oranı %55, alüminyum oranı ise %45'tir. 7-TMK içerisindeki titanyum oranı ise %53 iken alüminyum oranı %47'dir. Ti/Al oranı 5-TMK ve 7-TMK için sırasıyla 1.2 ve 1.14 olarak hesaplanmıştır. Bu yüzde değerler ve oranlar arasındaki yakınlık yardımıyla akma ve çekme gerilmesi değerlerindeki benzerlik daha kolay anlaşılabilir.

Gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinden malzeme hakkında elde edebileceğimiz bir diğer malzeme özelliği de malzemenin pekleşme (deformasyon sertleşmesi) kabiliyetidir. Pekleşme kabiliyeti aynı zamanda malzemelerin şekillendirilebilirliğinin bir ifadesidir. Pekleşme kabiliyeti yüksek malzemelerin şekillendirilebilirliği de yüksek olmaktadır. Başka bir ifade ile malzemenin uzama oranı daha fazla olacaktır.

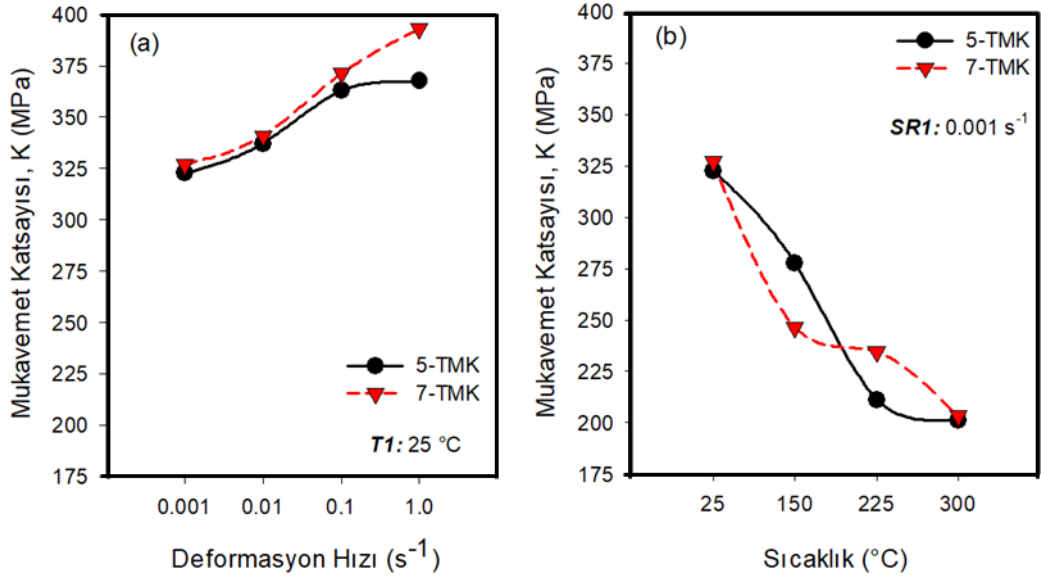


Şekil 45. Logaritmik gerilme-birim şekil değişimi eğrisi (Marciniak vd., 2002)

Şekil 45'te logaritmik gerilme-birim şekil değişimi eğrişi verilmiştir. Pekleşme davranışının belirlenmesinde aşağıdaki denklemden faydalanılmaktadır.



Şekil 46. Pekleşme üssü (n) üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkileri

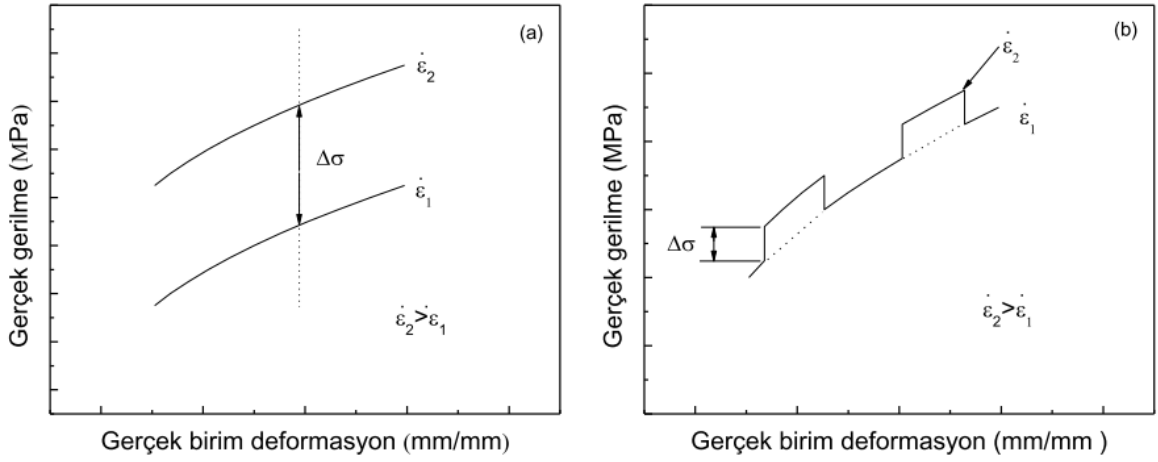


Şekil 47. Mukavemet katsayısı (K) üzerinde a) deformasyon hızı ve b) sıcaklığın etkileri

$$\log \sigma = \log K + n * \log \epsilon^{pl} \quad (13)$$

Burada σ gerilmeyi, n pekleşme üssünü (deformasyon sertleşmesi üssü), K mukavemet katsayısı ve ϵ^{pl} plastik birim şekil değişimini temsil etmektedir. 5-TMK ve 7-TMK numunelerin farklı deformasyon ve sıcaklıklardaki çekme eğrilerinden faydalanılarak

n pekleşme üssü ve K mukavemet katsayısı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 46-a'da pekleşme üssü değerinin deformasyon hızına bağlı değişimi verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi pekleşme üssü artan deformasyon hızı ile azalmaktadır. Sadece 7-TMK SR2 deformasyon hızı değerinde artış göstermiştir. Şekil 47-a'daki grafikte ise K mukavemet katsayısının deformasyon hızına bağlı değişim grafiği verilmiştir. Deformasyon hızındaki artış ile hem 5-TMK hem de 7-TMK'nın K mukavemet katsayısının arttığı görülmektedir. n pekleşme üssü değerinin ve K mukavemet katsayısının değerinin sıcaklığa bağlı değişim grafikleri sırasıyla Şekil 46-b ve Şekil 47-b'de verilmiştir. n değerinin değişiminde belirli bir trend görülmezken K mukavemet katsayısının değeri hem 5-TMK hem de 7-TMK için artan sıcaklık ile düşmektedir.



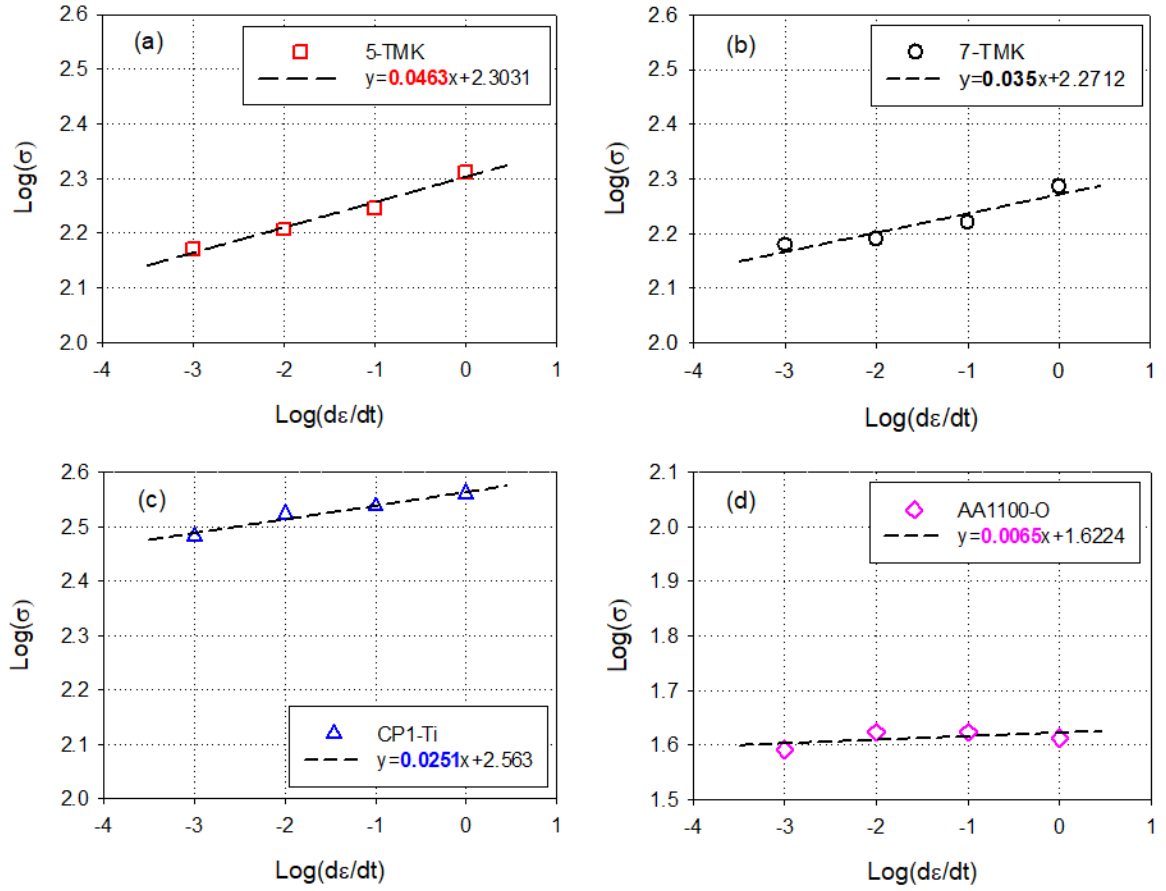
Şekil 48. Deformasyon hızı duyarlılığının belirlenmesinde kullanılan yöntemler (Marciniak vd., 2002)

Farklı deformasyon hızlarında elde edilen gerilme-birim şekil diyagramlarından faydalanılarak malzemelerin deformasyon hızı hassasiyeti belirlenebilmektedir. Deformasyon hızı duyarlılığının belirlenmesinde kullanılan yöntemler Şekil 48'de verilmiştir. Deformasyon hızı hassasiyeti değerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmaktadır.

$$\log \sigma = m * \log (\dot{\epsilon}) + n * \log [f(\sigma)] \quad (14)$$

Burada σ gerilemeyi, m deformasyon hızı duyarlılık üssünü, $\dot{\epsilon}$ deformasyon hızını ve $f(\sigma)$ gerilme fonksiyonunu ifade eder. Şekil 49'da bulunan eğrilerin eğimleri incelendiğinde

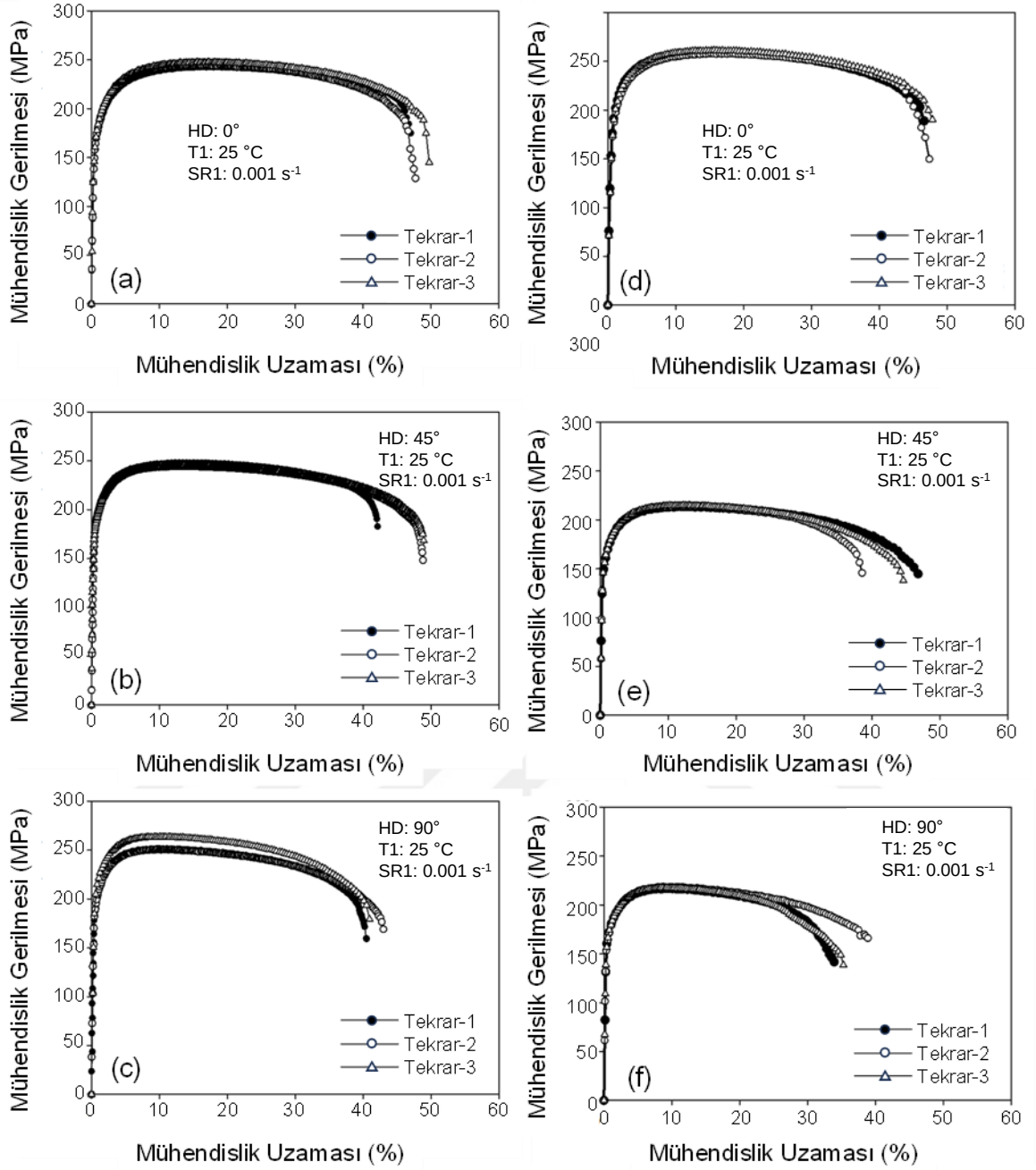
deformasyon hızı duyarlılığı üssü değerleri 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O için sırasıyla 0.0463, 0.035, 0.025 ve 0.0065 olarak elde edilmiştir. Bu değerler karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde deformasyon hızına duyarlılığı en yüksek olan malzeme 5-TMK iken AA1100-O'nun deformasyon hızına duyarlılığının yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Ancak CP1-Ti'nin ise deformasyon hızı duyarlılığı AA1100-O'ya nazaran çok daha fazladır. Buradan da anlaşılabacağı üzere TMK malzemelerin deformasyon hızı duyarlılıklarının kaynağı bünyelerindeki CP1-Ti katkısıdır.



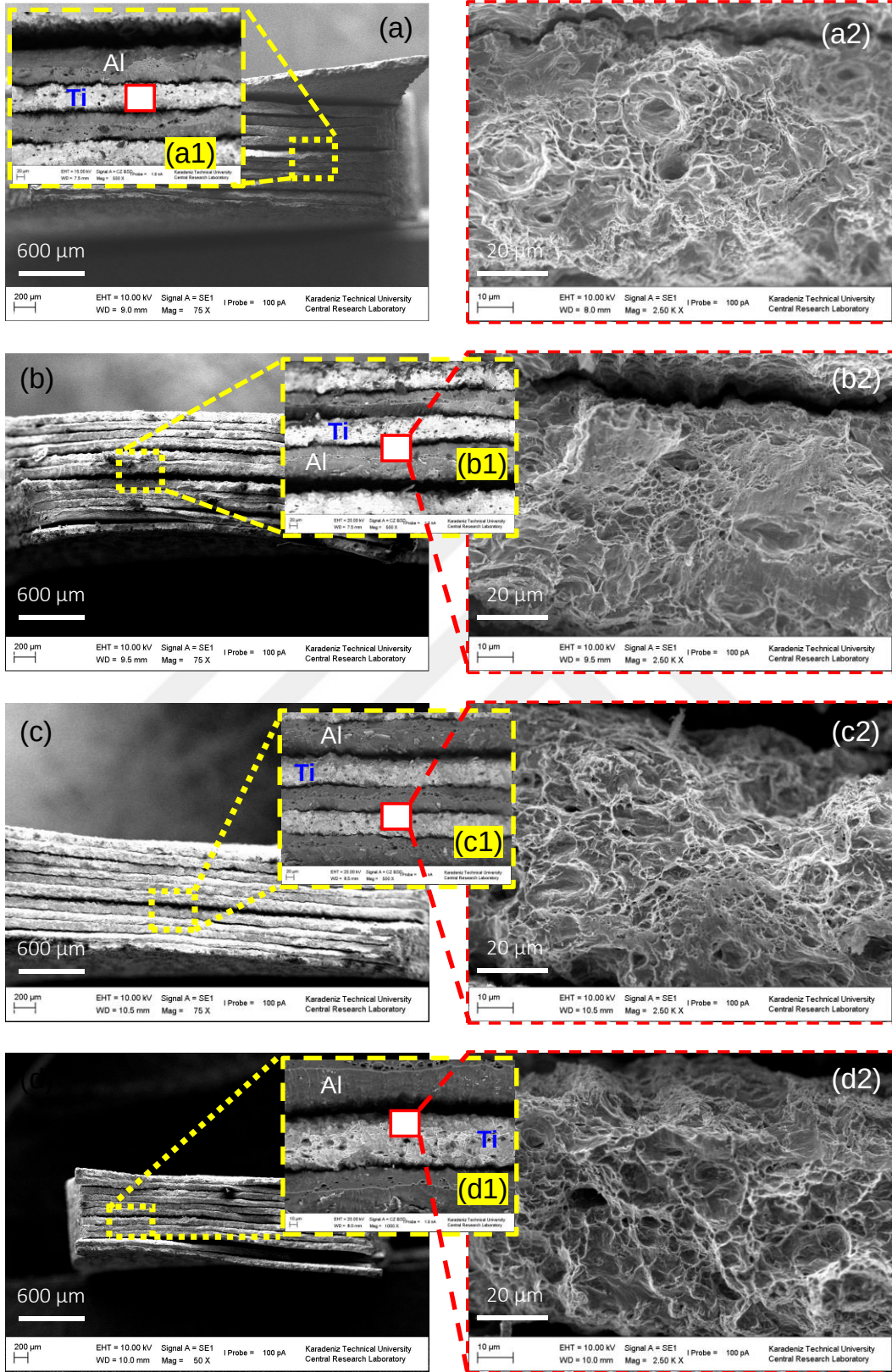
Şekil 49. Deformasyon hızı hassasiyeti üssü (m) belirlenmesi, a) 5-TMK, b) 7-TMK, c) CP1-Ti, d) AA1100-O

Şekil 50-a, b, c'de sırasıyla 5-TMK'ya ait haddeleme yönünde, haddeleme doğrultusu ile 45° ve haddeleme yönüne dik doğrultuda ve Şekil 50-d, e, f'de sırasıyla 7-TMK'ya ait haddeleme yönünde, haddeleme doğrultusu ile 45° ve haddeleme yönüne dik doğrultuda

gerçekleştirilen tekrarlı çekme testleri sonucunda elde edilen mühendislik gerilme-uzama eğrileri verilmiştir. Hadde yönünde ve hadde yönüne 45° doğrultudaki eğriler bakıldığında, yüzde uzama değerleri hem 5-TMK hem de 7-TMK için ortalama %50 civarında olurken bu değer hadde yönüne dik doğrultuda ise 5-TMK için %40 civarına düşerken 7-TMK için %40'ın hemen altında bir değerle sonuçlanmıştır. Öte yandan 5-TMK için çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında hadde yönünde ve hadde yönüne 45° doğrultuda çekme dayanımı değeri ortalama 250 MPa iken hadde yönüne dik doğrultuda ise artış göstererek 260 MPa kadar yükselmiştir. Ancak 7-TMK için çekme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında bu değer hadde yönünde 250 MPa iken, hadde yönüne 45° doğrultuda ve hadde yönüne dik doğrultuda sırasıyla 220 MPa ve 224 MPa değerlerine düştüğü görülmektedir. Tüm bu veriler dikkate alındığında TMK plakalar mukavemet değerleri açısından anizotropik bir davranış sergilemektedir.



