

Araştırma Makalesi / Research Article

AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi

Mustafa ARSLAN<sup>1\*</sup>, Nil TOPLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Türkiye Raylı Sistem Araçları Sanayii A.Ş., Sakarya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0106-7656>, mustafa.arслан@turasas.gov.tr

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4130-0002>, toplan@sakarya.edu.tr

Geliş/ Received: 17.04.2023;

Kabul / Accepted: 14.06.2023

**ÖZET:** Mevcut çalışma AA6061 plakaların MIG kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin ardından MIG ve TIG kaynak yöntemleri kullanılarak üçer defa tamir işlemini kapsamaktadır. Kaynaklı numunelere tahribatlı ve tahribatsız testler uygulanmıştır. Gözle muayene ve sıvı penetrant testi sonuçlarına göre TIG kaynağı MIG kaynağına göre daha düzgün bir kaynak yüzeyi sergilemiş ve radyografik muayene sonuçlarında hataya rastlanmamıştır. Makroyapı incelemelerinde tamirat işleminin gözenek oluşumuna gözle görülür bir etkisinin olmadığı, mikroyapı incelemelerinde tamirat sayısı arttıkça ısı girdisine bağlı olarak ITAB bölgesinde tanelerin irileştiği belirlenmiştir. Sertlik değerleri ana metalden kaynak bölgesine doğru gidildikçe azalmış, çekme deneyi sonuçlarında ise MIG kaynağının TIG kaynağına göre daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu ve tamirat sayısı arttıkça mukavemet değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. SEM-EDS sonuçlarına göre tamirat sayısı arttıkça mukavemet arttırıcı görevi olan Mg'nin oranının azaldığı belirlenmiştir. XRD sonuçlarına göre alüminyum pikleri ile birlikte, Mg<sub>2</sub>Si'nin düşük şiddette pik verdiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA6061, ITAB, MIG kaynağı, Tahribatlı test, Tahribatsız test, TIG kaynağı.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: mustafa.arслан@turasas.gov.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Arslan, M., Toplan, N. (2023). AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 333-354.

## Investigation of MIG and TIG Welding Repairs on AA6061 Series Aluminum Plates by Destructive and Non-Destructive Tests

**ABSTRACT:** The study includes the joining of AA6061 plates with MIG welding method and then repairing three times using MIG and TIG welding methods. Destructive and non-destructive tests were applied to the welded samples. According to the results of visual inspection and liquid penetrant test, TIG welding exhibited a smoother weld surface than MIG welding, and no defect were found in the radiographic inspection results. It was determined that the repair process did not have a visible effect on the pore formation in the macrostructure examinations, and the grains in the HAZ region became coarser due to the heat input as the number of repairs increased in the microstructural examinations. The hardness values decreased from the base metal to the welding zone, and in the tensile test results, it was determined that MIG welding had higher strength values than TIG welding and the strength values decreased as the number of repairs increased. According to the SEM-EDS results, it was determined that as the number of repairs increased, the ratio of Mg, which has the task of increasing the strength, decreased. According to the XRD results, it was observed that Mg<sub>2</sub>Si gave low intensity peaks together with the aluminum peaks.

**Keywords:** AA6061, Destructive test, Non-destructive test, HAZ, MIG welding, TIG welding.

### 1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, havacılık, uzay araçları, yapısal ve askeri alanda; yüksek elastik modül, yüksek spesifik mukavemet, iyi kırılma tokluğu ve mükemmel korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır. AA6061 magnezyum ve silisyum gibi ana alaşım elementlerini içeren çökeltme ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımları olup çökeltme sertleşmesi ile mukavemeti artırılabilen, ısı işlem görebilen ve ayrıca kaynakta ısı girdisi sırasında faz dönüşümü meydana gelen alaşımlardır. 1935 yılında geliştirilmiş ve Alloy 61S olarak adlandırılmıştır (Kumar ve ark., 2021). Alüminyumun ekonomikliği ve kullanım alanlarının çok geniş olması, uygun mekanik özelliklerinin yanı sıra, düşük yoğunluğu, kolay işlenebilir ve şekillendirilebilirliği, geri dönüşümünün mümkün olması, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği gibi özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Prakash ve ark., 2012).

Alüminyum kaynağı ile ilgili Malin tarafından yapılan bir çalışmada, 6061-T6 parçası 4043 dolgu malzemesi ile MIG kaynağı kullanılarak kaynak yapılmıştır. Mikrosertlik değeri ölçümleri, 100 gram yük ile bir Knoop mikrosertlik test cihazı kullanılarak, kaynağa paralel olarak ve kaynak merkez hattından 0.125 inç'lik artışlarla alınmıştır. Çalışma, ısıdan etkilenen bölgedeki (ITAB) sertlik değerlerinin ana malzemenin yaklaşık %70'i olduğunu göstermiştir. Ana malzemenin kaynak öncesi akma dayanımı 44.35 ksi iken kaynak sonrası ortalama değeri 30 ksi olarak ölçülmüştür. Çalışmada test edilen 12 numuneden 7'si füzyon hattıyla ITAB arasındaki 0,01-0,4 inç arasında değişen bölgelerden kopmuştur (Malin, 1995). Ambriz ve arkadaşları gaz metal ark kaynağının 6061-T6 üzerindeki etkisini incelediği çalışmasında, ısı girdisi ne kadar yüksek olursa, ITAB'ın mekanik özelliklerinin o kadar düşük olduğunu ortaya koymuşlardır. Kaynak çatlamasının nedeninin, alüminyum alaşımının çok yüksek termal genleşme miktarının yanı sıra geniş katılma sıcaklık aralığından kaynaklandığını ortaya koymuşlardır (Ambriz ve ark., 2009). Hirose ve arkadaşları 6061-T6 için lazer kaynağının ITAB üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Kaynak işlemi sırasında daha fazla ısı girdisinin, ısıdan etkilenen bölgede sertlik düşüşüne ve kaynak esnasında yüksek ısı girdisinin dalgalanması ITAB'da çökeltilerinin çözünmesine neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada 1 mm kalınlığında bir 6061-T6 parçası üzerinde TIG kaynağı ve lazer

kaynağı uygulanmıştır. Lazer kaynağı için ısıdan etkilenen bölgenin TIG kaynağınıninkinin yaklaşık 1/7 ila 1/4'ü kadar azaldığını gözlemlenmiştir. Sadece ITAB bölgesi küçülmekle kalmamış, aynı zamanda suni yaşlandırma ile sertlik neredeyse tamamen geri kazanılmıştır (Hirose ve ark., 1999). Withers bir malzemenin yüzeyindeki ısı girdisinin, o metalde oluşan kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisini incelemiş ve ısı girdisi azaldığında yüzeydeki alanın çok daha hızlı büzüldüğü ve malzemenin oda sıcaklığına daha hızlı soğuduğu sonucuna varmıştır. Soğuma esnasında dış yüzey büzülme eğiliminde iken malzemenin iç bölgesi hala daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğundan, bu durum yüzeyde kalıntı çekme gerilmeleri oluşturacaktır. Aynı teori kaynak için de geçerlidir. Kaynak hattı en son soğuyan bölge olduğundan, bu durum yüzeyde kaynak hattında kalıntı gerilmelere neden olmaktadır (Withers, 2007). Singh ve arkadaşları kaynak akımı, gaz debisi ve kaynak hızı gibi kaynak parametrelerinin AA5083 alüminyum alaşımının çekme dayanımı üzerindeki etkisini TIG kaynağı kullanarak araştırmıştır. 240 amper kaynak akımı ve 7 lt/dk gaz debisi kullanıldığında maksimum 129 MPa çekme dayanıma ulaşılmıştır. Yüksek çekme mukavemeti için kaynak hızı 98 mm/dk olarak tutulmuştur. Kaynaklı birleştirilen AA5083 alüminyum alaşımının çekme dayanımı, kaynak hızının artmasıyla optimum bir değere kadar artmış, bu değerden sonra azalmıştır. Böylece maksimum çekme dayanımı için optimum kaynak parametreleri; kaynak akımı 240 amper, kaynak hızı 98 mm/dk ve gaz debisi 7 lt/dk olarak bulunmuştur (Singh ve ark., 2013). Kamat ve Kumar sürtünme karıştırma kaynağı ve TIG kaynağı ile birleştirilen alüminyum alaşımı AA6106 T6'nın mekanik özelliklerini incelemek için deneysel bir araştırma yürütmüştür. Numune boyutu 160 mm x 30 mm x 3 mm olarak seçilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan AA6106 T6 alaşımının çekme dayanımının TIG kaynağına göre daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Kaynak numuneleri, ana malzeme ile karşılaştırıldığında daha düşük mekanik özellikler sergilemiştir. Sürtünme karıştırma kaynağının sertliğinin TIG kaynağına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Kamat ve Kumar, 2013).