Şekil 50. Numunelerin haddeleme doğrultusuna göre mühendislik gerilmesi- % uzaması eğrileri, a) 5-TMK ve HD: 0°, b) 5-TMK ve HD: 45°, c) 5-TMK ve HD: 90°, d) 7-TMK ve HD: 0°, e) 7-TMK ve HD: 45°, f) 7-TMK ve HD: 90°



Şekil 51. Farklı deformasyon hızlarında test edilen çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin TEM görüntüleri, a) SR1: 0.001 s⁻¹, b) SR2: 0.01 s⁻¹, c) SR3: 0.1 s⁻¹, d) SR4: 1 s⁻¹

Şekil 52. Farklı sıcaklıklarda test edilen çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin TEM görüntüleri, a) T1: 25 °C, b) T2: 150 °C, c) T3: 225 °C, d) T4: 300 °C

3.2.3. Eğilme Dayanımı Testi Sonuçları

Eğilme dayanımı testleri hem 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O malzemelere de uygulanmıştır. Bunların yanı sıra TMK plaklara 575 °C ve 600 °C sıcaklıklarda basınç etkisi altında ısıtıl işlem uygulanması ile üretilen MİL malzemelere de ısıtıl işlemin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla eğilme testleri uygulanmıştır.

Şekil 53'te 5-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O ile birlikte 5-TMK'ya 575 °C ve 600 °C sıcaklıklarda farklı 6 ila 36 saat arasında 6'şar saat adım ile ısıtıl işlem uygulanmasıyla elde üretilen 5-MİL-575C ve 5-MİL-600C malzemelerine ait eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Burada en yüksek eğilme dayanımı CP1-Ti ve en düşük eğilme dayanımı AA1100-O'ya aittir.

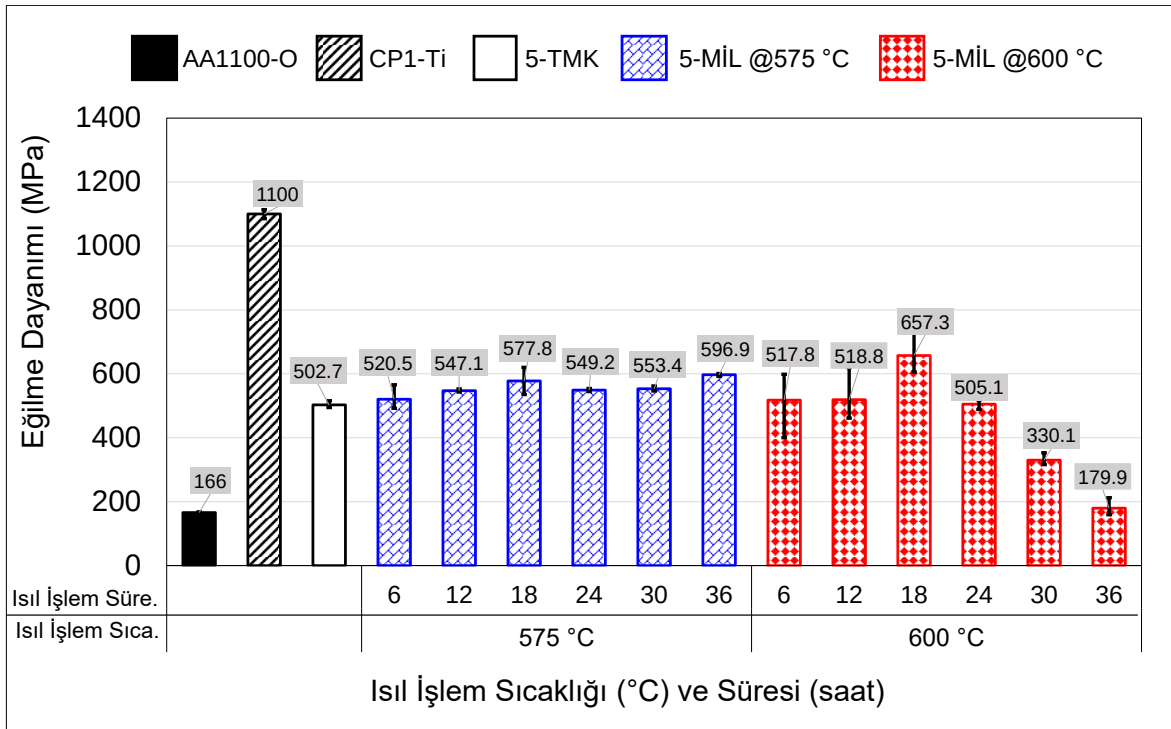
5-TMK'nın ise eğilme dayanımı 502.7 MPa olarak ölçülmüştür. 575 °C sıcaklıkta farklı ısıtıl işlem sürelerinde üretilen MİL-575C malzemelerde ise eğilme dayanımı artan ısıtıl işlem süresi artış göstermiştir. 6 saat ısıtıl işleme tabi tutulan 5-MİL-575C-6h numunesinin eğilme dayanımı 5-TMK'nın eğilme dayanımına göre %3.5 artış ile 520.5 MPa olarak sonuçlanmıştır. 575 °C sıcaklıkta yapılan ısıtıl işlemler sonucunda en yüksek ısıtıl işlem değerine 36 saatlik ısıtıl işleme karşılık gelen 5-MİL-575C-36h numunesi ulaşmıştır. 5-MİL-575C-36 numunesinin eğilme dayanımı ise 5-TMK'ya göre %18.7 artış ile 596.9 MPa olmuştur.

5-TMK'nın 600 °C sıcaklıkta ısıtıl işlemi ile üretilen 5-MİL-600C numunelerin eğilme dayanımları dikkate alındığında eğilme dayanımları 18 saate kadar olan ısıtıl işlemlerde artış sergilerken 24 saatten 36 saate kadar olan ısıtıl işlemler sonucunda ise 5-MİL-600C numunelerinin eğilme dayanımlarında düşüş görülmüştür. Bu durum 5-MİL numunelerde titanyum ve alüminyum tabakalar arasında ısıtıl işlem ile meydana gelen $TiAl_3$ intermetalik fazın yüksek miktarda gevrek davranış sergilemesi ile açıklanabilir. 5-MİL-600C-6h, 5-MİL-600C-12h ve 5-MİL-600C-18h numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %3, %3.2 ve %30.7'lik artışlar ile 517.8 MPa, 518.7 MPa ve 657.3 MPa değerlerinde elde edilmiştir. Öte yandan 5-MİL-600C-36h numunesinin eğilme dayanımı %64'lük bir düşüş ile 179.9 MPa değerine düşerek 5-TMK'nın eğilme dayanımının çok altında kalmıştır. 5-TMK'nın 575 °C sıcaklıkta ısıtıl işlemi ile eğilme dayanımı artan ısıtıl işlem süresi ile arttığı halde 5-TMK'nın ısıtıl işlemleri sonucunda en yüksek eğilme dayanımı 600 °C sıcaklıkta ve 18 saatte üretilen 5-MİL-600C-18h numunesi ile elde edilmiştir.

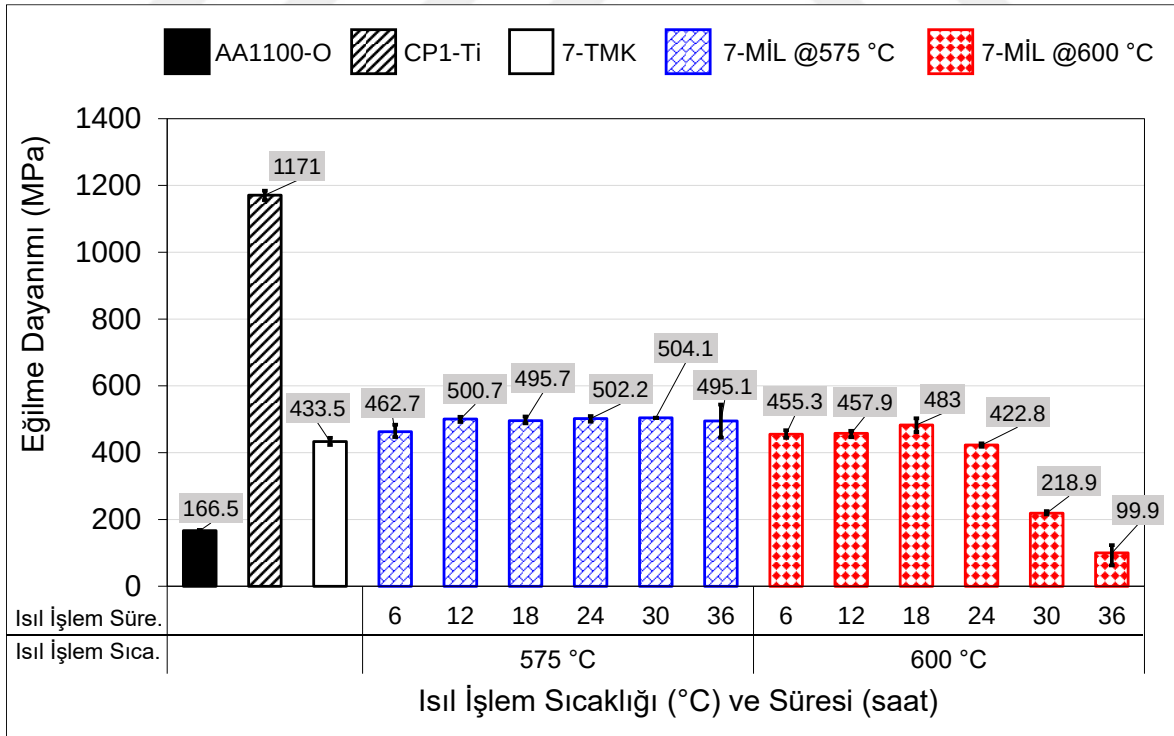
Şekil 54'te 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O ile birlikte 7-TMK'ya 575 °C ve 600 °C sıcaklıklarda farklı 6 ila 36 saat arasında 6'şar saat adım ile ısıtıl işlem uygulanmasıyla elde üretilen 7-MİL-575C ve 7-MİL-600C malzemelerine ait eğilme dayanımı değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Burada en yüksek eğilme dayanımı CP1-Ti ve en düşük eğilme dayanımı AA1100-O'ya aittir.

7-TMK'nın ise eğilme dayanımı 433.5 MPa olarak ölçülmüştür. 575 °C sıcaklıkta farklı ısıtıl işlem sürelerinde üretilen MİL-575C malzemelerde ise eğilme dayanımı artan ısıtıl işlem süresi artış göstermiştir. 6 saat ısıtıl işleme tabi tutulan 7-MİL-575C-6h numunesinin eğilme dayanımı 5-TMK'nın eğilme dayanımına göre %6.7 artış ile 462.7 MPa olarak sonuçlanmıştır. 575 °C sıcaklıkta yapılan ısıtıl işlemler sonucunda en yüksek ısıtıl işlem değerine 36 saatlik ısıtıl işleme karşılık gelen 7-MİL-575C-36h numunesi ulaşmıştır. 7-MİL-575C-36 numunesinin eğilme dayanımı ise 7-TMK'ya göre %17.8 artış ile 510.2 MPa olmuştur.

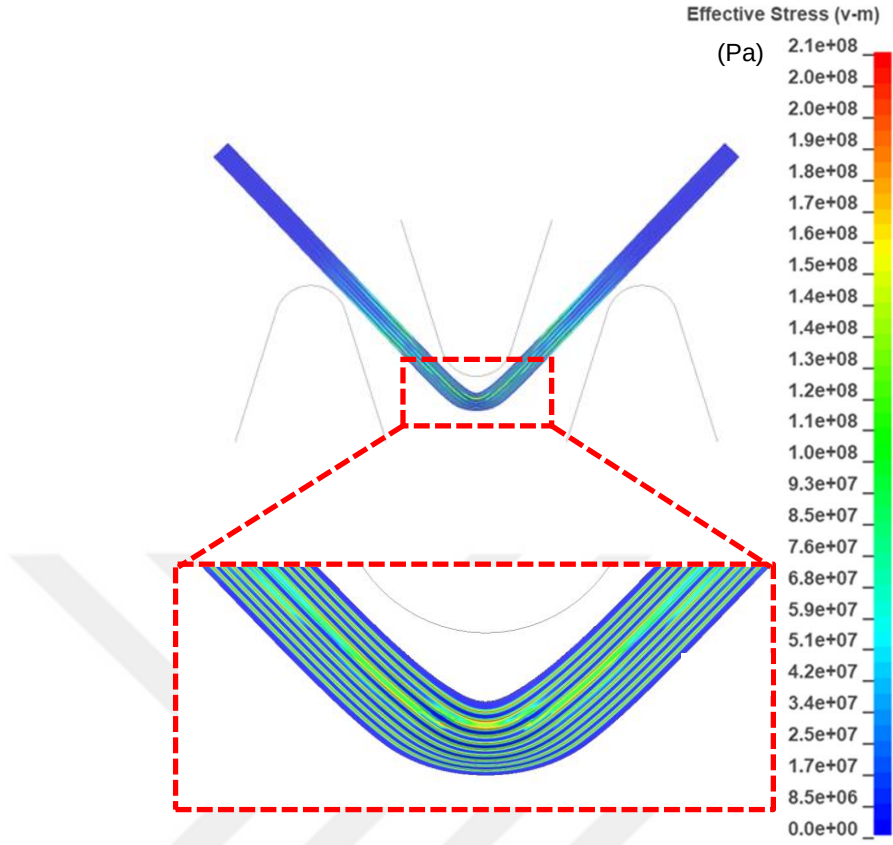
7-TMK'nın 600 °C sıcaklıkta ısıtıl işlemi ile üretilen 7-MİL-600C numunelerin eğilme dayanımları dikkate alındığında eğilme dayanımları 18 saate kadar olan ısıtıl işlemlerde artış sergilerken 24 saatten 36 saate kadar olan ısıtıl işlemler sonucunda ise 7-MİL-600C malzemelerinin eğilme dayanımlarında düşüş görülmüştür. Bu durum 7-MİL numunelerde titanyum ve alüminyum tabakalar arasında ısıtıl işlem ile meydana gelen $TiAl_3$ intermetalik fazın yüksek miktarda gevrek davranış sergilemesi ile açıklanabilir. 7-MİL-600C-6h, 5-MİL-600C-12h ve 5-MİL-600C-18h numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %5, %5.6 ve %11.4'lük artışlar ile 455.3 MPa, 457.9 MPa ve 483 MPa değerlerinde elde edilmiştir. Öte yandan 7-MİL-600C-36h numunenin eğilme dayanımı %77'lik bir düşüş ile 99.9 MPa değerine düşerek 5-TMK'nın yanı sıra AA100-O'nun bile eğilme dayanımının çok altında kalmıştır. 7-TMK'nın 575 °C sıcaklıkta ısıtıl işlemi ile eğilme dayanımı artan ısıtıl işlem süresi ile arttığı halde 7-TMK'nın ısıtıl işlemleri sonucunda en yüksek eğme dayanımı 600 °C sıcaklıkta ve 18 saatte üretilen 7-MİL-575C-36h numunesi ile elde edilmiştir. Tüm bu değerler dikkate alındığında 5-TMK plakaların eğilme dayanımını arttırmak için 600 °C sıcaklıkta 18 saatte ısıtıl işlem gerekirken 7-TMK'ların 575 °C sıcaklıkta 36 saat ısıtıl işlem gerekmektedir. Şekil 55'te 3 nokta eğme testinin sonlu eleman analizi sonucunda deformasyon bölgesine ait gerilme dağılım detayı görülürken Şekil 56'da ise bu modelin deneysel ve sayısal olarak elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması verilmiştir.



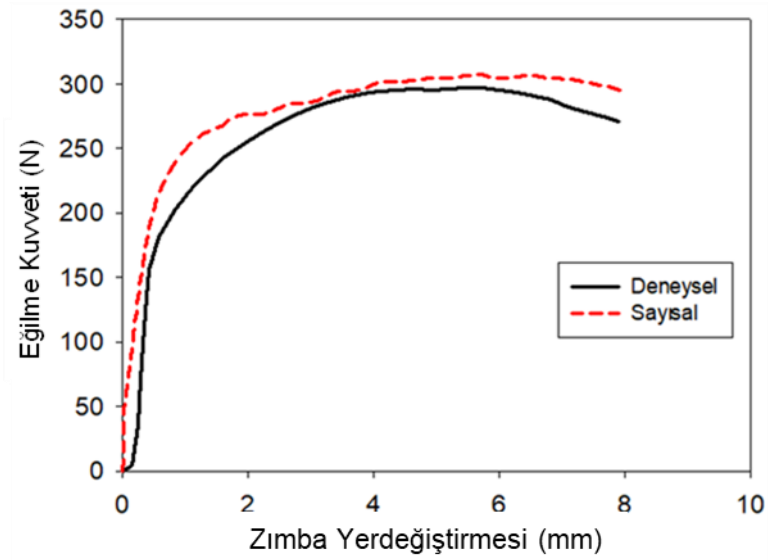
Şekil 53. 5-TMK, AA1100-O, CP1-Ti ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıl işlem ile üretilen 5-MİL numunelere ait eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırması



Şekil 54. 7-TMK, AA1100-O, CP1-Ti ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıl işlem ile üretilen 7-MİL numunelere ait eğilme dayanımı sonuçlarının karşılaştırması



Şekil 55. 5-TMK numunenin 3 nokta eğme testi sonlu elemanlar analizi sonucunda numune kesitinde elde edilen von-Mises gerilme dağılımı ve detay görüntüsü



Şekil 56. 5-TMK numunenin eğilmesinde kaydedilen deneysel ve sayısal kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

3.2.4. Tokluk (Çentik Darbe Direnci) Testi Sonuçları

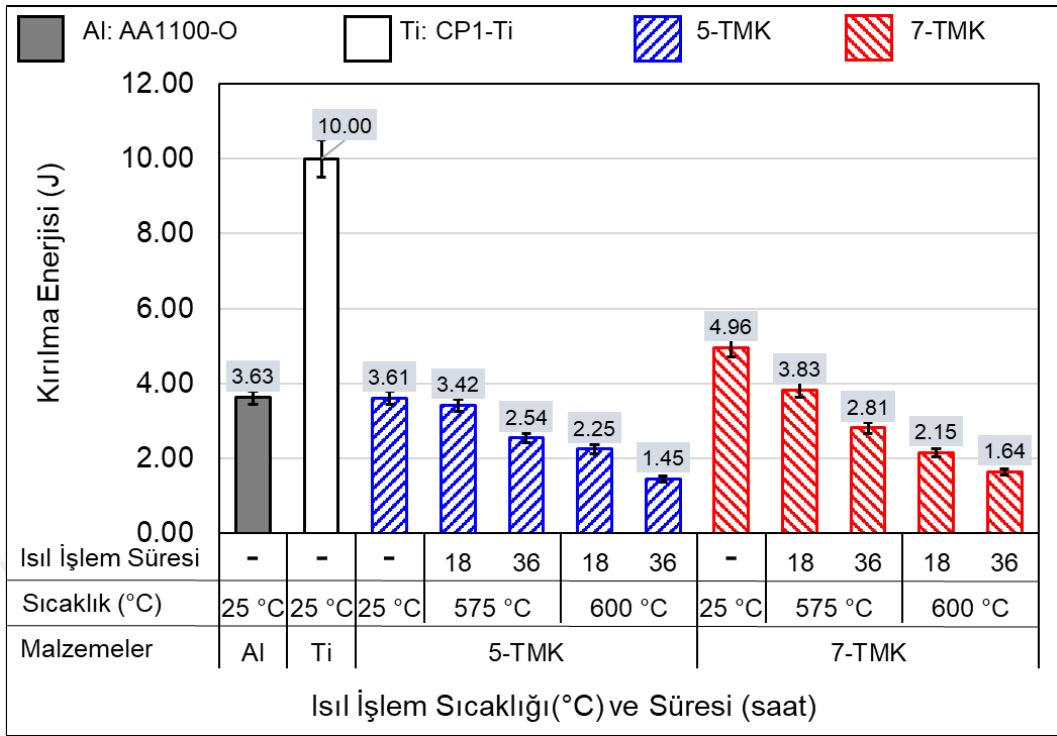
Çentik darbe testleri 5-TMK, 7-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O malzemelere uygulanmıştır. Bunların yanı sıra TMK plaklara 575 °C ve 600 °C sıcaklıklarda basınç etkisi altında ısıtılma işlemi uygulanması ile üretilen MİL malzemelere de toklukları üzerindeki etkisini incelemek amacıyla çentik darbe testleri uygulanmıştır.

Şekil 57’de 5-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O ile birlikte 5-TMK ve 7-TMK’ ya 575 °C ve 600 °C sıcaklıklarda farklı 18 ve 36 saat ısıtılma işlemi uygulanmasıyla elde üretilen 5-MİL-575C, 5-MİL-600C, 7-MİL-575C ve 7-MİL-600C malzemelerine ait tokluk değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Burada en yüksek kırılma enerjisi 10 J ile CP1-Ti’ye aittir. AA1100-O’nun kırılma enerjisi değeri ise 3.63 J’dir. 5-TMK ve 7-TMK’ya ait kırılma enerjileri sırasıyla 3.61 J ve 4.96 J’dir. Aynı titanyum/alüminyum oranına sahip oldukları halde kırılma enerjilerindeki % 37.4’lük bu fark 7-TMK’nın 5-TMK’dan % 39.6 daha kalın olmasından kaynaklanmaktadır. Grafikten de görüleceği üzere, hem 5-TMK hem de 7-TMK’ya ait ısıtılma işlemi ısıtılma sıcaklığı ne olursa olsun kırılma enerjisi değerleri her iki malzemeden elde edilen 5-MİL ve 7-MİL malzemelerin kırılma enerjisi değerleri artan ısıtılma süresi ile düşüş göstermektedir.

5-TMK’nın 575 °C sıcaklıkta 18 ve 36 saat süreyle ısıtılma işleminden elde edilen 5-MİL-575C-18h ve 5-MİL-575C-36h numunelerinin kırılma enerjileri sırasıyla %5.3 ve %29.6 düşüş ile 3.42 J ve 2.54 J olarak ölçülmüştür. 5-TMK’nın 600 °C sıcaklıkta 18 ve 36 saat süreyle ısıtılma işleminden elde edilen 5-MİL-600C-18h ve 5-MİL-600C-36h numunelerinin kırılma enerjileri sırasıyla %37.7 ve %59.8 düşüş ile 2.25 J ve 1.45 J olarak ölçülmüştür.

7-TMK’nın 575 °C sıcaklıkta 18 ve 36 saat süreyle ısıtılma işleminden elde edilen 7-MİL-575C-18h ve 7-MİL-575C-36h numunelerinin kırılma enerjileri sırasıyla %22.8 ve %43.3 düşüş ile 3.83 J ve 2.81 J olarak ölçülmüştür. 7-TMK’nın 600 °C sıcaklıkta 18 ve 36 saat süreyle ısıtılma işleminden elde edilen 7-MİL-600C-18h ve 7-MİL-600C-36h numunelerinin kırılma enerjileri sırasıyla %55.7 ve %66.9 düşüş ile 2.15 J ve 1.64 J olarak ölçülmüştür.

Isıl sıcaklığından ve süresinden bağımsız olarak hem 5-TMK hem de 7-TMK’nın ısıtılma işlemi tabi tutulması sonucunda tokluk direncinde ciddi miktarda düşüş gözlenmiştir. Bunda TMK’ların titanyum ve alüminyum tabakaları arasında ısıtılma işlemi ile oluşan $TiAl_3$ intermetalik fazın varlığı etkindir. Çentik darbe deneyine tabi tutulan tüm numune çeşitlerine birer örnek Şekil 58’de görülmektedir.



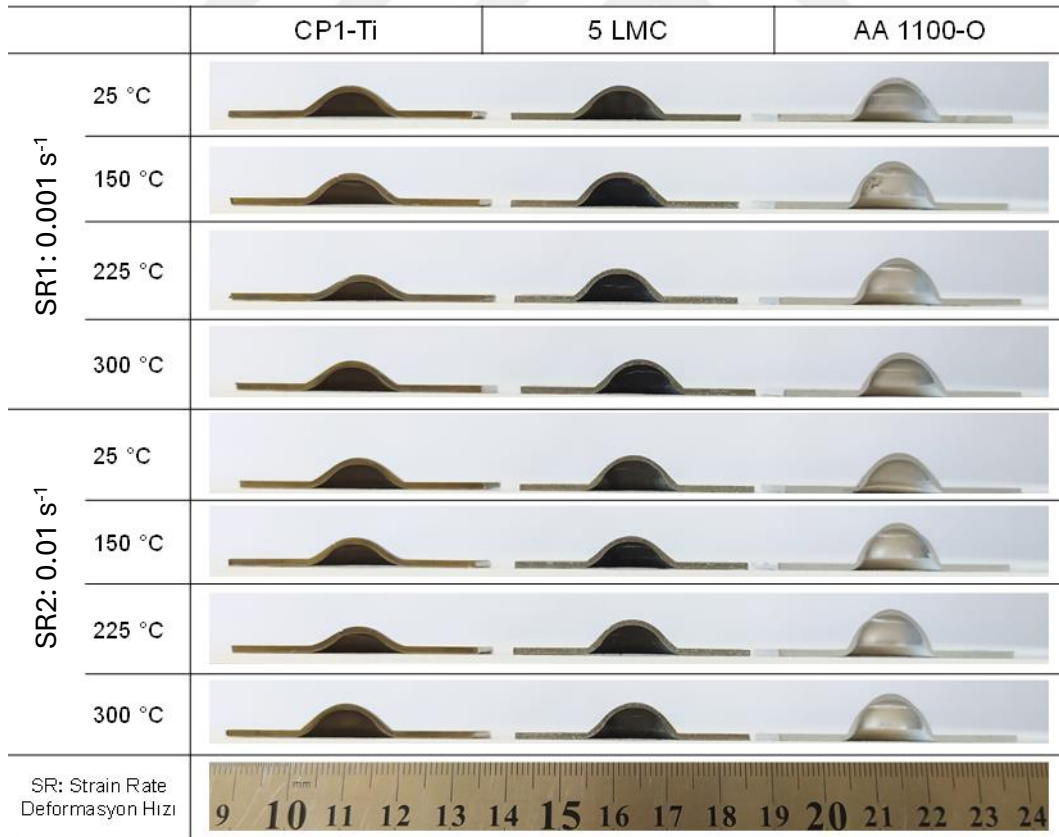
Şekil 57. CP1-Ti, AA1100-O, 5-TMK, 7-TMK ve farklı sıcaklık ve sürelerde üretilen 5-MİL ve 7-MİL numunelere ait kırılma enerjileri karşılaştırması



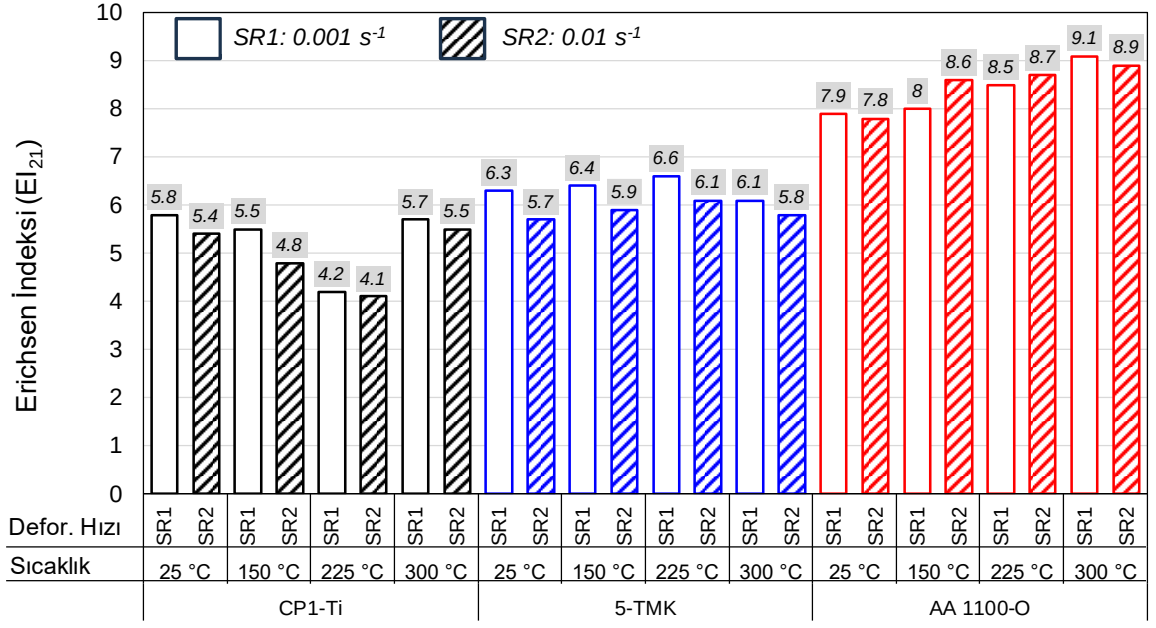
Şekil 58. Çentik darbe deneyine tabi tutulmuş 5-TMK, 7-TMK ve farklı sıcaklık ve sürelerde üretilmiş MİL numunelerin deney sonrası görüntüleri

3.3. Şekillendirilme Kabiliyeti

TMK plakların şekillendirilebilirlik davranışının incelenmek maksadıyla Erichsen şekillendirme deneyinden faydalanılmıştır. Erichsen şekillendirme testleri karşılaştırma olması maksadıyla aynı kalınlıktaki CP1-Ti, AA100-O ve 5-TMK kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler dört farklı sıcaklıkta (25 °C, 150 °C, 225 °C ve 300 °C) ve iki farklı deformasyon hızında (0.001 ve 0.01 s⁻¹) gerçekleştirilmiştir. Farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında testleri gerçekleştirilen numunelerin merkezinden alınan kesitlerin resimleri Şekil 59’da verilmiştir. Şekilden de rahatlıkla görülebildiği üzere şekillendirilen kubbe yüksekliğinden hangi malzemenin hangi koşullarda ne kadar şekillendirilebildiği anlaşılabilmektedir. Tekrarlı testlerden elde edilen kubbe yüksekliklerinin ortalama değerleri hesaplanarak her bir koşul ve malzemeye karşılık gelen Erichsen indeksi (EI) değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan Erichsen indeksi değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 60’da verilmiştir.



Şekil 59. Farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarında Erichsen deneyine tabi tutulan 5-TMK, CP1-Ti ve AA1100-O numunelerin kesit görüntüleri



Şekil 60. CP1-Ti, 5-TMK ve AA1100-O ait farklı sıcaklık ve farklı deformasyon hızlarındaki Erichsen indeksi (EI_{21}) değerlerini karşılaştırılması

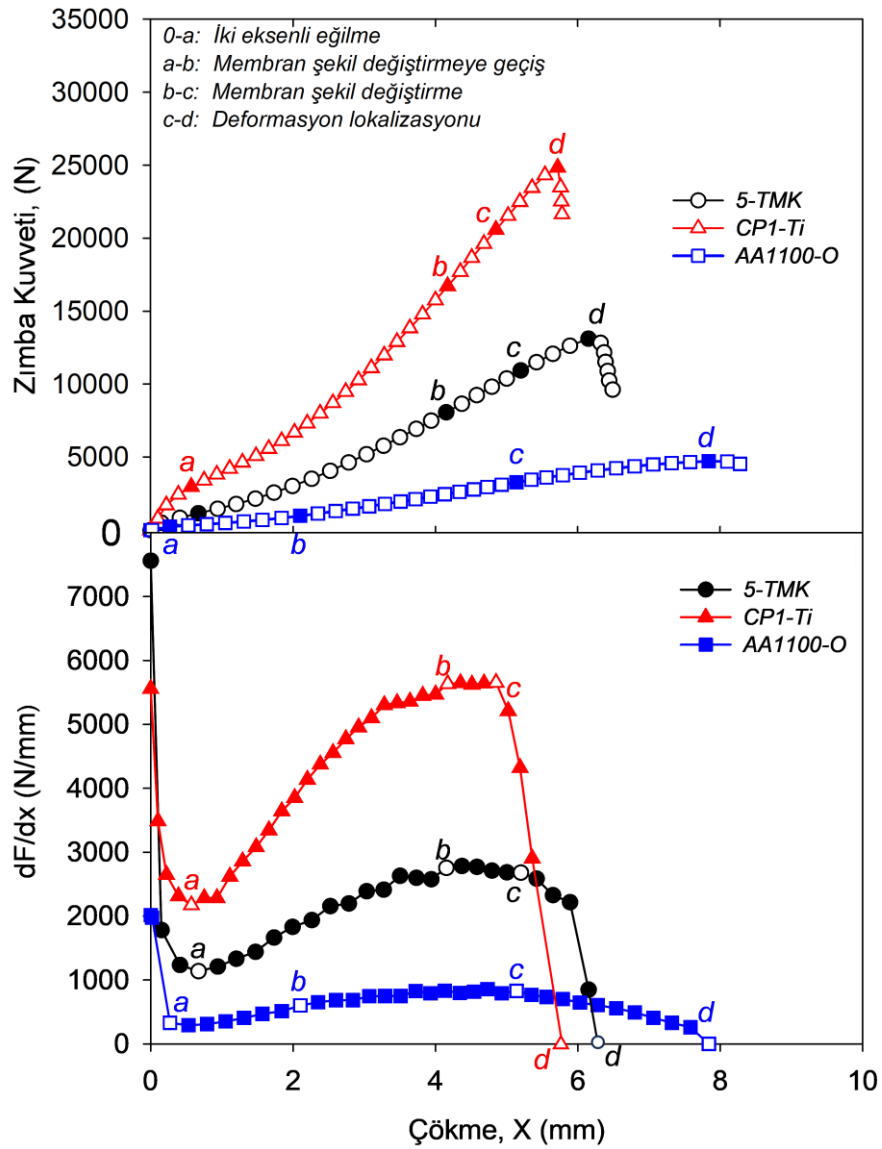
Erichsen indeksindeki artış, şekillendirilebilirlikte artış ile orantılıdır. Şekil 60 incelendiğinde malzemelerin Erichsen şekillendirme indeksi değerlerinin sıcaklık ve deformasyon hızına bağlı değişen değerleri bize CP1-Ti, AA1100-O ve 5-TMK'nın şekillendirilebilirliklerini karşılaştırmak hakkında bize fikir detaylı bir fikir vermektedir.