Alüminyum kaynağına tamir yapmak, termal gerilmeler ve ısı girdisi nedeni ile istenilen bir durum olmamakla beraber, tekrar eden ısı girdileri malzemenin dayanımını azaltmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğunca tamirat işleminden kaçınmak gerekmektedir. Ancak bazı durumlarda ise kaynak parametrelerinin yanlış seçimi, ortam koşulları ve kullanılan malzemelerden ötürü çeşitli kaynak hatalarıyla karşılaşmaktadır ve tamirat işlemi kaçınılmaz olmaktadır. Tamirat işlemi malzemenin servis şartlarında ve güvenli bir şekilde kullanılması için maksimum hassasiyet gösterilerek yapılmalıdır. Mevcut çalışmada AA6061 serisi plakaların kaynaklı birleştirmeleri için dolgu malzemesi ve kaynak parametreleri belirlenmiştir. Kaynaklı numunelere tahribatlı ve tahribatsız muayene testleri yapılmış ve elde edilen muayene sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Farklı kaynak yöntemleriyle (TIG, MIG) üçer defa kaynak tamiri yapılmış ve her bir tamirat sonrası sonuçlar değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

Metal inert gaz (MIG) bir ergitme kaynağı olup, kaynak alanını dış atmosferden korumak için inert gazın kullanıldığı bir kaynak yöntemidir. Diğer birçok ark kaynağı yöntemine kıyasla yüksek kaliteli bir kaynak yöntemidir ve ayrıca bu yöntem yarı otomatik veya otomatik olarak uygulanabildiğinden, besleme açısından daha fazla verimlilik sağlamakta, akım ve voltaj açısından kaynak sırasında işlemi kolaylaştırmaktadır. Koruyucu gaz, tek gazlı veya gaz karışımından oluşabilir. Koruyucu gaz ve elektrot tipi seçimi kullanılan metalin cinsine bağlıdır ve elektrot makara şeklindedir. MIG kaynağı DC veya AC akım kullanılarak yapılabilir (Khafaji, 2020). Erimiş kaynak havuzu ve ark bölgesi, argon veya helyum gibi asal gazlarla korunur. MIG kaynak yöntemi alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir ve dengeli bir ark ile düşük sıçrama kaybı ve iyi kaynak penetrasyonları ile pürüzsüz bir metal transferi elde edilebilir (Okay, 2016).

Koruyucu gaz olarak genellikle argon gazı kullanıldığı için, Tungsten inert gaz (TIG) ark kaynağına argon-ark kaynağı da denir. Bir elektrik ark kaynağı yöntemi olan TIG ark kaynağı yönteminde kaynak için gereken ısı, erimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektrik arki ile sağlanır. Ark bölgesi genellikle argon gazı gönderilerek korunur. Kaynak yapılacak ana metale göre kaynak ilave metali kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir (Debeski, 2017).

Çalışmanın amacı; AA6061 serisi plakalara minimum kaynak tamiriyle kaynağın sürdürülebilirliğini sağlamak ve artan tamirat sayısı ile birlikte kabul kriterlerine bağlı olarak malzemenin servis şartlarında kullanılıp kullanılmayacağını belirlemektir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

Mevcut çalışmada kaynak ana malzemesi olarak; 45° kaynak ağız açılmış 300x280x4 mm boyutlarında AA6061 T6 serisi Al plakalar kullanılmıştır.

Tablo 1 ve Tablo 2’de 6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu ve mekanik değerleri verilmiştir. (Kocaman ve Demirer, 2021).

**Tablo 1.** AA6061 T6 alüminyum plakanın kimyasal kompozisyonu

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Al
ağ. %	0.68	0.44	0.24	0.14	0.94	0.2	0.06	0.04	0.03	Kalan

**Tablo 2.** AA6061 T6 alüminyum plakanın mekanik değerleri

Temper	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Vickers-HV)
T6	270	260-310	16	86

Dolgu malzemesi olarak ER5356 kodlu %5 Mg (Magnezyum) alaşımlı alüminyum kaynak teli kullanılmıştır. Ana metal ile renk uyumu ve özellikle yüksek korozyon direncinden dolayı Al-Mg ve Al-Mg-Si alaşımlarının kaynağında yaygın olarak kullanılmakta olup; kimyasal bileşimi Tablo 3’te verilmiştir (Akman, 2018).

**Tablo 3.** ER5356 dolgu telinin kimyasal bileşimi (ağ. %)

Si	Fe	Cr	Mn	Mg	Cu	Zn	Ti	Diğer	Al
0,03	0,15	0,11	0,14	4,83	0,01	0,01	0,09	-	kalan

ER5356 mekanik özellikleri Tablo 4’te verilmiştir (Çüngür, 2021).

**Tablo 4.** ER5356 dolgu telinin mekanik özellikleri

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
110-120	240-280	17-26	562-633

AA6061 T6 serisi 300x280x4 mm boyutlarındaki Al plakalar MIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Daha sonra aynı boyut ve bileşime sahip parçalar tekrar MIG kaynağı ile kaynatılarak, kaynaklı bölgeler taşlanmış ve MIG kaynağıyla tamirat kaynağı yapılmıştır. Aynı işlemler MIG kaynağı ile 3.tamirat aşamasına kadar tekrarlanmıştır. Aynı tamirat işlemleri (1. 2. ve 3. tamiratlar) TIG kaynağıyla da yapılmıştır. Her iki kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen tamirat işlemleri üçer defa tekrarlanmış ve her tamirattan sonra kaynaklı bölgeler incelenmiştir. Ana kaynak

0, MIG kaynak tamirleri 1 ve TIG kaynak tamirleri 2 kodu ile gösterilmiştir. Kullanılan kaynak parametreleri Tablo 5’te verilmiştir.

**Tablo 5.** MIG ve TIG kaynak parametreleri

<b>Kaynak parametreleri</b>	<b>MIG</b>	<b>TIG</b>
Kullanılan Ana Malzemeler	6061 T6 (280x300x4 mm )	6061 T6 (280x300x4 mm )
Kaynak Makinası	Fronius TPS 400 i	EWM Tetrix
Voltaj (V)	21-23	17-19
Akım (A)	170-180	180-200
Gaz Debisi (lt/dk)	15	12
Kullanılan Gaz (% 99.99)	Argon	Argon
Kaynak hızı (cm/dak)	70-75	45-48
Tel Cinsi/Çapı (mm)	Esab 5356 / 1.2	TNT ER5356 / 3.2

AA6061 Al plakaların birinci kaynak işlemi MIG kaynak yöntemiyle yapılmıştır. Tamir işlemleri ise hem MIG hem de TIG kaynak yöntemleriyle yapıp gerekli muayeneler tamamlandıktan sonra kaynak bölgesi taşlanıp tamir kaynağı için hazır hale getirilmiştir. MIG ve TIG kaynağı ile tamir işlemi üçer kez tekrarlanmıştır. Her defasında yeni bir malzeme alınarak kaynak ve tamir kaynakları tekrarlanmıştır. Tablo 6’da, gerçekleştirilen kaynakların kodları düzenlenmiştir.

**Tablo 6.** Yapılan kaynak ve tamiratların kodları

1. MIG kaynağı: 0.0	
1. MIG Kaynak Tamiri: 1.1	1. TIG Kaynak Tamiri: 1.2
2. MIG Kaynak Tamiri: 2.1	2. TIG Kaynak Tamiri: 2.2
3. MIG Kaynak Tamiri: 3.1	3. TIG Kaynak Tamiri: 3.2

Tahribatlı muayene veya tahribatsız muayene kullanılarak kaynak muayenesi yapılabilmektedir. Tahribatlı kaynak testi, tamamlanmış kaynağın özelliklerini değerlendirmek için malzemenin fiziksel olarak tahrip edilmesini içeren bir kaynak test tekniğidir. Tahribatsız muayene, parça veya sistemin servis şartlarını bozmadan malzemedeki süreksizlikleri veya özelliklerdeki farklılıkları belirlemek için muayene, test veya değerlendirme sürecidir.

## 2.1 Tahribatsız Muayene Yöntemleri

Tahribatsız muayene, bir ürünün kalite kontrol sürecinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir ürünün imalatının tüm aşamalarında kullanılır ve aşağıdaki süreçlerde malzemenin kalitesini izlemek için kullanılır (Bhatia, 2023).

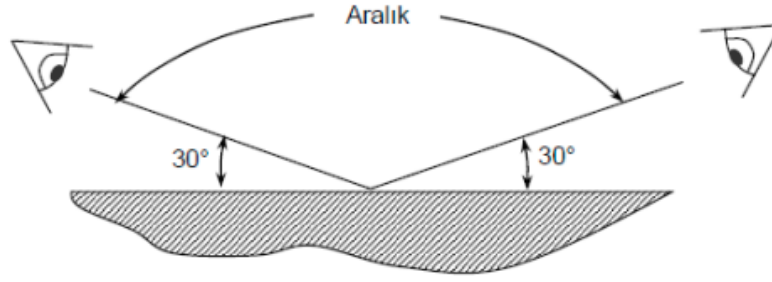
- Ürünün yapımında kullanılan hammaddelerde.
- Ürünü imal ederken.
- Hizmete sunulmadan önce bitmiş üründe.

### 2.1.1 Gözle muayene yöntemi

Görsel test, kaynakta yüzey süreksizliklerini belirlemek için gözle veya yardımcı bir ekipman kullanarak yaptığımız bir tahribatsız muayene yöntemidir. Görsel testler, test yüzeyinin yeterli şekilde aydınlatılmasını ve test cihazının uygun şekilde görülmesini gerektirir.

TS EN 13018 (Genel Kurallar) standardına göre, genel gözle muayene için en az 160 lux, yerel gözle muayene için en az 500 lux aydınlatma gerekmektedir. TS EN ISO 17637 (Kaynaklar için Genel Kurallar) standardına göre, Muayene yüzeyinin aydınlanma şiddeti en az 350 lüks olmalıdır; ancak bu değer 500 lüks olması tavsiye edilmektedir. Doğrudan muayene yapılırken, muayene yüzeyi ile göz arasındaki mesafe 600 mm’yi geçmemiş olması gerekmektedir. Dolaylı gözle

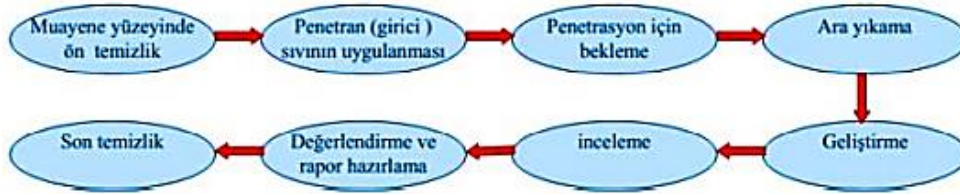
muayenede bu şart gözetmeksizin yapılabilmektedir. (Gönül, 2023). Muayene açısı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Muayene açısı

### 2.1.2 Sıvı penetrant muayenesi

Sıvı penetrant testi, malzemelerdeki veya kaynak yüzeyindeki küçük sızıntıları, çatlakları, gözenekleri ve süreksizliği tespit etmek için tasarlanmıştır. Bu prosedürde, önceden belirlenmiş bir süre boyunca ürün yüzeyine sıvı nüfuz edici bir boya püskürtülür. Penetrant daha sonra kılcal etki yoluyla en küçük çatlaklara veya gözeneklere sürünerek girer. Yüzey kuruduktan sonra, kusurda kalan penetrantı emen ve konumu, boyutu ve türü de dahil olmak üzere tüm kusurları gösteren bir geliştirici uygulanır. Sıvı penetrant testi, görünür ışık veya floresan aydınlatma ortamında yapılır. (Bhatia, 2023). Penetrant testi işlemi Şekil 2’deki sıra izlenerek yapılır (Gönül, 2023). TSE EN ISO 3452-1 standartına uygun penetrant ürün ailesi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Penetrant testi işlem sırası



Şekil 3. Penetrant ürün ailesi ( MR 85 alkol, MR 68C penetrant sıvı, MR 70 geliştirici)

### 2.1.3 Radyografik muayene

Radyografik test, bir bileşenin içinin görüntülenmesini sağlayan bir görüntüleme test yöntemini ifade eder. Radyografik X ışınlarını kullanır ve bu ışınlar kaynağın içinden geçer ve malzemenin arkasına yerleştirilen bir film üzerinde gölge bir resim oluşturur. Bu ışınların dalga boyu 0.001 Angstrom mertebesinde çok kısadır ve genellikle radyoaktif bir malzeme tarafından üretilen gama ışınları (Co-60 ve Ir-192 radyoizotopları), saha ayarlarında kaynakların incelenmesi için de kullanılır

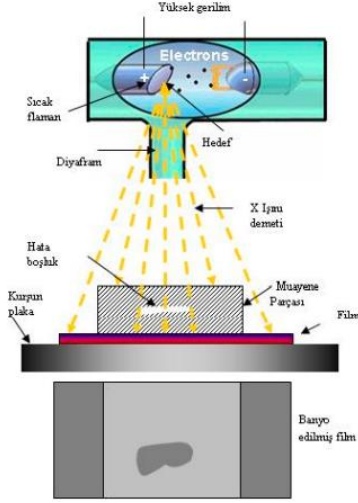
(Bhatia, 2023). Şekil 4 a) 'da X ışını ile yapılan muayene (Gönül, 2023) ve 4 b) 'de kullanılan cihaz gösterilmektedir.