CP1-Ti'e ait Erichsen indeksi değerleri incelendiğinde Erichsen indeksi değerlerinin 25 °C, 150 °C ve 225 °C sıcaklıkları için sırasıyla 5.6, 5.5, 4.2 olarak ölçülmüştür. Öte yandan 300 °C sıcaklıkta ise bu değer 5.7'ye çıkarak tekrar şekillendirilebilirlik değerinde artış olmuştur. Ancak sıcaklık artışı ile şekillendirilebilirliğin 225 °C sıcaklığa kadar bariz bir şekilde azaldığı görülmektedir. Öte yandan deformasyon hızının artışı ile CP1-Ti'nin şekillendirilebilirliği tüm şekillendirme sıcaklıklarında düşüş göstermektedir. Deformasyon hızına bağlı bu düşüş değeri %2.3 ila %12.7 arasında değişmektedir.

AA1100-O'nun Erichsen indeksi değerleri ise 25 °C, 150 °C, 225 °C ve 300 °C sıcaklıklarda sırasıyla 7.9, 8, 6.5 ve 9.1 olarak ölçülmüştür. AA1100-O'nun sıcaklık ile artan bu Erichsen değerleri AA1100-O'nun şekillendirilebilirliğinin sıcaklık ile artışının bir göstergesidir. AA1100-O'nun sırasıyla 150 °C, 225 °C ve 300 °C için şekillendirilebilirliği oda sıcaklığına göre %1.2, %7.1 ve %15.2 olarak artış göstermiştir. Deformasyon hızındaki

artış yine AA1100-O'nun Erichsen indeksi değeri dolayısıyla şekillendirilebilirliğinde üzerinde artış ya da düşüş şeklinde dengeli bir değişim söz konusu değildir.

Şekil 60'ta verilen 5-TMK'ya ait Erichsen indeksi değerleri 25 °C, 150 °C, 225 °C ve 300 °C sıcaklıkları için sırasıyla 6.3, 6.4, 6.6 ve 6.1 olarak ölçülmüştür. Şekillendirilebilirlik 5-TMK için oda sıcaklığından sırasıyla 150 °C ve 225 °C için %1.6 ve %4.5 artış gösterirken, 300 °C için %3.2 düşüş gözlenmiştir. 5-TMK'nın şekillendirilebilirliği ise %4.9 ile %9.5 ile arasında değişmektedir.



Şekil 61. Oda sıcaklığında ve 0.001 s^{-1} deformasyon hızında gerçekleştirilen Erichsen testinden elde edilen kuvvet-çökme eğrileri

CP1-Ti, AA1100-O ve 5-TMK'nın oda sıcaklığında ve 0.001 s-1 deformasyon hızındaki Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet (F) - çökme (X) eğrileri Şekil 61'de verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde numunelerde deformasyonun farklı adımlarda meydana geldiği görülmektedir. Bu deformasyon adımlarının daha doğru ifade edilebilmesi için F-X eğrilerinin X'e göre türevi alınarak ($dF/dX-X$) eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu dF/dX 'in X'e göre değişimini veren bu eğriler yine Şekil 61'de verilmiştir. Bu eğriler yardımıyla, CP1-Ti, AA1100-O ve 5-TMK'nın kuvvet (F) – çökme (X) eğrilerinin iki eksenli eğilme (0-a), membran şekil değişimine geçiş (a-b), membran şekil değiştirme (b-c) ve deformasyon lokalizasyonu (c-d) olmak üzere dört temel deformasyon adımını kapsadığı belirlenmiştir.

Bu adımlar, 5-TMK numunesine ait eğri dikkate alınarak incelenirse “a” noktasına kadar olan bölgede iki eksenli eğilme davranışı yani elastik şekil değişimi meydana gelmektedir. Bu bölgede, F-X eğrisini veya $dF/dX-X$ eğrisinin eğimi artan çökme miktarı ile azalmaktadır. “a” noktasından “b” noktasına kadar geçen “a-b” aralığında ise F-X veya $dF/dX-X$ eğrilerinin eğimi artan çökme miktarı ile birlikte artmaktadır. Bu, “a-b” aralığı bu sebeple iki eksenli eğilme ile membran şekil değişimi arasında bir membran şekil değiştirmeye geçiş bölgesi olarak tanımlanmaktadır. “b-c” aralığında ise F-X eğrisinin veya $dF/dX-X$ eğrisinin eğimindeki artışı devam etmektedir. Bu aralık membran şekil değişimi olarak tanımlanırken deformasyonda etkin mekanizma plastik şekil değişimidir. Bu membran şekil değişiminin etkisi numunenin kesitinde incelme ve uzama meydana gelmektedir. Membran şekil değişiminin ardından gelen “c-d” aralığında F-X eğrisini veya $dF/dX-X$ eğrisinin eğimi azalmaktadır. Bu bölgede plastik deformasyon ile birlikte deformasyon lokalleşmesi (çekme eğrisindeki boyun verme benzeri şekilde) meydana gelmektedir. Deformasyonun adımıyla yani “d” noktasından sonra çatlak oluşumu ve yırtılma ile hasar oluşumu meydana gelmektedir.

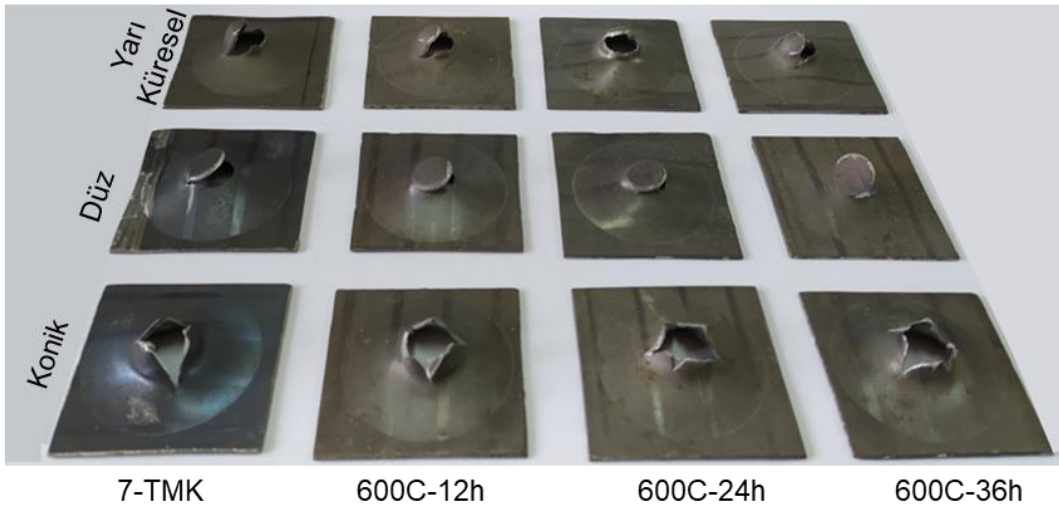
Bunların ışığında CP1-Ti, AA1100-O ve 5-TMK'ya ait F-X eğrisini veya $dF/dX-X$ eğrileri karşılaştırmalı olarak incelenirse aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir. Elastik şekil değişiminin meydana geldiği iki eksenli eğilme bölgesi en dar olan malzeme AA1100-O'nun olduğu görülmektedir. Ardından meydana gelen membran şekil değişime geçiş bölgesi ise en dar olan 5-TMK'dır. Esas şekil değişiminin meydana geldiği membran şekil değişimi bölgesi en geniş olan bölgeye sahip malzemeye AA1100-O'dur. Bu da AA1100-O'nun en yüksek şekillendirilebilirliğinin en yüksek olmasının bir ifadesidir. Bu bölgede hasar meydana gelmeden en uzun şekil değişimi gerçekleşmiştir. Şekillendirme en kısa sürede

sona erdiği malzeme ise CP1-Ti'dır. Şekil 61'den de görülebileceği gibi 5-TMK'nın şekillendirilebilirliği, kompozit malzemeleri ortak özelliği gereği CP1-Ti ve AA1100-O'nun ortalaması şeklindedir. Gerek 5-TMK'nın şekillendirilmesi gerekli kuvvetin CP1-Ti ve AA1100-O'nun şekillendirilmesi gereken kuvvetlerin aralığında olması, gerekse 5-TMK'nın Erichsen indeksi değerinin, CP1-Ti ve AA1100-O'nun Erichsen indeksi değerlerinin arasında bir değer olması da bunun bir ispatıdır.

3.4. Deformasyon Davranışı

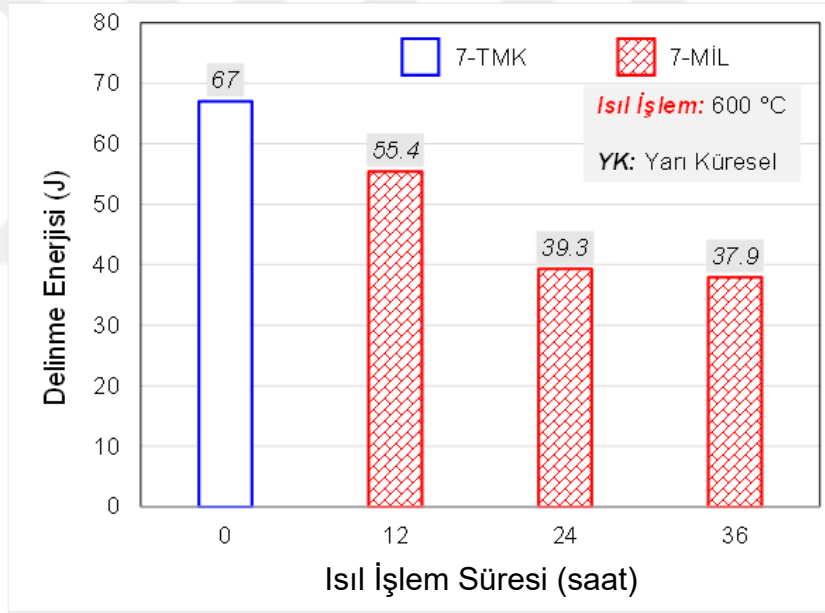
3.4.1. Statik-Eşdeğer Delinme Direnci Sonuçları

Statik-eşdeğer delinme direnci testlerinde incelenmeye esas alınan malzeme 7-TMK ve 7-TMK'nın 600 °C sıcaklıkta ve 12, 24 ve 36 saat sürelerde ısıtılma işlemi ile üretilen 7-MİL numunelerdir. Bu numuneler delinme direnci statik-eşdeğer yükleme koşulları altında yarı küresel (YK), konik (K) ve düz (D) uçlu olmak üzere üç farklı tip delici uç (zımba) kullanılmıştır. Bu uçlarla gerçekleştirilen testler sonucunda deforme edilen numunelere örnekler Şekil 62'de görülmektedir.



Şekil 62. Farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma işlemine tabi tutulmuş 7-TMK numunelerinin farklı delici uç tipleri ile statik-eşdeğer yük altında delinme sonrası görüntüleri

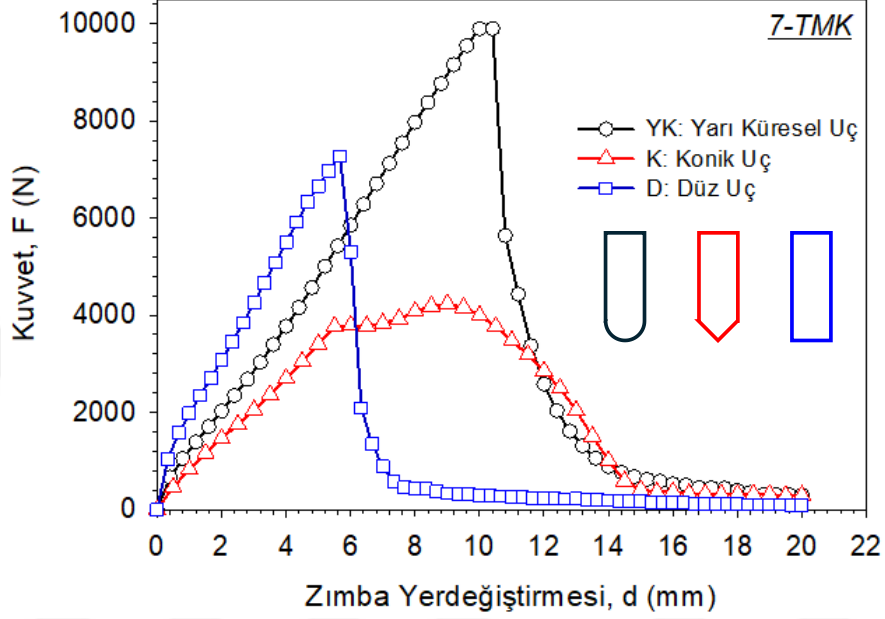
Şekil 63'te verilen sütun grafikte 7-TMK ve 600 °C sıcaklıkta farklı ısıtım süreleri ile üretilmiş 7-MİL numunelerin yarı küresel zımba (delici uç) ile deforme edilmesi sonucunda elde edilen delinme enerjilerinin ısıtım süresi ile değişimi verilmiştir. Yarı küresel zımba ile delinme sonucunda 7-TMK numune 67 J enerji sönümlenmiştir. Öte yandan 12, 24 ve 36 saat ısıtım işlemi ile üretilmiş olan 7-MİL-12h, 7-MİL-24h ve 7-MİL-36h numunelerinin aynı zımba tipine karşı gösterdikleri delinme enerjileri sırasıyla %17.3, %41.3 ve %43.4 düşüş ile 55.4 J, 39.3 J ve 37.9J olarak elde edilmiştir. Sabit sıcaklıkta artan ısıtım süresi ile elde edilen 7-MİL'in tabakaları arasındaki intermetalik tabakanın kalınlığı artmaktadır. Dolayısıyla tabakalar arasındaki gevrek intermetalik tabakanın artış ile 7-MİL'in enerji sönümleme miktarı 7-TMK'nın neredeyse yarısına kadar azalmıştır.



Şekil 63. Isıtım süresinin 7-TMK ve 600 °C sıcaklıkta üretilen 7-MİL numunelerin yarı küresel (YK) tip delici uç ile delinme enerjileri karşılaştırması

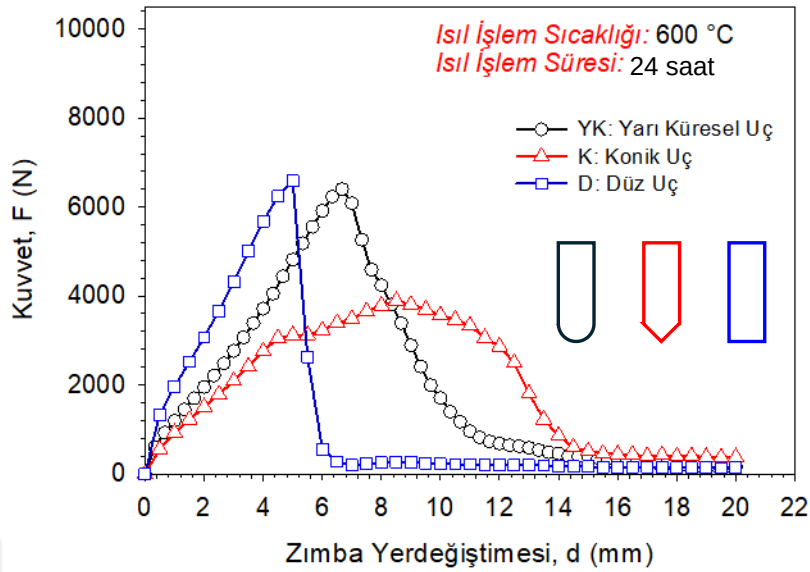
Şekil 64'te 7-TMK numunelerin farklı tipte delici zımbalar (yarı küresel, konik ve düz) ile deformasyona uğratılması sonucunda elde edilen kuvvet-zımba yer değiştirmesi eğrilerinin karşılaştırması mevcuttur. Grafik incelendiğinde en yüksek maksimum kuvvete siyah renk ile temsil edilen yarı küresel delici zımba ulaşıldığı görülmektedir. Yarı küresel uçlu zımba ile ulaşılan bu değer yaklaşık 10 kN civarındadır. Öte yandan, en düşük

maksimum kuvvete ise kırmızı renk ile temsil edilen konik uçlu zımba ile ulaşılmıştır. Konik uçlu zımba ile ulaşılan bu değer yaklaşık 4 kN civarındadır. Bu iki eğrinin arasında yer alan ve mavi renk ile temsil edilen düz uçlu zımba ile ulaşılan maksimum ise yaklaşık 7 kN'dir.



Şekil 64. 7-TMK numunelerin farklı delici uç tipleri delinme direnci testleri sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 65'te 600 °C sıcaklıkta 24 saate üretilen 7-MİL numunelerin farklı tipte delici zımbalar (yarı küresel, konik ve düz) ile deformasyona uğratılması sonucunda elde edilen kuvvet-zımba yer değiştirmesi eğrilerinin karşılaştırması mevcuttur. Grafik incelendiğinde en yüksek maksimum kuvvete mavi renk ile temsil edilen düz uçlu delici zımba ulaşıldığı görülse de siyah renkli eğri ile temsil edilen yarı küresel uçlu delici zımbanın da maksimum kuvvet değeri neredeyse aynıdır. Hem düz hem de yarı küresel uçlu delici zımbalar ile ulaşılan bu değer yaklaşık 6.5 kN civarındadır. Öte yandan, en düşük maksimum kuvvete ise kırmızı renk ile temsil edilen konik uçlu zımba ile ulaşılmıştır. Konik uçlu zımba ile ulaşılan bu değer yaklaşık 3.8 kN civarındadır.