Alüminyum parçalar için;

Seçilen gerilim: 120 keV

Seçilen akım değeri: 1,9 mA,

Hesaplanan poz süresi: 50 sn



a)



b)

Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. a) X ışını ile yapılan muayene b) Radyografik muayene cihazı

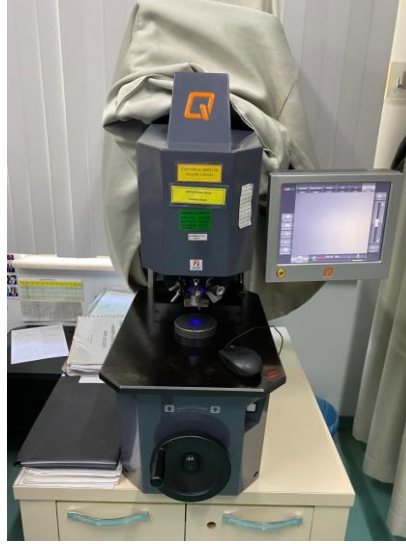
## 2.2 Tahribatlı Muayene Yöntemleri

Tahribatlı kaynak testi, adından da anlaşılacağı gibi sağlamlığını ve özelliklerini değerlendirmek için tamamlanmış bir kaynağın fiziksel olarak tahrip edilmesini içerir. Bu testler, esas olarak bir numunenin performansını veya malzemenin farklı yükler altındaki davranışını değerlendirmek için gerçekleştirilir. Bu testlerin gerçekleştirilmesi, daha fazla bilgi vermesi ve yorumlanması tahribatsız testlere göre çok daha kolaydır.

### 2.2.1 Sertlik testi

Malzemelerin aşınmaya, çizmeye veya kesilmeye karşı direnç gösterme yeteneği sertlik olarak bilinir. Malzemenin kalıcı deformasyona direnme özelliğidir. Kaynak sertlik testi, taşlanmış, parlatılmış veya parlatılmış ve dağlanmış bağlantı bölgesinin bir kesiti üzerinde yapılır. Kaynak merkez hattı, dolgu yüzeyi veya kök bölgeleri, ITAB ve ana metal üzerinde girintiler oluşturmak suretiyle yapılır.

Kaynaklarda Brinell, Rockwell, Vickers ve Knoop sertlik testleri, en basit ve kolay değerlendirilebilen mekanik özelliklerden biri olan sertliği belirlemek için kullanılabilir. Sertlik testinin türü, malzemenin sertliği, mukavemeti, kaynaklı bağlantının boyutuna göre değişir (Bhatia, 2023). Şekil 5'te, kullanılan Qness marka sertlik ölçüm cihazı verilmiştir.

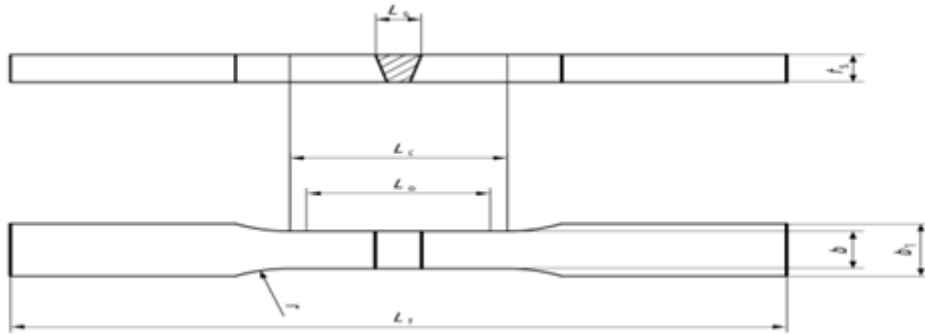


Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Qness marka sertlik ölçüm cihazı

### 2.2.2 Çekme deneyi

Çekme mukavemeti, bir metalin onu ayıran kuvvetlere dayanma kabiliyetini ifade eder. Enine çekme testi, enine çekme dayanımını, akma dayanımını, uzama gerilimini, statik yük altında bir alın bağlantı alanının azalmasını ölçmek için yapılır. Tasarımın büyük bir kısmı kaynaklı bağlantıdaki çekme özelliklerine dayandığından, ana metalin, kaynak metalinin, taban ile kaynak arasındaki bağın ve ısıdan etkilenen bölgenin çekme özelliklerinin tasarım gereksinimlerine uyması önemlidir. Nihai çekme mukavemeti, malzemelerin mekanik performanslarını belirlemede önemli bir yer tutar (Bhatia, 2023).

Kaynaklı parçaların çekme numuneleri TS EN ISO 4136 (Metalik malzemelerin kaynakları üzerinde tahribatlı deneyler - Enine çekme deneyi) standardına göre hazırlanmıştır. Deney Instron Marka cihaz ile yapılmıştır. Şekil 6'da çekme numunesinin temsili şekli ve Şekil 7'de Instron marka çekme test cihazı görülmektedir.



Şekil 6. Çekme numunesi temsili şekil

(Numune Ölçüleri:  $L_t = 200$  mm,  $b = 25$  mm,  $t_s = 4$  mm,  $L_c = 80$  mm)





Şekil 7. Instron marka çekme test cihazı

### 2.2.3 Makro inceleme

Bu yöntem, kaynaklı bağlantıdan küçük numunelerin çıkarılmasını gerektirir. Bu numuneler daha sonra zımparalanır, parlatılır ve kullanılan temel malzemeye bağlı olarak hafif bir asit karışımı kullanılarak dağlanır. Asitle aşındırma, kaynağın iç yapısının net görüntüsünü sağlar. Numunenin incelenmesi, nüfuz etme derinliğini ve füzyon eksikliği, yetersiz kök penetrasyonu, iç gözeneklilik ve kaynak ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesindeki çatlamanın kanıtlarını ortaya çıkarır (Bhatia, 2023).

### 2.2.4 Mikroyapı inceleme

Yöntem, çatlaklar, mikroskobik boyuttaki kalıntılar, tane sınırları, kaynak metalinin yapısı, ısıdan etkilenen bölge, kaynak metalindeki mikro bileşenlerin dağılımı gibi özellikleri incelemeye imkan sunar. Mikroyapı incelemeleri OLYMPUS marka optik mikroskop ile yapılmıştır. Bu yöntem malzemenin iç yapısını incelemek için uygulanmaktadır. Yöntemin aşamaları: numune alma, bakalitleme, zımparalama, parlatma, dağlama ve mikroskobik incelemedir. Numunenin alınacağı bölge tespit edildikten sonra kesici taş, testere vb. aletlerle numune kesilir. Kesme işlemi yaparken malzemede plastik deformasyona sebebiyet vermeyecek ve ısı girdisinin az olduğu bir yöntem seçilmelidir. Çünkü malzemenin orijinal iç yapısı da incelenecektir. Zımparalama işleminde 320, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama işleminden sonra numuneler çuha kaplı parlatma disklerinin üstüne alınır ve parlatma işlemi tamamlanır. Numunenin iç yapı özelliklerinin incelenmesi için dağlanması gerekmektedir. Bu işlem Keller (2ml HF, 3ml HCl, 5ml HNO<sub>3</sub>, 190 ml saf su) reaktifiyle yapılmıştır. Dağlama işlemi yaparken numuneyi dağlama çözeltisinde çok fazla bekletmemek gerekmektedir aksi halde kararına meydana gelmektedir. Şekil 8'de makroyapı inceleme cihazı ve optik mikroskop cihazı görülmektedir.



a)



b)

Şekil 1. a) Struers marka welding expert 5 makroyapı inceleme cihazı, b) Olympus marka optik mikroskop.

### 2.3. SEM-EDS Analizi

Uygun metalografik standartlarda hazırlanmış numunelerin kaynak dikişi ve ITAB bölgesinin mikro yapılarının incelenmesi ve yorumlanması için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mikroyapıların görüntülediği Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı Şekil 9'da görülmektedir. Ayrıca numuneler üzerindeki elementel kompozisyonu belirlemek için enerji dağılımlı spektrometre (EDS) analizi uygulanmıştır. EDS analizi SEM cihazı ile birlikte çalıştığı için, element kompozisyonu aynı cihaz üzerinden yapılmıştır.



Şekil 2. Joel marka JSM-6060LV model SEM cihazı

### 2.4. X-Işınları Analizi

MIG ve TIG kaynağı sonrasında yapıda oluşan fazların belirlenmesi için X-ışınları analizleri (XRD) yapılmıştır. Yapılan XRD analizinde, dalga boyu  $\lambda=1,54059$  nm olan  $\text{CuK}\alpha$  ışın demeti kullanılarak tarama açısı ( $2\theta$ ) 0 ile 90 ° aralığında olacak şekilde RIGAKU marka D/MAX/2200/PC model X-ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Şekil 10'da kullanılan XRD cihazının fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 3. X-ışınları difraksiyon analizi cihazı

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

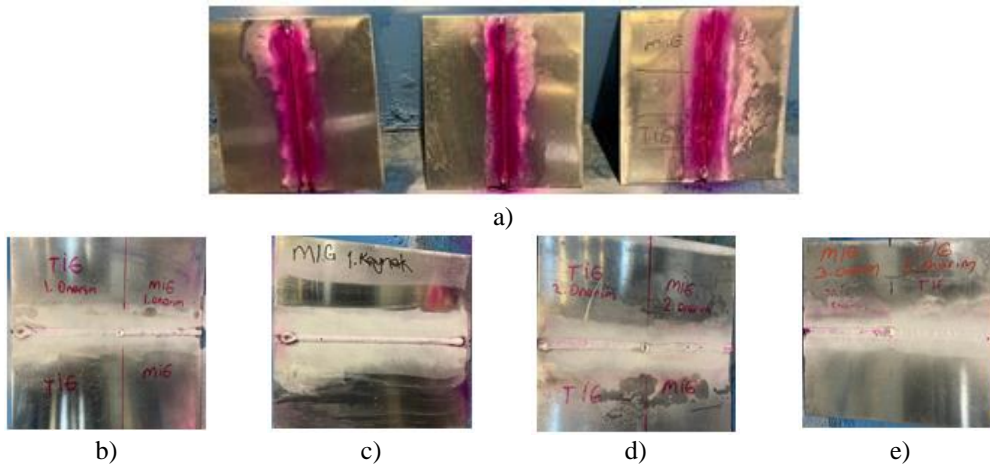
#### 3.1 Tahribatsız Testler

4 mm kalınlığındaki AA6061 T6 alüminyum plakalar alın kaynağıyla birleştirildikten sonra tamirat yapılmayan, MIG ve TIG kaynaklarıyla üçer defa tamir kaynağı yapılan numunelerin gözle muayenesi TS EN ISO 10042 standartına göre yapılmıştır. Kullanılan lazerli kaynak ölçüm cihazı ve merceği Şekil 11’de verilmiştir. Kaynaktan sonra olması gereken ölçü sınır değerleri standartta göre cihaza girilir ve cihaz kaynak dikişi üzerinde gezdirilir. Kabul kriterleri içerisinde kalan ölçüler şekilde görüldüğü gibi yeşil tonda, dışında kalan ölçüler ise kırmızı tonda belirtmektedir. Cihaz ekranında da görüldüğü gibi kep yüksekliği 2.3 mm, kep genişliği 9.9 mm ve yanma oluğu 0 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 11. Servo-Robot marka Wiki-Scan lazerli kaynak ölçüm cihazı ve merceği

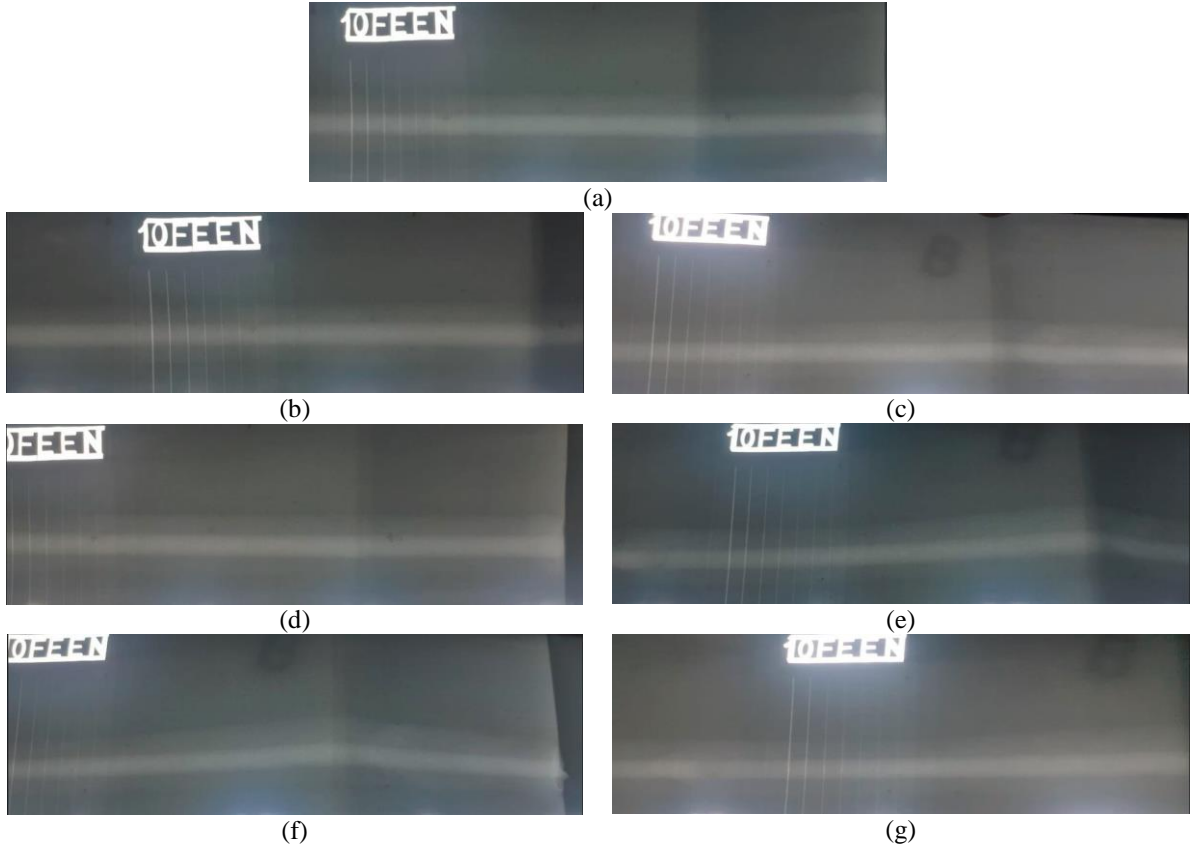
Kaynak yapılan parçaların sıvı penetrant muayenesi için kaynak ve ITAB bölgeleri MR 85 alkolle temizlenmiş ve yüzeylerine standartlara uygun MR 68 C penetrant sıvısı uygulanmıştır ve 10 dk. beklenilmiştir. Yüzeyde kalan penetrant su ve bez yardımıyla temizlendikten sonra MR 70 geliştirici uygulanmıştır. Şekil 12’de penetrant ve geliştirici uygulaması görülmektedir. Sonuçlar TSE EN ISO 23277 (Kaynakların tahribatsız muayenesi-Kaynakların penetrant muayenesi-Kabul seviyeleri) standartına göre değerlendirilmiştir. Kaynaklara uygulanan penetrant test (PT) sonucunda herhangi bir çatlaka rastlanmamıştır fakat gözenek oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 12. a) Penetrant uygulama b) 0.0 nolu tamirat yapılmayan, c) 1.1 ve 1.2 nolu 1. tamirler d) 2.1 ve 2.2 nolu 2. tamirler ve e) 3.1 ve 3.2 nolu 3. tamir yapılan parçaların PT sonuçlarına ait makro görüntüleri

Şekillerde de gözüktüğü gibi TIG kaynağıyla yapılan kaynaklar görsel olarak daha iyi gözükmetedir. MIG kaynağındaki gözenek oluşumu TIG kaynağına göre daha fazladır. Gözenekliliğin sebebi kaynak havuzunu terk etmeyen hidrojen kaynaklanmaktadır ve bu durum en yaygın görülen kaynak hatalarından biridir. MIG kaynağında tamirat sayısı arttıkça gözeneklerde de artış görülmüştür. TIG kaynağında ise durum değişmemiştir.