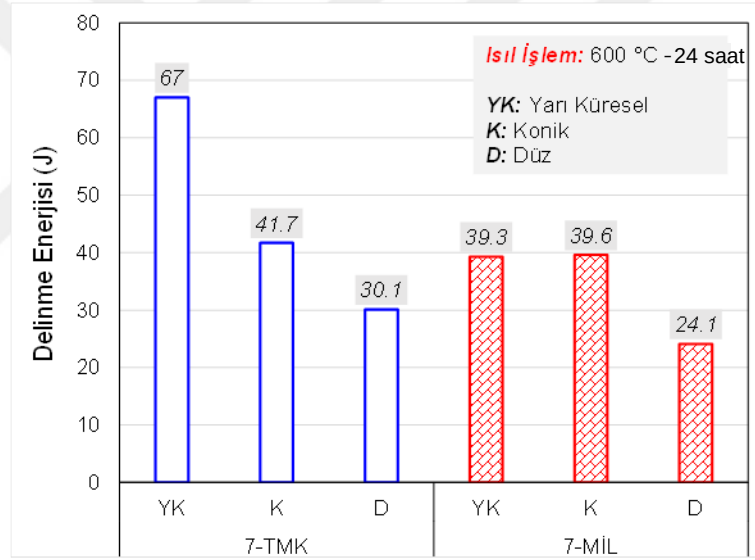


Şekil 65. Isıl işlem (600 °C ve 24 saat) ile üretilmiş 7-MİL numunelerin delinme testleri sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerinde delici uç tipinin etkisinin karşılaştırılması

Şekil 66’te ise 7-TMK ile 600 °C sıcaklıkta ve 24 saat ısıtım sonucunda üretilen 7-MİL-24h numunelerin farklı tipte delici uçlu zımbalar ile deformasyona uğratılmaları sonucunda elde edilen enerji sönümlene miktarlarını verilmektedir. Aslında bu şekildeki grafik Şekil 64 ve Şekil 65’te verilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin altında kalan alanların hesaplanması sonucunda elde edilen delinme direnci enerjilerin karşılaştırmalı bir özetidir. Mavi renkteki sütunlar 7-TMK’nın farklı tipteki delici uca sahip zımbalar ile deformasyona uğraması ile elde edilen sönümlene enerjilerini temsil etmektedir. Burada yarı küresel delici uçlu zımba ile deformasyon sonucunda 67 J enerji sönümlenirken, konik uçlu delici zımba ile ulaşılan sönümlene enerjisi 41.7 J olarak belirlenmiştir. 7-TMK’nın delinmesinde en düşük enerji sönümlene değeri 30.1 J ile düz uçlu delici zımba ile elde edilmiştir. Bu değerler dikkate alındığında delinmeye karşı en yüksek enerji sönümlene direnci yarı küresel delici uçlu zımbaya karşı gösterilirken en düşük enerji sönümlene direnci düz delici uçlu zımbaya karşı elde edilmiştir. Yarı küresel delici uçlu zımbaya karşı gösterilen enerji sönümlene direnci düz uçlu delici zımbaya karşı gösterilen enerji sönümlene direncinden yaklaşık %122 daha fazladır.

Kırmızı renkteki sütunlar 7-MİL’in farklı tipteki delici uca sahip zımbalar ile deformasyona uğraması ile elde edilen sönümlene enerjilerini temsil etmektedir. Burada

yarı küresel delici uçlu zımba ile deformasyon sonucunda 39.3 J enerji sönümlenirken, konik uçlu delici zımba ile ulaşılan sönümlene enerji 39.6 J olarak belirlenmiştir. 7-MİL'in delinmesinde en düşük enerji sönümlene değeri 24.1 J ile düz uçlu delici zımba ile elde edilmiştir. Elde edilen enerji sönümlene miktarları incelendiğinde yarı küresel delici uçlu zımba ile konik uçlu delici zımbaya karşı gösterilen enerji sönümlene miktarları neredeyse aynıdır. Dolayısıyla, bu değerler dikkate alındığında delinmeye karşı en yüksek enerji sönümlene direnci yarı küresel delici uçlu zımba ve konik uçlu delici zımbaya karşı gösterilirken en düşük enerji sönümlene direnci düz delici uçlu zımbaya karşı elde edilmiştir. Yarı küresel ve konik uçlu delici zımbalara karşı sergilenen enerji sönümlene miktarları düz konik uçlu delici zımbaya nazaran yaklaşık %62 daha fazladır.

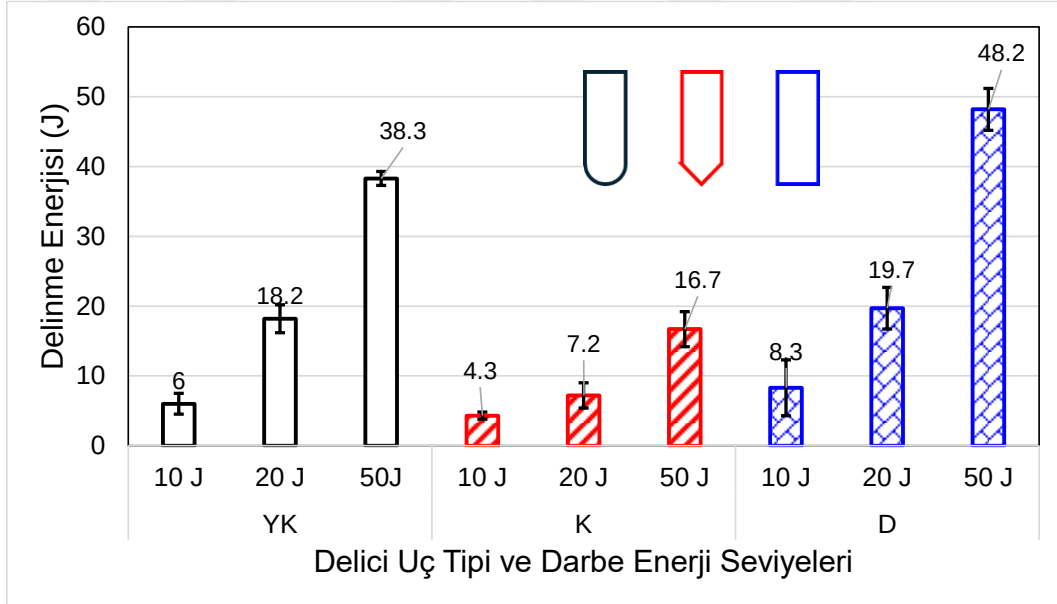


Şekil 66. 7-TMK ve 7-MİL numunelerin farklı delici uç tipleri ile delinme enerjileri karşılaştırması

3.4.2. Düşük Hızlı Darbe Testi Sonuçları

Düşük hızlı darbe deneyleri sadece 7-TMK numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Testler esnasında yarı küresel (YK), konik (K) ve düz (D) olmak üzere üç farklı delici uç tipine sahip zımbalar kullanılmıştır. Her bir zımba tipi ile 10 J, 20 J ve 50 J enerji seviyelerinde ayrı ayrı testler gerçekleştirilmiştir. 6.5 kg ağırlığındaki yük farklı

yüksekliklerden serbest bırakılarak bu enerji seviyeleri elde edilmiştir. 10 J, 20 J ve 50 J enerji seviyeleri için 6.5 kg'lık ağırlık sırasıyla 0.157 m, 0.314 m ve 0.784 m yüksekliğe çıkarılmıştır. Bu yüksekliklerden ağırlık serbest bırakıldığında zımbaların numuneye temas ettiği anda zımba ve ağırlığın hızı sırasıyla 0.157 m, 0.314 m ve 0.784 m yükseklikler için 1.75 m/s, 2.45 m/s ve 3.92 m/s hıza ulaşmıştır. Bu testler sonucunda 7-TMK numunenin farklı delici uç tipleri ve farklı enerji seviyesinde test edilmesi sonucunda elde edilen delinme enerjisi değerleri Şekil 67'de detaylandırılmıştır. Grafikten de görüleceği kullanılan uç tipinden ve enerji seviyesinden bağımsız olarak delinme direnci yüksekte düşüğe, konik delici uç, yarı küresel delici uç ve konik delici uçlu zımbalar ile elde edilmiştir. Ayrıca testin enerji seviyesi arttıkça elde edilen delinme direnci değeri yine artış göstermiştir.

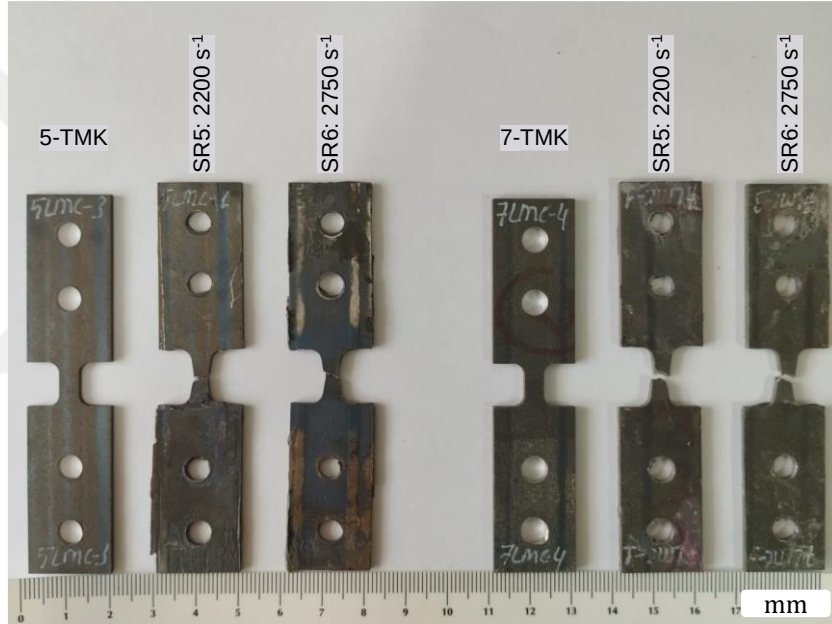


Şekil 67. Farklı tip delici uç ve farklı enerji seviyelerinde test edilen 7-TMK plakanın delinme enerjileri

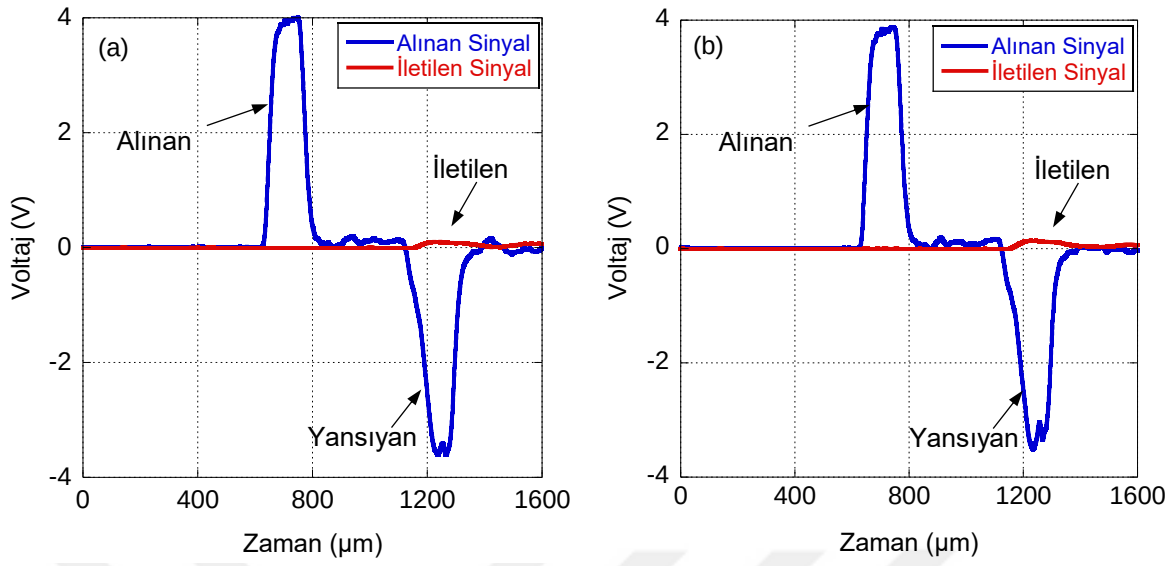
3.4.3. Split-Hopkinson Çekme Çubuğu Test Sonuçları

5-TMK ve 7-TMK numunlerin yüksek hızlı deformasyon karakterizasyonun yapılmasından Split-Hopkinson Çekme Çubuğu (SHÇÇ) testlerinden faydalanılmıştır. Bu testlerde kullanılan numunelerin test öncesi ve sonrasındaki görüntüleri Şekil 68'te görülmektedir. SHÇÇ testleri esnasında kaydedilen 5-TMK ve 7-TMK numunlere ait alınan ve iletilen sinyallere örnek gerilim-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 69-a ve b'de görülmektedir.

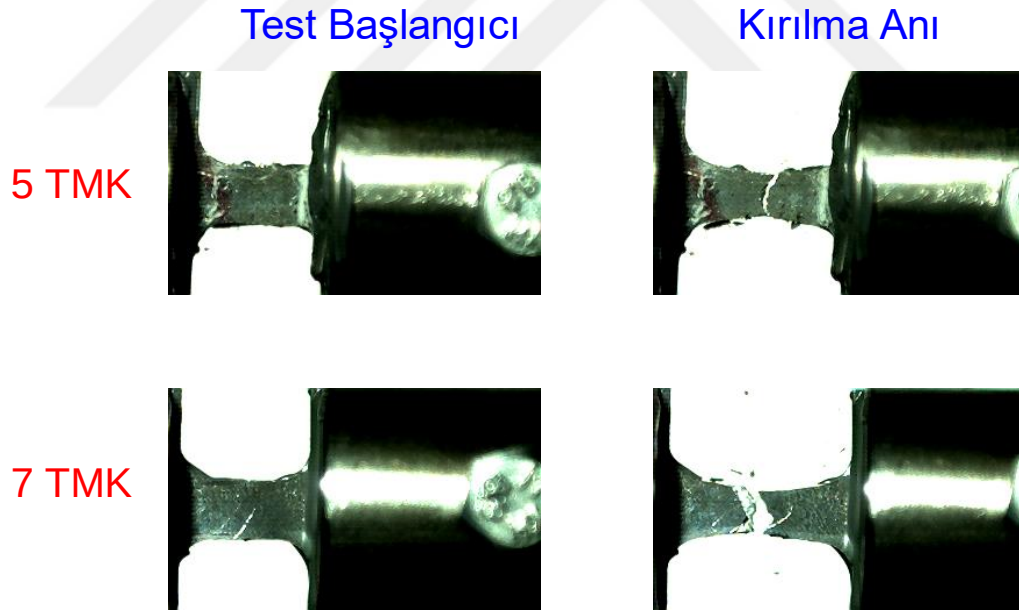
Bu gerilim-zaman eğrilerinden faydalanarak gerçek gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Hem 5-TMK hem de 7-TMK için yüksek hızlı deformasyon karakterizasyon için 7 bar ve 11 bar basınçlarda tekrarlı SHÇÇ testleri gerçekleştirilmiştir. 7 bar ve 11 bar basınç değerleri iki farklı yüksek hızlı deformasyon hızına karşılık gelmektedir. SHÇÇ testleri oda sıcaklığında ve tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Hem 5-TMK hem de 7-TMK için gerçekleştirilen SHÇÇ testleri esnasında kaydedilen yüksek hızlı kamera görüntüleri Şekil 70'da verilmiştir. Şekilde her iki numune için test başlangıcındaki ve numunelerin kırılma anındaki görüntüleri mevcuttur.



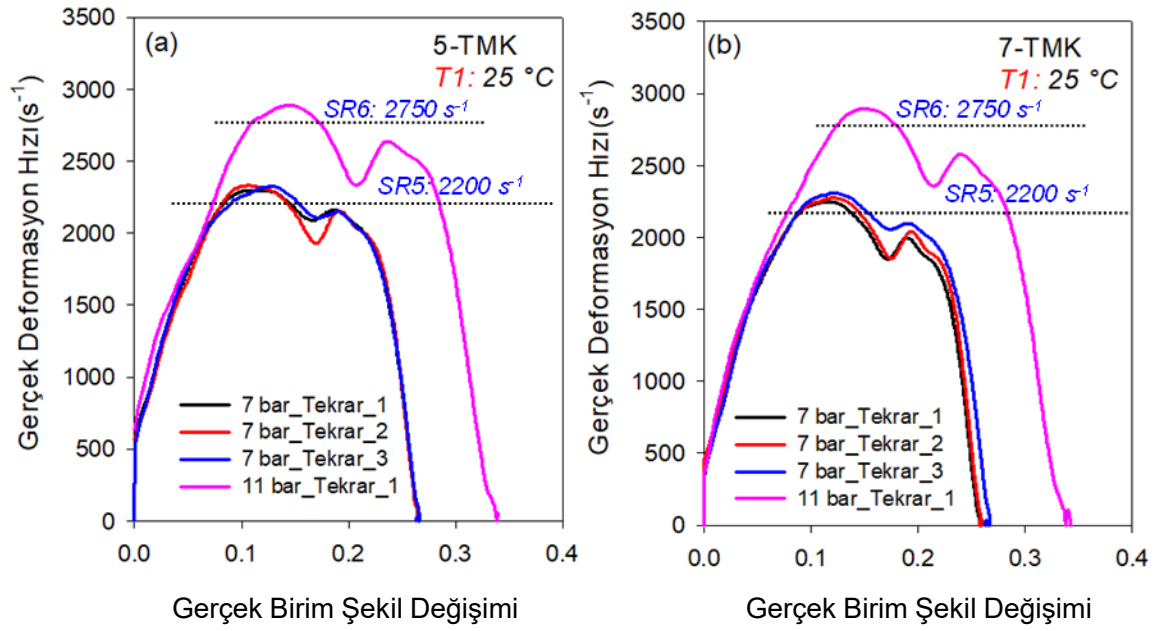
Şekil 68. SHÇÇ test numuneleri: deney öncesi ve yüksek deformasyon hızlarındaki deneyler sonrası