Kaynaklı numunelerin radyografik muayenesi için ICM SiteX model cihaz kullanılmıştır. TS EN ISO 17636-1 (Kaynak dikişlerinin tahribatsız muayenesi, Radyografik, muayene Bölüm 1: Filmler X ve gama ışını teknikleri) standartına göre muayene parametreleri belirlenmiştir. Radyografik muayene sonuçları Şekil 13'te verilmiştir.



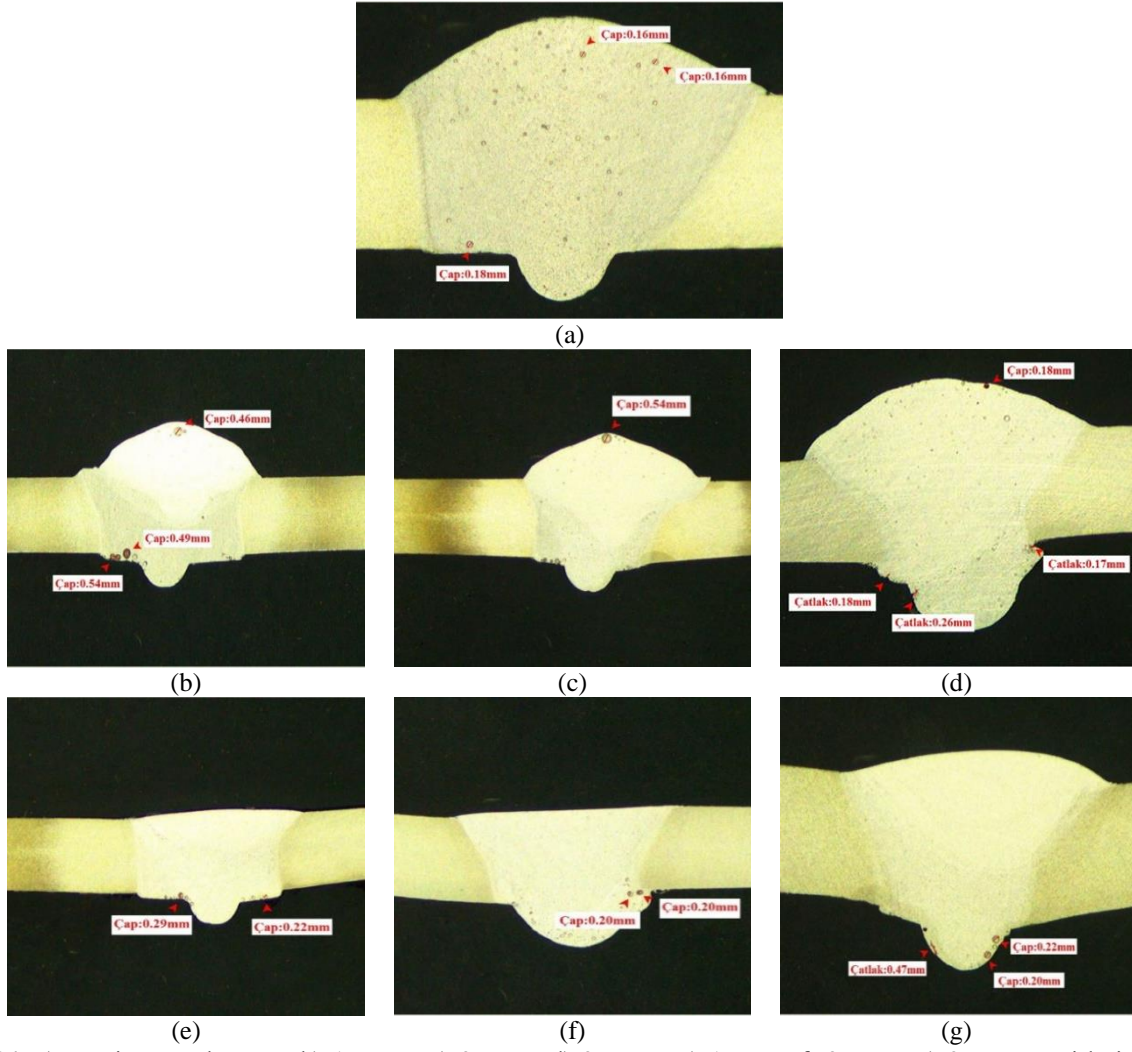
**Şekil 13.** a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG, c) 1. TIG tamirleri, d) 2. MIG, e) 2. TIG tamirleri, f) 3. MIG, g) 3. TIG tamirleri yapılan parçaların radyografik muayene görüntüleri

Radyografik muayene görüntülerinde TSE EN ISO 10675-2 standardına göre çatlak, ergime noksanlığı, yanma oluşu gibi herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

### 3.2 Tahribatlı Testler

Numune hazırlama işlemlerinden sonra makroyapı incelemeleri TS EN ISO 10042 (Kaynak-Aluminyum ve alaşımlarında ark kaynaklı birleştirmeler-düzgünsüzlükler için kalite seviyeleri)'ye göre değerlendirilmiştir. Kalite seviyesi C'ye göre tek gözenek çapının malzeme kalınlığının 0.3 katından fazla olmaması gerekmektedir. Tamiratsız ve tamir yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri Şekil 14'te verilmiştir.





**Şekil 14.** a) Tamirat yapılmayan, b) 1. MIG, c) 2. MIG d) 3. MIG, e) 1. TIG, f) 2. TIG, g) 3. TIG tamirleri yapılan numunelere ait makroyapı görüntüleri

Kaynak işlemi ve sonrasında tamirat kaynakları yapılan numunelerin makro görüntüleri Şekil 14'te, 0.0 nolu ilk uygulanan MIG kaynağı sonrası alınan makroyapı görüntüleri Şekil 14 a'da görülmektedir. Kaynak uygulanan levhanın kalınlığı 4mm'dir. Kaynak bölgesinde hidrojen gazı kaynaklı gözenekler bulunmakta olup bu durum yaygın bir kaynak hatasıdır. Alınan makro görüntülere göre 0.16-0.18 mm çaplarında gözeneklerin mevcut olduğu tespit edilmiştir. İlk kaynak işleminden sonra yüzey taşlanmış ve birinci MIG kaynağı onarımı yapılmıştır. Onarım sonrası alınan makroyapı görüntüleri Şekil 14 b'de verilmiştir. Yapılan MIG tamiratına bakılarak ITAB içerisindeki gözenek boyutlarının 0.46-0.54 mm arasında olduğu gözlemlenmiştir. Gözenekliliğin nedeninin, katılaştıran kaynak metali havuzundaki hidrojen gazının varlığı, nem ve kaynak öncesi temizliğin yeterince yapılmaması olduğu düşünülmektedir. İlk kaynak işleminden sonra yüzeyi taşlanan numuneye birinci TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve 0.22-0.29 mm çaplarında değişim gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 14c). Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların da başladığı görülmüştür. Birinci kaynak tamir işlemlerinden sonra tamirat yapılan kaynaklar taşlanarak ikinci kaynak tamir işlemine hazırlanmış ve hazırlanan numuneye MIG kaynağı ile ikinci tamirata yapılmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kepinde ve kökünde devam ettiği ve en büyük gözenek boyutunun 0.54 mm çapında olduğu görülmüştür (Şekil 14d). Birinci kaynak tamir işlemlerinden sonra yüzeyi taşlanan numuneye ikinci TIG kaynağı tamirata uygulanmıştır. Gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve en büyük

gözenek boyutunun 0.2 mm çapında olduğu tespit edilmiştir (Şekil 14e). Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların daha da arttığı görülmüştür. İkinci kaynak tamir işlemlerinden sonra tamirat yapılan kaynaklar taşlanarak üçüncü kaynak tamir işlemine hazırlanmıştır. Üçüncü MIG tamiratından sonra gözeneklenmelerin kaynak kepinde ve kökünde devam ettiği ve en büyük gözenek boyutunun 0.18 mm çapında olduğu görülmüştür. (Şekil 14f). Üçüncü TIG kaynağı tamiratından sonra gözeneklenmelerin kaynak kökünde toplandığı ve en büyük gözenek boyutunun 0.22 mm çapında olduğu tespit edilmiştir. Artan ısı girdisi sebebiyle malzemede burulmaların daha da arttığı görülmüştür (Şekil 14g). Üçüncü kaynak tamiratlarından sonra artan termal gerilmelerin de etkisiyle kaynak kök bölgesinde kılcal çatlaklar gözlemlenmiştir.

MIG kaynağı sonrası ve MIG ve TIG tamirat işlemlerinden sonra yapılan çekme testi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir. TS EN ISO 15614-2 numaralı standarta göre kaynak yapılmış 6000 serisi alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma sonucunda elde edilen çekme mukavemet değeri ana malzemenin minimum çekme mukavemet değerinin 0.6 katının, suni yaşlandırmada ise 0.7 katının altında olmamalıdır.

**Tablo 7.** MIG kaynağı ile tamiratsız ve MIG ve TIG ile üç kez tamirat yapılan numunelerin çekme testi sonuçları

Kod	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Yük (N)	Alan Daralması (%)	Hesaplanmış Uzama (%)
<b>MIG</b>					
0.0	139.1674	203.3048	17890.8223	32.5392	8.057
1.1	132.8321	196.0877	17255.7148	45.4800	8.226
2.1	134.6181	181.0924	15936.1348	46.6392	8.547
3.1	106.2336	180.2296	15684.2070	33.3663	9.811
<b>TIG</b>					
1.2	124.3719	186.1235	16378.8672	43.9273	8.868
2.2	125.4717	179.4365	15702.4160	50.1477	9.698
3.2	91.82285	175.1522	15413.3974	33.4095	9.796

Çekme testi sonuçlarından da anlaşılacağı üzere her iki kaynak yönteminde de tamirat sayısı arttıkça malzemenin akma ve çekme gerilmelerinde azalmalar görülmüştür. Üçüncü kaynak tamirinde bu değerler gözle görülür bir şekilde azalmıştır. Artan ısı girdisi ve termal gerilmelerin de malzemenin dayanımını azalttığını göstermektedir. Ana malzemenin çekme mukavemetinin 260-310 MPa olduğu bilinmektedir. Elde edilen test sonuçlarına göre en düşük çekme mukavemetinin 3. TIG kaynak tamiri sonucunda 175.15 MPa olduğu saptanmıştır. MIG kaynağı sonucu elde edilen çekme değerleri TIG kaynağına göre daha yüksek çıkmıştır. TIG kaynağındaki ısı girdisinin daha fazla olmasından ötürü bu durum ortaya çıkmıştır. Isı girdileri MIG kaynağında 214 J/mm, TIG kaynağında ise 285 J/mm civarında hesaplanmıştır. Isı girdisi hesaplama formülü (Denklem 3.1) şu şekilde ifade edilir:

$$Q = k (VxI)/w \quad (3.1)$$

Q: Isı girdisi (j/mm)

k: enerji verimlilik faktörü (0.7)

V: Kaynak gerilimi (volt)

I: Akım (amper)

w: Kaynak hızı (mm/sn)

Vickers sertlik ölçümleri; tamiratsız ve MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile 1.,2. ve 3. tamiri yapılan tüm numunelerde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ortalama Vickers (HV 0.5) sertlik değerleri Tablo 8’de görülmektedir.

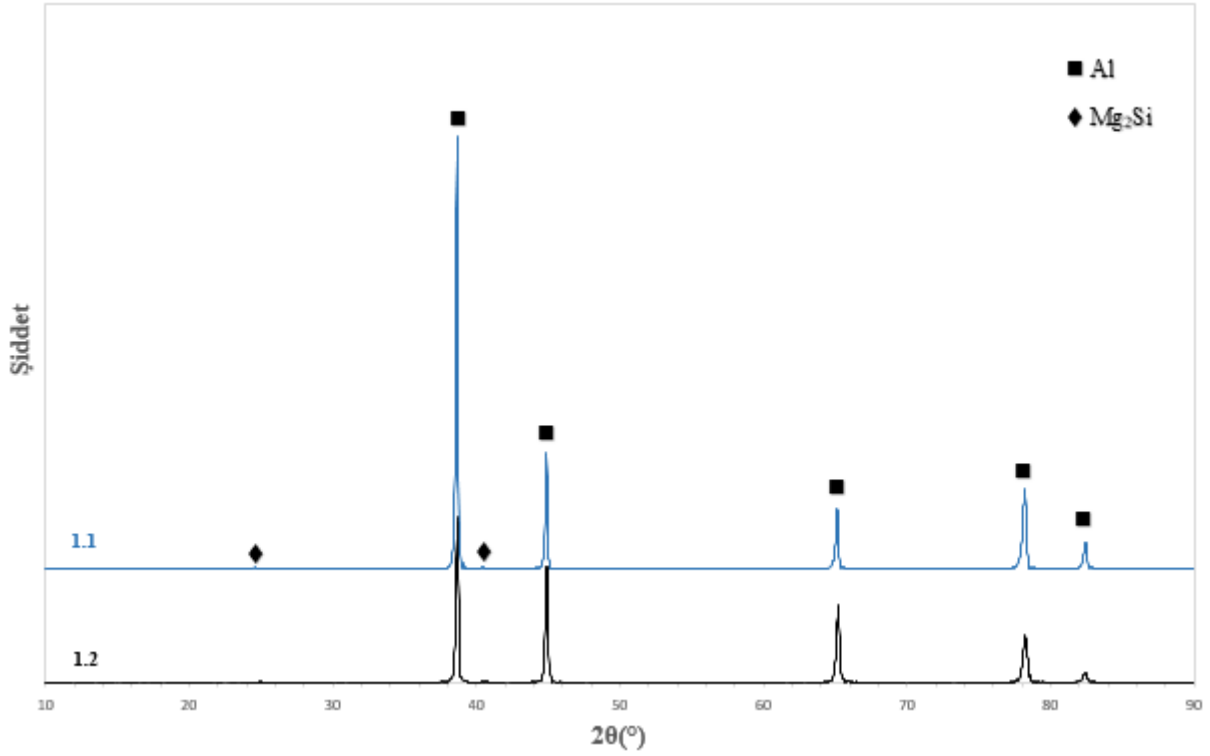
**Tablo 8.** Kaynak ve tamiri yapılan numunelerin ortalama Vickers sertlik değerleri

	0.0	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
<b>Ana malzeme</b>	87,2	86,5	84,9	87	84,7	85,5	86,5
<b>ITAB</b>	70,5	68,5	68,4	68,9	67,5	65,4	65,4
<b>Kaynak</b>	73,2	73,4	71,2	72,6	72,5	73,2	69,3

Sertlik ölçümü sonuçlarına göre en yüksek değeri ana metalde, daha sonra kaynak bölgesinde ve en düşük değerleri de ITAB bölgesinde olduğu görülmektedir. En fazla ısı girdisi ITAB bölgesinde olduğundan dayanım azalmış ve en düşük sertlik değerleri de burda görülmüştür. TIG kaynağındaki ısı girdisi daha fazladır ve buna bağlı olarak dayanım ve sertlik değerleri MIG kaynağına göre daha düşüktür.