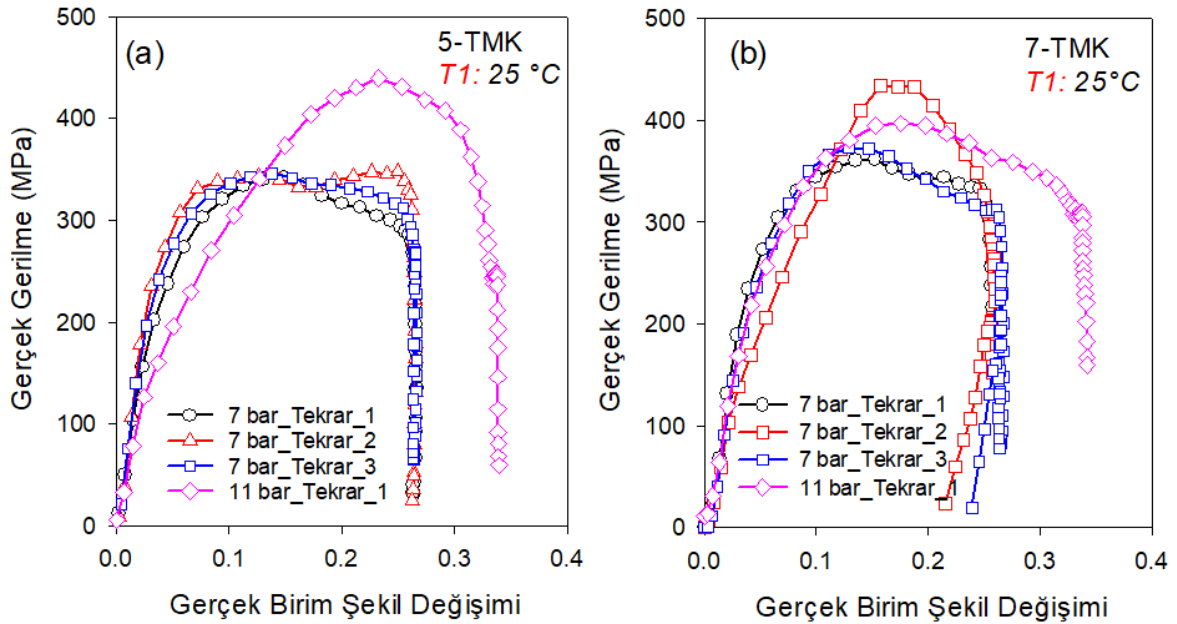
Şekil 69. a) 5-TMK ve b) 7-TMK üzerinde gerçekleştirilen SHÇÇ testlerine ait gerilim geçmişi



Şekil 70. SHÇÇ testleri esnasında kaydedilen hem 5-TMK hem de 7-TMK'ya ait yüksek hızlı kamera görüntüleri



Şekil 71. Farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen SHÇÇ testleri sonucunda elde edilen gerçek deformasyon hızı-gerçek birim şekil değişimi eğrileri, a) 5-TMK, b) 7-TMK

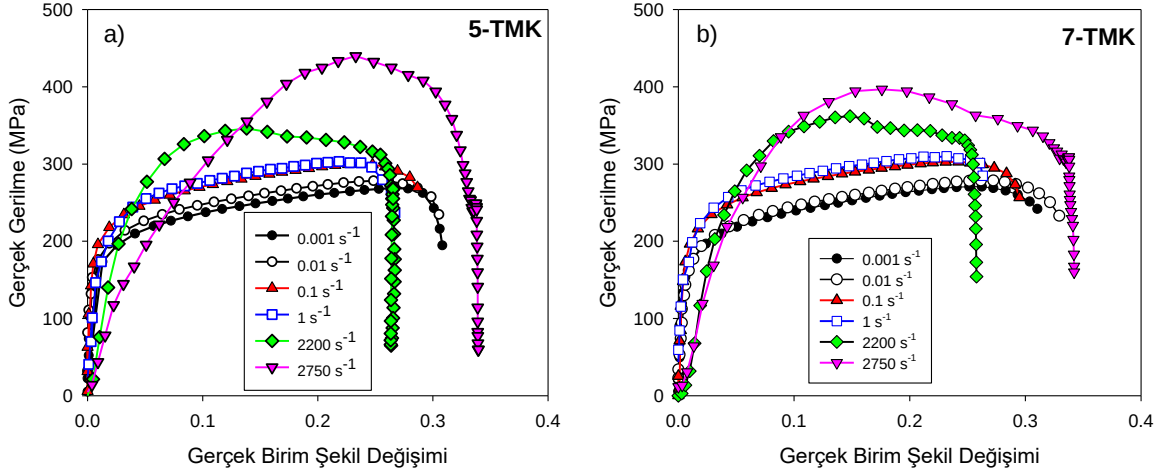


Şekil 72. Farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen SHÇÇ testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değişimleri, a) 5-TMK, b) 7-TMK

SHÇÇ testlerinden elde edilen 5-TMK'ya ait gerçek deformasyon hızı-gerçek birim şekil değişimi eğrileri Şekil 72-a'da görülmektedir. 7-TMK'ya ait gerçek deformasyon hızı-gerçek birim şekil değişimi eğrileri ise Şekil 71-b'de verilmiştir. Her iki numune için SHÇÇ testleri 7 bar ve 11 bar olmak üzere gerçekleştirilirken bu basınç değerlerine karşılık gelen deformasyon hızı değerleri sırasıyla 2200 s^{-1} ve 2750 s^{-1} olarak belirlenmiştir.

7 bar basınç (2200 s^{-1}) ve 11 bar basınç (2750 s^{-1}) ile gerçekleştirilen SHÇÇ testlerinden elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi grafikleri ise 5-TMK ve 7-TMK numuneler için sırasıyla Şekil 71-a ve Şekil 72-b'de görülmektedir. Eğrilerden de anlaşılabacağı üzere deformasyon hızı gerilme değerleri üzerinde etkilidir. Artan deformasyon hızı ile birlikte gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinde yükselme meydana gelmiştir.

SHÇÇ testi ile elde edilen gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrileri ile statik çekme testlerinden elde edilen gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinin 5-TMK ve 7-TMK için karşılaştırıldığı grafikler sırasıyla Şekil 73-a ve Şekil 73-b'de verilmiştir. Bu grafiklerden de açıkça görüldüğü üzere deformasyon hızı malzemelerin gerilme-birim şekil değişimi eğrileri ve dolayısıyla mukavemet özellikleri üzerinde etkindir. 0.001 s^{-1} 'den 2750 s^{-1} 'e kadar artan deformasyon hızlarının her biri ile gerçek gerilme değerlerinde de artış olduğu gözlemlenmektedir. 5-TMK numunelerin farklı deformasyon hızlarındaki testlerden 0.001 , 0.01 , 0.1 , 1 , 2200 ve 2750 s^{-1} 'e kadar artan deformasyon hızı sonucunda çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 269 MPa , 278 MPa (+%3.3), 300 MPa (+%11.5), 303 MPa (+%12.6), 347 MPa (+%30) ve 441 MPa (+%63.9) şeklinde artarak gerçekleştirilmiştir. 7-TMK numunelerin farklı deformasyon hızlarındaki testlerden 0.001 , 0.01 , 0.1 , 1 , 2200 ve 2750 s^{-1} 'e kadar artan deformasyon hızı sonucunda çekme mukavemeti değerleri sırasıyla 271 MPa , 279 MPa (+%2.95), 303 MPa (+%11.8), 310 MPa (+%14.4), 363 MPa (+%33.9) ve 399 MPa (+%47.2) şeklinde artarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 73. Deformasyon hızının gerçek gerilme-birim şekil değişimi üzerindeki etkisi, a) 5-TMK, b) 7-TMK

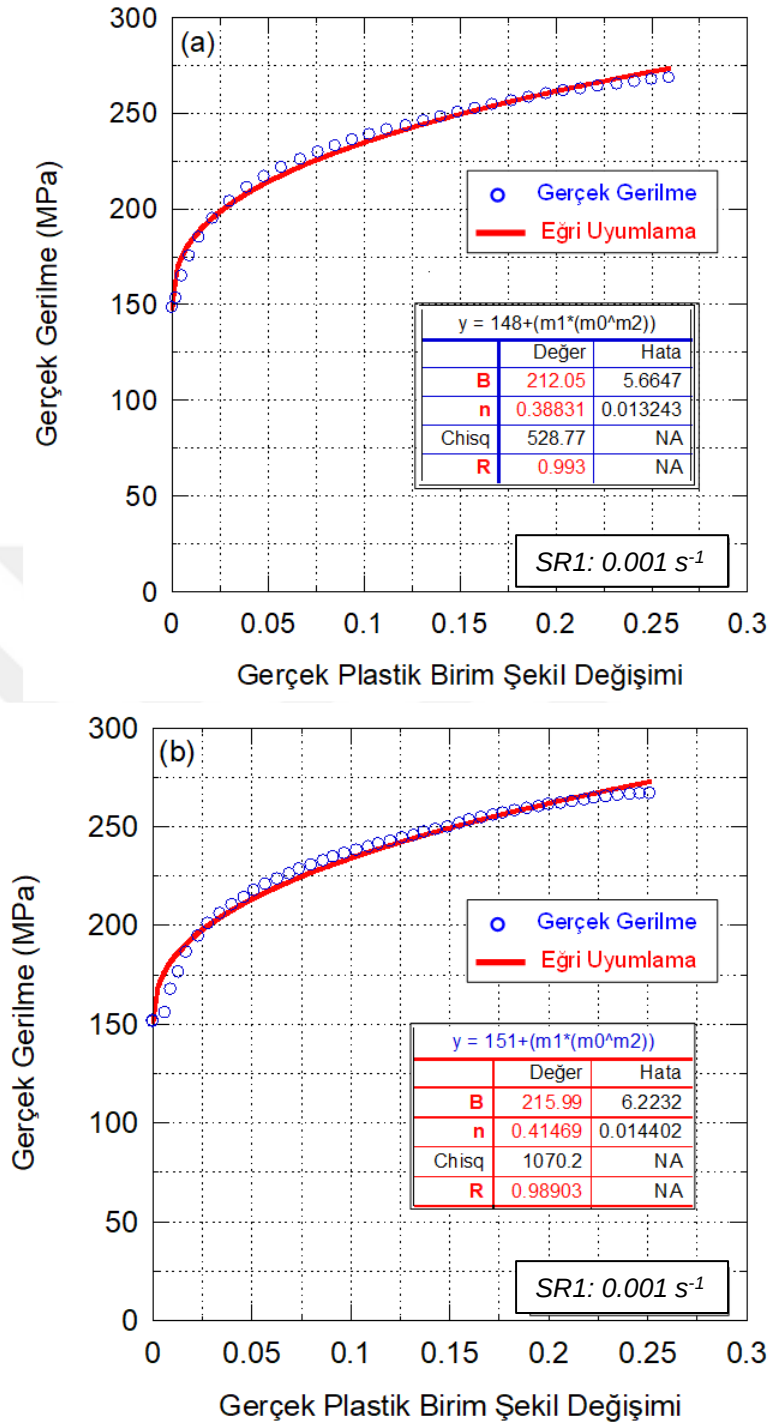
Sayısal modelleme çalışmalarında kullanılmak üzere malzemelerin yüksek hızlı deformasyon davranışını da temsil etmesi sebebiyle Johnson-Cook malzeme modelinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu doğrultuda Split-Hopkinson çekme çubuğu testlerinden elde edilen gerçek gerilme-gerilme birim şekil eğrileri kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modelinin deformasyon sertleşmesi davranışını temsil eden birinci parantezi içinde yer alan A, B ve n katsayılarını belirlerken hem 5-TMK hem de 7-TMK numunelerin referans deformasyon hızında gerçekleştirilmiş çekme testlerinden elde edilen eğriler kullanılmıştır. Bu eğrilerin akma mukavemeti değeri ile birlikte akma sonrası homojen deformasyon bölgesinden yararlanılarak A, B ve n katsayılarına eğri uyumlaması gerçekleştirilmiştir. 5-TMK ve 7-TMK numuneleri için gerçekleştirilen eğri uyumlamaları sırasıyla Şekil 74-a ve Şekil 74-b şekillerinde verilmiştir. Uygulanan eğri uyumlaması sonucunda A, B ve n katsayıları 5-TMK için sırasıyla 148 MPa, 212.05 MPa ve 0.38831 olarak elde edilmiştir. Aynı işlemler yine 7-TMK için uygulandığında elde edilen A, B ve n katsayıları bu sefer sırasıyla 152 MPa, 215.99 MPa ve 0.41469 olarak hesaplanmışlardır.

Johnson-Cook malzeme modelinin ikinci parantezi ise malzemenin şekil değiştirme hızını temsil etmektedir. Bu parantez içinde şekil değiştirme hızını ifade eden katsayı C ile tanımlanmaktadır. C katsayısının belirlenmesinde hem 5-TMK hem de 7-TMK malzemelerin farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen çekme testlerinden ve SPHÇÇ

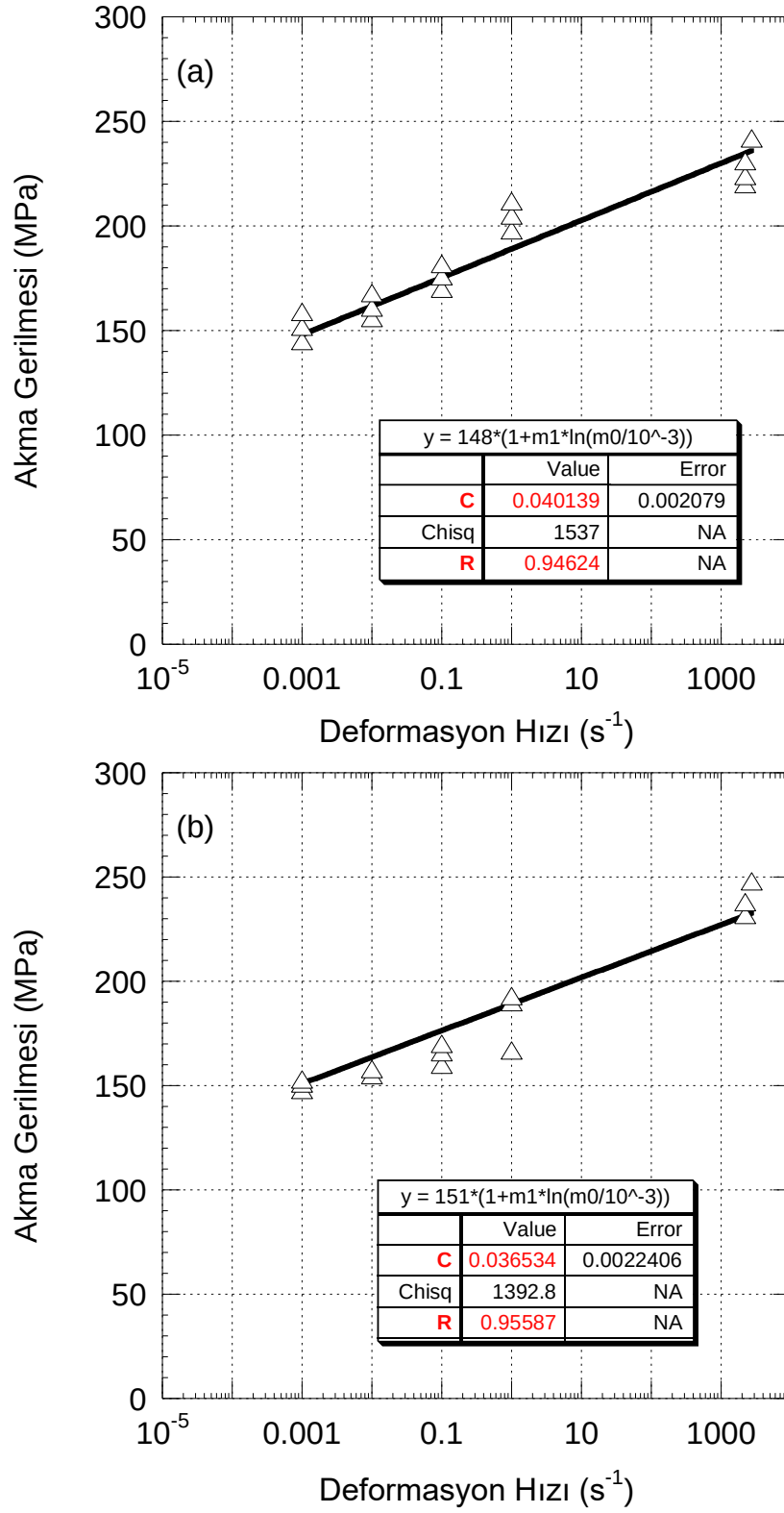
testlerinden elde edilen eğriler kullanılmıştır. Bu eğriler yardımıyla 5-TMK ve 7-TMK'nın farklı deformasyon hızlarındaki akma mukavemeti değerleri çıkarılmıştır. Ardından farklı deformasyon hızlarına karşılık gelen akma mukavemeti değerlerine doğrusal olarak eğri uyumlama yapılmıştır. Bu eğri uyumlama işlemine ait grafikler 5-TMK ve 7-TMK için sırasıyla Şekil 75-a ve Şekil 75-b şekillerinde görülmektedir. Eğri uyumlama işlemi sonucunda 5-TMK ve 7-TMK için elde edilen şekil değiştirme hızını temsil eden C katsayısı sırasıyla 0.0401 ve 0.0365 olarak belirlenmişlerdir. Belirlenen 5-TMK'ya ve 7-TMK'ya ait Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12. SHÇÇ testleri verilerinden elde edilen Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları

Malzeme	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
5-TMK	148	212.05	0.388	0.0401	1
7-TMK	151	215.99	0.415	0.0365	1



Şekil 74. Johnson-Cook malzeme katsayılarından A, B ve n katsayılarının eğri uyumlama ile belirlenmesi, a) 5-TMK ve b) 7-TMK



Şekil 75. Johnson-Cook malzeme modeli katsayılarından C katsayısının eğri uyumlama ile belirlenmesi, a) 5-TMK ve b) 7-TMK

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında uzay-havacılık uygulamalarında kullanımı giderek yaygınlaşan ultrasonik eklemeli imalat (UEİ) yöntemiyle üretilmiş Ti-Al tabakalı metal kompozit plakaların (TMK) ve bu plakaların ısıtıl işlemi sonucunda elde edilen metal intermetalik laminat (MİL) plakaların iç yapı ve mekanik özellikleri, deformasyon ve şekillendirilme davranışları sistematik olarak incelenmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. TMK numunelere basınç etkisi altında (10 MPa) farklı sıcaklık değerlerinde (575 ve 600 °C) ve sürelerde (6, 12, 18, 24, 30 ve 36 saat) ısıtıl işlemler gerçekleştirilmiştir. Isıtıl işlemlerin ardında alınan numuneler optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde TMK plakların titanyum ve alüminyum tabakaları arasında intermetalik faz oluşumu görülmüştür. Gerçekleştirilen elektron dağılımlı spektrum ve X-ışını kırınım ölçer ile gerçekleştirilen analizler neticesinde titanyum ve alüminyum tabakaların arasında meydana gelen bu intermetalik fazın $TiAl_3$ olduğu tespit edilmiştir.
2. Optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu ve elektron dağılımlı spektrum incelemeleri sonucunda 575 °C ve 600 °C sıcaklıklarında 10 MPa basınç etkisi altında 6 ila 36 saat arasında 6'şar saat aralıklarla gerçekleştirilen ısıtıl işlemlerde artan işlem süresi ile titanyum ve alüminyum tabakaları oluşan $TiAl_3$ intermetalik fazın miktarının ısıtıl işlem süresi ile orantılı olarak arttığı görülmüştür. Yine aynı şekilde, artan ısıtıl işlem sıcaklığının da tabakalar arası oluşan intermetalik fazın miktarındaki artışta etkin olduğu tespit edilmiştir.
3. Tabakalı metal kompozit plakalardan alınan numunelerinin kesitlerinden alınan optik görüntülerde sonotrot ile temas eden yüzeylerde düzgünsüzlükler meydana geldiği görülmüştür. Isıtıl işlem sonrasında sonotrot temasının olduğu bu bölgelerde Ti ve Al tabakalar arasında oluşan intermetalik fazın tabakaların birbiri ile temas

alanının artması nedeniyle daha hızlı oluştuğu ve yayıldığı gözlenmiştir. Sonotrot temasının olmadığı arayüzeylerde ise kalınlık olarak daha homojen ve ince bir intermetalik faz oluşumu meydana gelmiştir. Ancak düzgünsüzlüğün olduğu arayüzeylerde kalınlık dağılımı arayüzey boyunca değişmektedir.

4. Folyo halindeki titanyum ve alüminyumdan alınan sertlik ölçümlerinde elde edilen değerler ve TMK'ların titanyum ve alüminyum tabakalarından alınan sertlik değerleri karşılaştırıldığında ultrasonik eklemeli imalat yönteminin tabakaların nihai sertlik değerinde etkin olmadığı görülmüştür. Ultrasonik eklemeli imalat veya ısıtma işlem sonrası yapılan sertlik ölçümlerinde Al ve Ti tabakaların başlangıçtaki sertlik değerlerini korudukları gözlenirken tabakalar arasında oluşan $TiAl_3$ intermetalik fazın sertlik değeri ($600 HV_{0.1}$) Al tabakanın 20 katı olarak ölçülürken Ti'nin sertlik değerinin yaklaşık 5 katı olacak şekilde elde edilmiştir.
5. Hem 5-TMK hem de 7-TMK plakalara uygulanan çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri karşılaştırıldığında kalınlık ve tabaka sayısının gerilme ve şekil değiştirme değerleri üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, her iki numunenin bünyelerindeki titanyum ve alüminyum tabakalarının oranlarının (Ti/Al) yaklaşık olarak aynı olmasıyla açıklanmaktadır.
6. CP1-Ti'nin akma ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikleri deformasyon hızına bağlı olarak değişmektedir. Ancak AA1100-O'nun mekanik özellikleri ise deformasyon hızından etkilenmemiştir. Dolayısıyla tabakalı metal kompozit plakaların mekanik özelliklerinin deformasyon hızına bağlılığında bünyesindeki CP1-Ti varlığı etkili olmaktadır.
7. Farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda, hem 5-TMK hem de 7-TMK plakaların mekanik özelliklerinin deformasyon hızına duyarlı bir davranış sergilediği görülmüştür. Artan deformasyon hızına bağlı olarak her iki malzeme için de akma ve çekme dayanımlarında artış görülmüştür. Ancak, kopma uzaması değerlerinde deformasyon hızına bağlı bariz bir fark olmazken bu değerlerin %40-55 arasında değiştiği görülmüştür.
8. A1100-O'nun şekillendirilebilirliği sıcaklık ile artarken CP1-Ti için aynı durum söz konusu değildir. Bu sebeple AA1100-O, tabakalı metal kompozit plakaların şekillendirilebilirliğine katkı sağlar iken CP1-Ti şekillendirilebilirlikte sınırlayıcı bir davranış sergilemektedir. Bu durum TMK'nın 300 °C sıcaklıkta daha düşük

oranda şekillendirilebilirliği ile de teyit edilmiştir. Ayrıca, CP1-Ti, AA1100-O ve tabakalı metal kompozit plakalar için şekillendirilebilirlik artan deformasyon hızı ile ilişkili olarak şekillendirme sıcaklığından bağımsız olarak düşüş göstermiştir.

9. Tabakalı metal kompozit plakaların ısıtılma işlemi tabi tutulmasıyla elde edilen metal intermetalik laminatların eğilme dayanımları 575 °C ısıtılma işlemi ile üretildiklerinde ısıtılma işlem süresinin 6 saatten 36 saate kadar artırılması artış göstermiştir. Ancak metal intermetalik laminatlar tabakalı metal kompozit plakaların 600 °C sıcaklıkta ısıtılma işlemi tabi tutularak üretildiklerinde ise eğilme dayanımındaki artış 18 saat ile sınırlanmıştır. 24 saatlik ısıtılma işleminden itibaren 600 °C sıcaklıkta üretilen metal intermetalik laminatların eğilme dayanımı dramatik bir şekilde düşüş göstermiş hatta tabakalı metal kompozitlerin eğilme dayanımının çok altında dayanım sergilemiştir.
10. Tabakalı metal kompozit plakaların ısıtılma işlemleri ile üretilen metal intermetalik laminat numunelerin çentik darbe testine tabi tutulması sonucunda tokluk değerlerinin ısıtılma işlem sıcaklığından bağımsız olarak düşüş sergilediği görülmüştür. Ancak daha yüksek sıcaklıkta üretilen metal intermetalik laminatlar için çok daha düşük tokluk değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla metal intermetalik laminatların tokluğu sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Isıtılma işlem süresi arttırıldığında ise metal intermetalik laminatların tokluk değerleri dramatik bir şekilde azalmıştır. Uygulanan tüm ısıtılma işlem sıcaklığı ve süresi kombinasyonları için üretilen metal intermetalik laminatların tokluğu tabakalı metal kompozitlerden daha düşük olmuştur. Bu durum tabakalar arasındaki miktarı, sıcaklık ve ısıtılma işlem süresi ile artan $TiAl_3$ intermetalik fazın yüksek gevrek davranışından kaynaklanmaktadır.
11. Çentik darbe testlerindeki sonuçlara benzer şekilde, statik-eşdeğer delinme direnci testlerinde tabakalı metal kompozit plakaların delinme direnci metal intermetalik laminatların delinme direncine kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Statik-eşdeğer delinme direnci testlerinde de hem sıcaklık artışı hem de göre ısıtılma işlem süresindeki artış ile delinme direncinde daha düşük delinme sönümlenme enerjisi değerleri elde edilmiştir. Metal intermetalik laminatların bünyesindeki gevrek $TiAl_3$ intermetalik fazın etkisi yine ön plana çıkmaktadır. Delinme direnci testlerinde farklı delici uç tipine sahip zımbalara karşı farklı delinme dirençleri elde edilmiştir. Gerek tabakalı metal kompozitler gerekse metal intermetalik laminatlar ile gerçekleştirilen testlerde en yüksek delinme direnci değeri yarı küresel delici uçlu

zımba tipine karşı elde edilirken en düşük delinme direnci değeri düz delici uçlu zımba tipine karşı elde edilmiştir.

12. Farklı delici uç tipleri ile farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda en yüksek delinme direnci yine enerji seviyesinden bağımsız olarak düz tip delici uca karşı elde edilmiştir. En düşük delinme direnci ise konik tip delici uca karşı erişilmiştir. Artan enerji seviyesi ile delinme direnci değerlerinde de artış gerçekleşmiştir.
13. Split-Hopkinson çekme çubuğu testleri ile 2200 s^{-1} ve 2750 s^{-1} gibi yüksek deformasyon hızlarında testler başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu testler sayesinde 5-TMK ve 7-TMK malzemelere ait yüksek deformasyon hızlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler statik seviyelerde gerçekleştirilen çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri ile karşılaştırıldığında 5-TMK ve 7-TMK numunelerin mukavemet değerlerinde deformasyon hızındaki artışa bağlı olarak ciddi miktarlarda artış elde edilmiştir. Split-Hopkinson çekme çubuğu testleri testlerinden elde edilen elde edilen gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinden alınan veriler yardımıyla tabakalı metal kompozit plakalar için Johnson-Cook malzeme modeline ait katsayılar belirlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Gelecekte ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle üretilerek elde edilecek malzeme ve yapılarda çalışılmasında fayda görülen çalışma konuları aşağıda listelenmiştir:

1. Ultrasonik eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Ti-Al tabakalı yapılar özellikle uzay-havacılık alanında kullanılmaktadır. Dolayısıyla, hava taşıtlarında sık rastlanan buzlanma (aircraft icing) sorununa karşı malzemenin nasıl bir davranış sergileyeceği düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilecek testler ile belirlenebilir.
2. Ti-Al tabakalı metal kompozit plakaların şekillendirilebilme davranışını detaylandırmak amacıyla Nakajima testleri gerçekleştirilerek şekillendirilme sınır diyagramları elde edilebilir.
3. Titanyum ve alüminyum tabakalar ait kalınlık ve istiflenme planının mekanik özelliklerine ve yüksek hızlı deformasyon davranışına etkileri incelenip optimum kalınlık ve istiflenme parametreleri belirlenebilir.
4. Isıl işlem ile Ti-Al tabakalı metal kompozitlerden üretilen Ti-TiAl₃-Al metal-intermetalik (metaller arası) laminat plakaların deformasyon hızı ve sıcaklığa bağlı malzeme modelleri elde edilebilir.
5. Ti-Al tabakalı metal kompozit plakaların imalatında grade-1 titanyum ve AA1100-O gibi düşük mukavemetli alaşımlar yerine uzay-havacılıkta daha yaygın olarak kullanılan titanyum (Ti6Al4V) ve alüminyum (AA2024, AA6061 vb.) alaşımların folyoları kullanılarak benzer çalışmalar gerçekleştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. *Business Horizons*, 60(5), 677–688.
- Balle, F., Wagner, G., & Eifler, D. (2007). Ultrasonic Spot Welding of Aluminum Sheet/Carbon Fiber Reinforced Polymer - Joints. *Materials Science & Engineering Technology*, 38(11), 934–938.
- Bandyopadhyay, A., Traxel, K. D., Lang, M., Juhasz, M., Eliaz, N., & Bose, S. (2022). Alloy Design via Additive Manufacturing: Advantages, Challenges, Applications and Perspectives. *Materials Today*, 52, 207–224.
- Blakey-Milner, B., Gradl, P., Snedden, G., Brooks, M., Pitot, J., Lopez, E., Leary, M., Berto, F., & du Plessis, A. (2021). Metal Additive Manufacturing in Aerospace: A review. *Materials and Design*, 209.
- Bohrer, M., Basalka, H., Birner, W., Emiljanow, K., Goede, M., & Czerner, S. (2002). Turbine Blade Repair with Laser Fusion Welding and Shape Recognition. *2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing*, s. 8-10, San Antonio, TX, USA.
- Boulechfar, R., Ghemid, S., Meradji, H., & Bouhafs, B. (2010). FP-LAPW Investigation of Structural, Electronic, and Thermodynamic Properties of Al_3V and Al_3Ti Compounds. *Physica B: Condensed Matter*, 405(18), 4045–4050.
- Cham, J. G., Bailey, S. A., Clark, J. E., Full, R. J., & Cutkosky, M. R. (2002). Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing. *International Journal of Robotics Research*, 21(10–11), 869–882.
- Cheng, P., Peng, Y., Li, S., Rao, Y., Le Duigou, A., Wang, K., & Ahzi, S. (2023). 3D Printed Continuous Fiber Reinforced Composite Lightweight Structures: A review and outlook. *Composites Part B: Engineering*, 250, 110450.
- Cheng, X., Datta, A., Choi, H., Zhang, X., & Li, X. (2007). Study on Embedding and Integration of Microsensors into Metal Structures for Manufacturing Applications. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(2), 416–424.
- Cheng, X., & Li, X. (2007). Investigation of Heat Generation in Ultrasonic Metal Welding Using Micro Sensor Arrays. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17, 273.
- Clark, H. T. (1949). The Lattice Parameters of High Purity Alpha Titanium; and The Effects of Oxygen and Nitrogen on Them. *JOM*, 1(9), 588–589.
- Clements, J. W. (2009). *Embedded Spacecraft Thermal Control Using Ultrasonic Consolidation*. Utah State University, Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi, Logan, UT, ABD.

- Cramer, C. L., Ionescu, E., Graczyk-Zajac, M., Nelson, A. T., Katoh, Y., Haslam, J. J., Wondraczek, L., Aguirre, T. G., LeBlanc, S., Wang, H., Masoudi, M., Tegeler, E., Riedel, R., Colombo, P., & Minary-Jolandan, M. (2022). Additive Manufacturing of Ceramic Materials for Energy Applications: Road Map and Opportunities. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(7), 3049–3088.
- Czerwinski, F. (2022). Special Issue “Lightweight Structural Materials for Automotive and Aerospace”. *Materials*, 15(20), 7089.
- D Janaki, G., Robinson, C., & Stucker, B. (2006). *Multi-Material Ultrasonic Consolidation*.
- Daniels, H. P. C. (1965). Ultrasonic Welding. *Ultrasonics*, 3(4), 190–196.
- de Vries, E. (2004). *Mechanics and Mechanisms of Ultrasonic Metal Welding*. The Ohio State University, Welding Engineering, Doktora Tezi, Columbus, OH, ABD.
- Delgado Camacho, D., Clayton, P., O’Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). Applications of Additive Manufacturing in the Construction Industry – A Forward-Looking Review. *Automation in Construction*, 89, 110–119.
- Domack, M. S., & Baughman, J. M. (2005). Development of Nickel-Titanium Graded Composition Components. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 41–51.
- Doychak, J. (1992). Metal- and Intermetallic-Matrix Composites for Aerospace Propulsion and Power Systems. *JOM*, 44(6), 46–51.
- Dutta, D., Prinz, F. B., Rosen, D., & Weiss, L. (2001). Layered Manufacturing: Current Status and Future Trends. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(1), 60–71.
- Edmonds, H. C., & Harris, R. A. (2011). The Effect of Electro-Discharge Machined Sonotrode Topology on Interlaminar Bonding in Ultrasonic Consolidation. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2011*, s. 797814, Diego, CA, ABD.
- Flood, G. (1997). Ultrasonic energy welds copper to aluminium. *Welding Journal*, 76(1), 761–766.
- Fujii, H. T., Shimizu, S., Sato, Y. S., & Kokawa, H. (2017). High-strain-rate deformation in ultrasonic additive manufacturing. *Scripta Materialia*, 135, 125–129.
- Fujii, H. T., Sriraman, M. R., & Babu, S. S. (2011). Quantitative evaluation of bulk and interface microstructures in Al-3003 alloy builds made by very high power ultrasonic additive manufacturing. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42(13), 4045–4055.
- George, J. L. (2006). *Utilization of Ultrasonic Consolidation in Fabricating Satellite Decking*. Utah State University, Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi, Logan, TX, ABD.
- George, J., & Stucker, B. (2006a). Fabrication of Lightweight Structural Panels Through

- Ultrasonic Consolidation. *Virtual and Physical Prototyping*, 1(4), 227–241.
- Gibert, J. M. (2009). *Dynamics of Ultrasonic Consolidation*. Clemson University, Department of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, Clemson, SC, ABD.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, n (2. Baskı). Springer New York, NY, ABD.
- Graff, K. (2011). Ultrasonic Additive Manufacturing. İçinde T. J. Lienert, S. S. Babu, T. A. Siewert, & V. L. Acoff (Ed.), *ASM Handbook: Volume 6A: Welding Fundamentals and Processes* (1. baskı, ss. 730–742). American Society for Metals International.
- Gündüz, I. E., Shattuck, E. D., Ando, T., Wong, P. Y., & Doumanidis, C. C. (2005a). Effects of High-Speed Deformation on The Phase Stability and Interdiffusion in Ultrasonically Joined Aluminum and Zinc Foils. *Materials Research Proceedings*, 843, 123.
- Gündüz, I. E., Shattuck, E. D., Ando, T., Wong, P. Y., & Doumanidis, C. C. (2005b). Enhanced Diffusion and Phase Transformations During Ultrasonic Welding of Zinc and Aluminum. *Scripta Materialia*, 52, 939.
- Han, T., Kuo, C. H., Sridharan, N., Headings, L. M., Babu, S. S., & Dapino, M. J. (2020). Effect of Preheat Temperature and Post-Process Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel 410 Made via Ultrasonic Additive Manufacturing. *Materials Science and Engineering A*, 769(August 2019), 138457.
- Hansen, M., Kessler, H. D., & Bumps, E. S. (1952). Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. *Transactions of the American Institute of Mining* (C. 194). American Institute of Mining and Metallurgical Engineers.
- Harach, D. J., & Vecchio, K. S. (2001). Microstructure Evolution in Metal-Intermetallic Laminate (MIL) Composites Synthesized by Reactive Foil Sintering in Air. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(6), 1493–1505.
- Hazlett, T. h., & Ambekar, S. M. (1970). Additional Studies on Interface Temperatures and Bonding Mechanisms of Ultrasonic Welds. *Welding Journal*, 49, 196–200.
- He, X. H., Shi, H. J., Zhang, Y. D., Yang, Z. G., Wilkinson, C. E., Neal, A. L., & Norfolk, M. (2015). Mechanical Properties and Microstructure of Al/Al Laminated Structure Produced via Ultrasonic Consolidation Process. *Materials Science and Technology*, 31(15), 1910–1918.
- Hehr, A., & Dapino, M. J. (2015). Interfacial Shear Strength Estimates of NiTi–Al Matrix Composites Fabricated via Ultrasonic Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 77, 199–208.
- Hehr, A., & Dapino, M. J. (2017). Dynamics of Ultrasonic Additive Manufacturing. *Ultrasonics*, 73, 49–66.
- Hehr, A., & Norfolk, M. (2019). A Comprehensive Review of Ultrasonic Additive

- Manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 26(3), 445–458.
- Hehr, A., Norfolk, M., Wenning, J., Sheridan, J., Leser, P., Leser, P., & Newman, J. A. (2018). Integrating Fiber Optic Strain Sensors into Metal Using Ultrasonic Additive Manufacturing. *JOM*, 70(3), 315–320.
- Hong, S. B., Eliaz, N., Sachs, E. M., Allen, S. M., & Latanision, R. M. (2001). Corrosion Behavior of Advanced Titanium-Based Alloys Made by Three-Dimensional Printing (3DPTM) for Biomedical Applications. *Corrosion Science*, 43(9), 1781–1791.
- Hulst, A. P. (1972). Macrosonics in Industry (2): Ultrasonic Welding of Metals. *Ultrasonics*, 10, 252–261.
- ASTM. (2021). Additive Manufacturing—General Principles—Fundamentals and Vocabulary. *ISO/ASTM 52900*. American Society of Testing Materials.
- Jacobs, M. (2007). Glass-Metal Joining in Nuclear Environment: The State of the Art. *Materials Science and Technology-Association for Iron and Steel Technology*, 5, 3325.
- Jacobs, P. F. (2002). A Brief History of Rapid Prototyping & Manufacturing: The Early Years. *International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing*, San Antonio, TX, ABD.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S. (2021). Role of Additive Manufacturing Applications Towards Environmental Sustainability. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(4), 312–322.
- Ji, H., Li, M., Kim, J., Kim, D., & Wang, C. (2008). Nano Features of Al/Au Ultrasonic Bond Interface Observed by High Resolution Transmission Electron Microscopy. *Materials Characterization*, 59, 1419.
- Jockusch, J., & Özcan, M. (2020). Additive Manufacturing of Dental Polymers: An Overview on Processes, Materials and Applications. *Dental Materials Journal*, 39(3), 345–354.
- Johnson, G.R.; Cook, W. H. (1983). A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics Committee*, s541–547, Hauge, Hollanda.
- Jones, J. B., & Powers, J. J. (1956). Ultrasonic Welding. *Ultrasonics*, 35, 761–766.
- Joshi, K. C. (1971). The Formation of Ultrasonic Bonds Between Metals. *Welding Journal*, 50, 840–848.
- Karapatis, N. P., Van Griethuysen, J. P. S., & Glardon, R. (1998). Direct Rapid Tooling: A Review Of Current Research. *Rapid Prototyping Journal*, 4(2), 77–89.
- Kaya, İ., Cora, Ö. N., Acar, D., & Koç, M. (2018). On the Formability of Ultrasonic Additive Manufactured Al-Ti Laminated Composites. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 49(10), 5051–5064.

- Kaya, İ., Cora, Ö. N., & Koç, M. (2019). Formability of Ultrasonically Additive Manufactured Ti-Al Thin Foil Laminates. *Materials*, 12(20), 1–16.
- Kong, C. Y. (2005). *Investigation of Ultrasonic Consolidation For Embedding Active / Passive Fibres In Aluminium Matrices*. Loughborough University, Mechanical Engineering, Doktora Tezi, Loughborough, Londra, İngiltere.
- Kong, C. Y., & Soar, R. C. (2005). Fabrication of Metal–Matrix Composites and Adaptive Composites Using Ultrasonic Consolidation Process. *Materials Science and Engineering: A*, 412(1), 12–18.
- Kong, C. Y., Soar, R. C., & Dickens, P. M. (2003). Characterisation of Aluminium Alloy 6061 for the Ultrasonic Consolidation Process. *Materials Science and Engineering: A*, 363(1), 99–106.
- Kong, C. Y., Soar, R. C., & Dickens, P. M. (2004a). Optimum Process Parameters for Ultrasonic Consolidation of 3003 Aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(2), 181–187.
- Kong, C. Y., Soar, R. C., & Dickens, P. M. (2004b). Ultrasonic Consolidation for Embedding SMA Fibres Within Aluminium Matrices. *Composite Structures*, 66(1), 421–427.
- Kong, C. Y., Soar, R. C., & Dickens, P. M. (2005). A Model for Weld Strength in Ultrasonically Consolidated Components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 219(1), 83–91.
- Kothari, K. (2010). *Manufacturing Techniques For Titanium Aluminide Based Alloys And Metal Matrix Composites*. University of Maryland, Department of Aerospace Engineering, Doktora Tezi, College Park, GA, ABD.
- Krüger, L., Trommer, F., Vecchio, K., Wielage, B., Mücklich, S., Meyer, L., & Meyers, M. (2003). Brazing of Metallic–Intermetallic Laminate (MIL) Ti-6Al-4V/Al3Ti Composites. *Proceedings of Welding and Brazing Conference*.
- Krüger, S., Wagner, G., & Eifler, D. (2004). Ultrasonic Welding of Metal/Composite Joints. *Advanced Engineering Materials*, 6(3), 157–159.
- Kuckert, H., Born, C., Wagner, G., & Eifler, D. (2003). Residual Stress Distributions in Glass/Metal-Joints Produced by Ultrasonic Torsion Welding. *Materials Science & Engineering Technology*, 34(1), 30–33.
- Kumar, R., Kumar, M., & Chohan, J. S. (2021). The Role of Additive Manufacturing for Biomedical Applications: A Critical Review. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 828–850.
- Lee, J.-Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Fundamentals and Applications of 3D Printing for Novel Materials. *Applied Materials Today*, 7, 120–133.
- Lesuer, D. R., Syn, C. K., Sherby, O. D., Wadsworth, J., Lewandowski, J. J., & Hunt, W. H. (1996). Mechanical Behaviour of Laminated Metal Composites. *International*

Materials Reviews, 41(5), 169–197.

- Levy, A., Miriyev, A., Sridharan, N., Han, T., Tuval, E., Babu, S. S., Dapino, M. J., & Frage, N. (2018). Ultrasonic Additive Manufacturing of Steel: Method, Post-Processing Treatments and Properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 256, 183–189.
- Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), 589–609.
- Li, D., & Soar, R. C. (2008). Plastic Flow and Work Hardening of Al Alloy Matrices During Ultrasonic Consolidation Fibre Embedding Process. *Materials Science and Engineering: A*, 498(1), 421–429.
- Li, X., & Prinz, F. (2003). Metal Embedded Fiber Bragg Grating Sensors in Layered Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125(3), 577–585.
- Lütjering, G., & Williams, J. (2007). *Titanium: Engineering Materials and Processes*. Springer.
- Mao, Q. (2016). *Understanding The Bonding Process of Ultrasonic Additive Manufacturing*. Clemson University, Mechanical Engineering, Doktora Tezi, Clemson, SC, ABD.
- Marciniak, Z., Duncan, L. J., & Hu, J. S. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming* (2. Baskı). Butterworth-Heinemann.
- Matsuoka, S., & Imai, H. (2009). Direct Welding of Different Metals Used Ultrasonic Vibration. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 954.
- Milewski, J. O. (2017). Additive Manufacturing Metal, The Art of the Possible. *Springer Series in Materials Science* (1. Baskı, C. 258, ss. 7–33). Springer International Publishing.
- Mohanavel, V., Ashraff Ali, K. S., Ranganathan, K., Allen Jeffrey, J., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. (2021). The Roles and Applications of Additive Manufacturing in the Aerospace and Automobile Sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409.
- Monaghan, T., Capel, A. J., Christie, S. D., Harris, R. A., & Friel, R. J. (2015). Solid-state Additive Manufacturing for Metallized Optical Fiber Integration. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 181–193.
- Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of Additive Manufacturing Technologies and Applications in the Aerospace Industry. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, 7–31.
- O'Brien, A. (1991). *Welding Handbook: Welding Processes, Part 1* (8. Baskı. American Welding Society.
- O'Brien, R. L. (1983). *Welding Handbook*. *Welding Handbook* (C. 2, Sayı 2). American Welding Society.

- Obielodan, J. O., & Stucker, B. E. (2009). *Further Exploration of Multi-Material Fabrication Capabilities of Ultrasonic Consolidation Technique*. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, s. 9-18, Austin, TX, ABD.
- Obielodan, J. O., Stucker, B. E., Martinez, E., Martinez, J. L., Hernandez, D. H., D.A.Ramirez, & Murr, L. E. (2011). Optimization of the Shear Strengths of Ultrasonically Consolidated Ti/Al 3003 Dual-Material Structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 988–995.
- Pal, D. (2011). *Dislocation Density-Based Finite Element Method Modeling of Ultrasonic Consolidation*. Utah State University, Mechanical Engineering, Doktora Tezi, Logan, UT, ABD.
- Peng, L. M., Li, H., & Wang, J. H. (2005). Processing and Mechanical Behavior of Laminated Titanium–Titanium Tri-Aluminide (Ti–Al₃Ti) Composites. *Materials Science and Engineering: A*, 406(1), 309–318.
- Peng, L. M., Wang, J. H., Li, H., Zhao, J. H., & He, L. H. (2005). Synthesis and Microstructural Characterization of Ti–Al₃Ti Metal–Intermetallic Laminate (MIL) Composites. *Scripta Materialia*, 52(3), 243–248.
- Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C., & Chen, G. (2018). Sustainability of Additive Manufacturing: An Overview on Its Energy Demand and Environmental Impact. *Additive Manufacturing*, 21, 694–704.
- Ram, G. D. J., Robinson, C., Yang, Y., & Stucker, B. E. (2007). Use of Ultrasonic Consolidation for Fabrication of Multi-Material Structures. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 226–235.
- Ram, G. D. J., Yang, Y., Nylander, C., Aydelotte, B., Stucker, B. E., & Adams, B. L. (2007). Interface Microstructures and Bond Formation in Ultrasonic Consolidation. *18th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, ABD.
- Ram, J. G. D., Yang, Y., George, J., Robinson, C., & Stucker, B. E. (2006). Improving Linear Weld Density in Ultrasonically Consolidated Parts. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, S. 692–708, Austin, TX, ABD.
- Ribeiro, I., Matos, F., Jacinto, C., Salman, H., Cardeal, G., Carvalho, H., Godina, R., & Peças, P. (2020). Framework for Life Cycle Sustainability Assessment Of Additive Manufacturing. *Sustainability*, 12(3).
- Salifu, S., Desai, D., Ogunbiyi, O., & Mwale, K. (2022). Recent Development in The Additive Manufacturing of Polymer-Based Composites For Automotive Structures—A Review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(11–12), 6877–6891.
- Salmi, M. (2021). Additive Manufacturing Processes in Medical Applications. *Materials*, 14(1), 1–16.
- Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., & Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of Metal Components by Laser Forming. *International Journal of Machine Tools and*

- Manufacture*, 46(12–13), 1459–1468.
- Sauthoff, G. (2008). *Intermetallics*. John Wiley & Sons.
- Schubert, K., Meissner, H. G., Pötzschke, M., Rossteutscher, W., & Stolz, E. (1962). Einige Strukturdaten metallischer Phasen (7). *Die Naturwissenschaften*, 49(3), 57–57.
- Shapiro, A. A., Borgonia, J. P., Chen, Q. N., Dillon, R. P., McEnerney, B., Polit-Casillas, R., & Soloway, L. (2016). Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 53(5), 952–959.
- Shawn Lee, S., Hyung Kim, T., Jack Hu, S., Cai, W. W., Abell, J. A., & Li, J. (2013). Characterization of Joint Quality in Ultrasonic Welding of Battery Tabs. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(2), 21004–21013.
- Sietins, J. M. (2014). *Exploring Diffusion of Ultrasonically Consolidated Aluminum and Copper Films Through Scanning and Transmission Electron Microscopy*. University of Delaware, Materials Science and Engineering, Doktora Tezi, Newmark, DE, ABD.
- Siggard, E. J. (2007). *Investigative Research Into The Structural Embedding Of Electrical and Mechanical Systems Using Ultrasonic Consolidation*. Utah State University, Mechanical Engineering, Yüksek Lisans Tezi, Logan, UT, ABD.
- Siggard, E. J., Madhusoodanan, A. S., Stucker, B., & Eames, B. (2006). Structurally Embedded Electrical Systems Using Ultrasonic Consolidation (UC). *17th Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2006*, s. 70–83, Austin TX, ABD.
- Sojiphan, K. (2015). *Effects of Very High Power Ultrasonic Additive Manufacturing Process Parameters on Hardness, Microstructure, and Texture of Aluminum 3003-H18 Alloy*. The Ohio State University, Welding Engineering, Doktora Tezi, Columbus, OH, ABD.
- Sridharan, N., Gussev, M., Seibert, R., Parish, C., Norfolk, M., Terrani, K., & Babu, S. S. (2016). Rationalization of Anisotropic Mechanical Properties of Al-6061 Fabricated Using Ultrasonic Additive Manufacturing. *Acta Materialia*, 117, 228–237.
- Sridharan, N., Wolcott, P., Dapino, M., & Babu, S. S. (2016). Microstructure and Texture Evolution in Aluminum and Commercially Pure Titanium Dissimilar Welds Fabricated Using Ultrasonic Additive Manufacturing. *Scripta Materialia*, 117, 1–5.
- Sridharan, N., Wolcott, P., Dapino, M., & Babu, S. S. (2017). Microstructure and Mechanical Property Characterisation of Aluminium–Steel Joints Fabricated Using Ultrasonic Additive Manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(5), 373–380.
- Srivatsan, T. S., Manigandan, K., & Sudarshan, T. S. (2015). Additive Manufacturing of Materials: Viable Techniques, Metals, Advances, Advantages, and Applications. İçinde T. S. Srivatsan & T. S. Sudarshan (Ed.), *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications* (1. Baskı, ss. 1–49). CRC Press.
- Steinegger, R. (2017). Fuel Economy for Aircraft Operation as a Function of Weight and Distance. *Report*.

- Stevens, B., Yang, Y., Mohandas, A., Stucker, B., & Nguyen, K. T. (2008). A Review of Materials, Fabrication Methods, and Strategies Used to Enhance Bone Regeneration in Engineered Bone Tissues. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 85(2), 573–582.
- Stoloff, N. S., Liu, C. T., & Deevi, S. C. (2000). Emerging Applications of Intermetallics. *Intermetallics*, 8(9), 1313–1320.
- Stucker, B. E., Obielodan, J. O., Ceylan, A., & Murr, L. E. (2010). Multi-material Bonding in Ultrasonic Consolidation. *Rapid Prototyping Journal*, 16(3), 180–188.
- Sun, C., Wang, Y., McMurtrey, M. D., Jerred, N. D., Liou, F., & Li, J. (2021). Additive Manufacturing for Energy: A review. *Applied Energy*, 282.
- Toyserkani, E., Sarker, D., Ibhaddode, O. O., Liravi, F., Russo, P., & Taherkhani, K. (2022). *Metal Additive Manufacturing* (1. Baskı). John Wiley & Sons Ltd.
- Truog, A. G. (2012). *Bond Improvement of Al/Cu Joints Created by Very High Power Ultrasonic Additive Manufacturing*. Ohio State University, Welding Engineering, Yüksek Lisans Tezi, Columbus, OH, ABD.
- Tuncer, N., & Bose, A. (2020). Solid-State Metal Additive Manufacturing: A Review. *JOM*, 72(9), 3090–3111.
- Tuttle, R. B. (2007). Feasibility Study of 316L Stainless Steel for the Ultrasonic Consolidation Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(2), 87–93.
- Vailionis, A., Gamaly, E. G., Mizeikis, V., Yang, W., Rode, A. V., & Juodkazis, S. (2011). Evidence of Superdense Aluminium Synthesized by Ultrafast Microexplosion. *Nature Communications*, 2(1).
- Vasco, J. C. (2021). Additive Manufacturing for the Automotive Industry. J. Pou, A. Riveiro, & J. P. Davim (Ed.), *Additive Manufacturing: A Volume in Handbooks in Advanced Manufacturing* (1. Baskı, ss. 505–530). Elsevier Inc.
- Wang, Y., Hou, F. M., Yang, Q., Fan, Z. Y., Pan, H. Y., & Xu, H. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of Al/Fe Micro-laminated composites fabricated by Ultrasonic Consolidation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1507(4).
- Wang, Y., Yang, Q., Liu, X., Liu, Y., Liu, B., Misra, R. D. K., Xu, H., & Bai, P. (2019). Microstructure and Mechanical Properties of Amorphous Strip/Aluminum Laminated Composites Fabricated by Ultrasonic Additive Consolidation. *Materials Science and Engineering: A*, 749, 74–78.
- White, D. (2003). Ultrasonic Object Consolidation (Patent Sayı US6519500). *U.S. Patent 6519500* (Sayı US6519500). <https://patents.google.com/patent/US6519500B1/en>
- White, D. R. (2003). Ultrasonic Consolidation of Aluminum Tooling. *Advanced Materials and Processes*, 161(1), 64–65.
- Wolcott, P. J. (2015). *Ultrasonic Additive Manufacturing: Weld Optimization for Aluminum*

6061, *Development of Scarf Joints for Aluminum Sheet Metal, and Joining of High Strength Metals*. The Ohio State University, Mechanical Engineering, Dكتورا Tezi, Columbus, OH, ABD.

- Wolcott, P. J., Hehr, A., Pawlowski, C., & Dapino, M. J. (2016). Process Improvements and Characterization of Ultrasonic Additive Manufactured Structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 233, 44–52.
- Wu, B. M., Borland, S. W., Giordano, R. A., Cima, L. G., Sachs, E. M., & Cima, M. J. (1996). Solid Free-Form Fabrication of Drug Delivery Devices. *Journal of Controlled Release*, 40(1–2), 77–87.
- Yan, X., & Gu, P. (1996). A Review of Rapid Prototyping Technologies and Systems. *CAD Computer Aided Design*, 28(4), 307–318.
- Yang, Y., Janaki Ram, G. D., & Stucker, B. E. (2007). An Experimental Determination of Optimum Processing Parameters for Al/SiC Metal Matrix Composites Made Using Ultrasonic Consolidation. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 129(4), 538–549.
- Yang, Y., Janaki Ram, G. D., & Stucker, B. E. (2009). Bond Formation and Fiber Embedment During Ultrasonic Consolidation. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(10), 4915–4924.
- Zhu, L., Li, N., & Childs, P. R. N. (2018). Light-weighting in aerospace Component and System Design. *Propulsion and Power Research*, 7(2), 103–119.

ÖZGEÇMİŞ

Doğan ACAR, 2022 yılında Milas Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini, 2015 yılında da Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'ndan yüksek lisans derecesini aldı. 2014 yılından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Bu süre zarfında TÜBİTAK tarafından desteklenen (112M913,) TÜBİTAK ve Slovenya Araştırma Ajansı (ARRS) ikili iş birliği kapsamında desteklenen (122N338), TUSAŞ Döner Kanat Teknoloji Merkezi tarafından desteklenen (DKTM2015/03), Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenen (FAY-2016-5459) ve (FAY-2021-9818) kodlu olmak üzere toplam 5 farklı projede araştırmacı olarak görev almıştır. Doğan ACAR'ın SCI-Expanded indeksli dergilerde 7 adet makalesi, 2'si uluslararası olmak üzere hakemli diğer bilimsel dergilerde yayımlanmış 3 adet makalesi ve 17'si uluslararası olmak üzere 21 adet bildirisi bulunmaktadır. Doğan ACAR, İngilizce bilmektedir.