### 3.3 XRD Analizleri

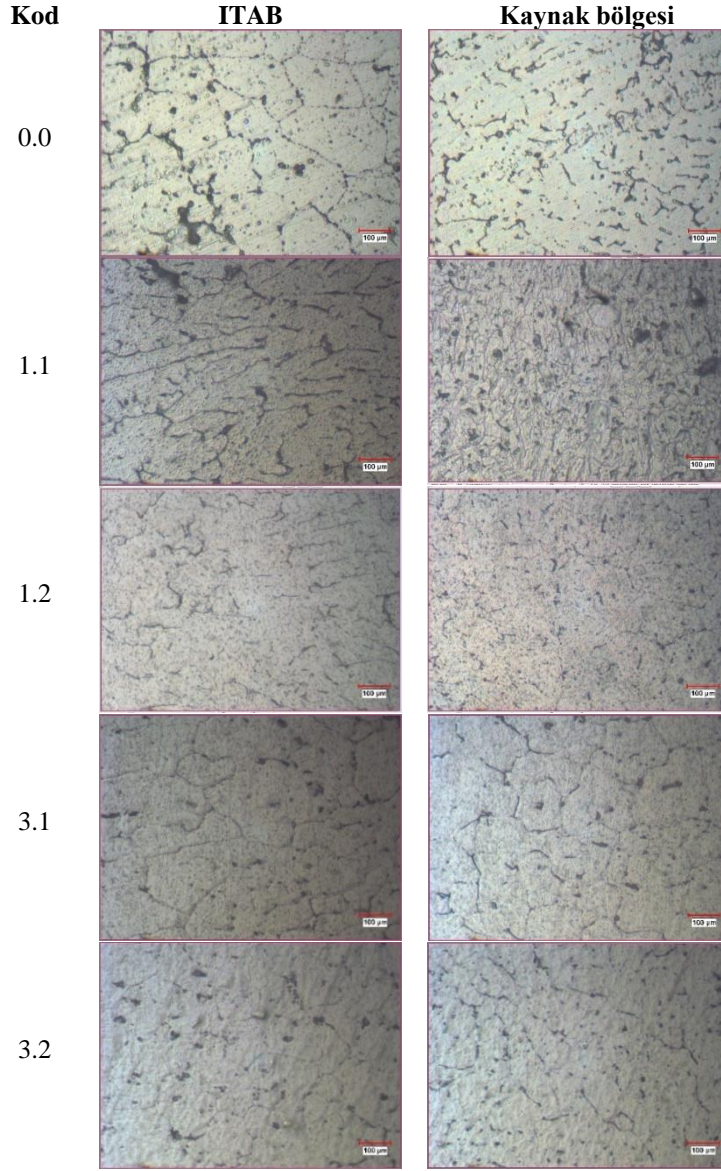
1.1 (1.MIG kaynak tamiri) ve 1.2 (1.TIG kaynak tamiri) kodlu numunelerin XRD analizleri Şekil 15'te verilmiştir.

**Şekil 15.** 1.1 ve 1.2 kodlu 1. MIG-TIG kaynak numunelerine ait XRD analizi

XRD sonuçlarında da alüminyum pikleri ile birlikte,  $Mg_2Si$  fazının ise düşük şiddette bir pik verdiği gözlemlenmiştir. XRD analizinde yapıda herhangi oksitli bir bileşiğe rastlanmamıştır.

### 3.4 Mikroyapı Analizleri

0.0, 1.1, 1.2, 3.1, 3.2 kodlu numunelerin ITAB ve kaynak bölgesinden alınan optik mikroyapı görüntüleri Şekil 16'da verilmiştir.

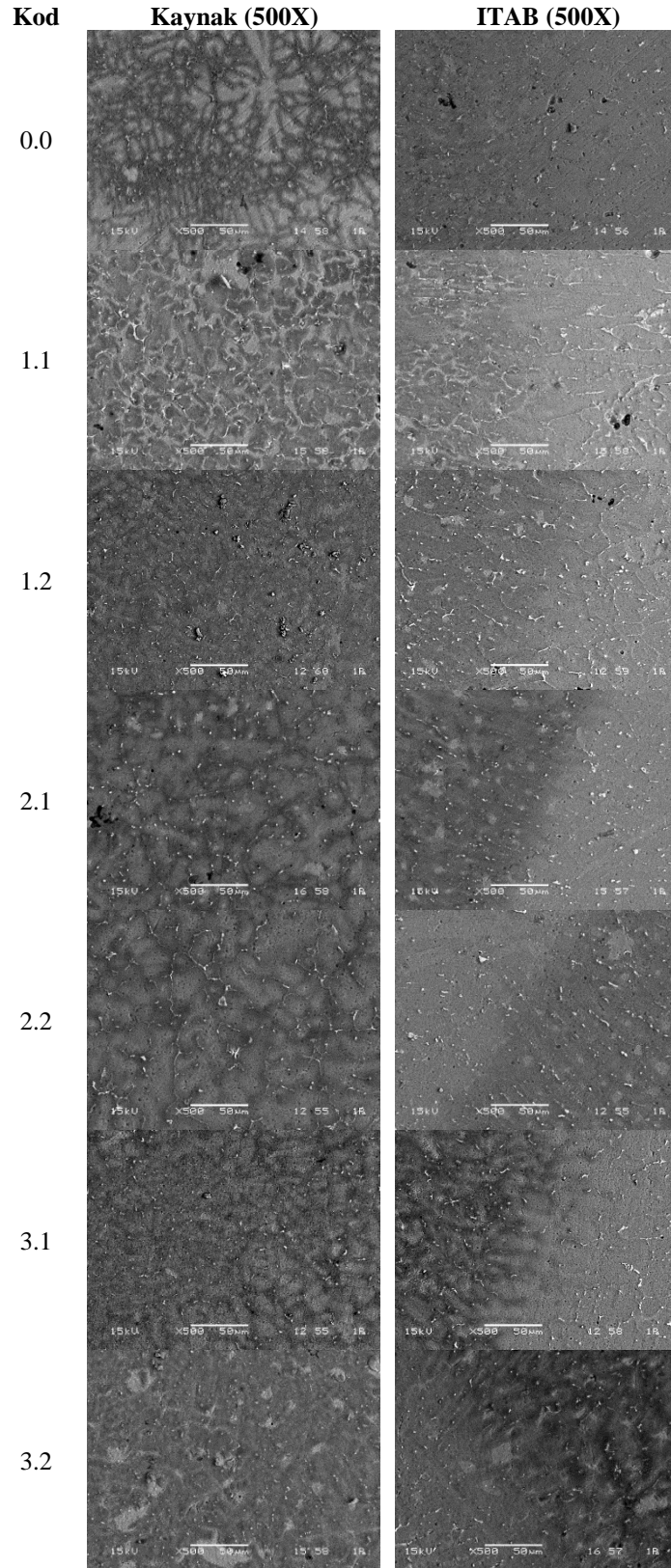


**Şekil 16.** Kaynak tamiri yapılmamış MIG kaynağının ve MIG ve TIG kaynaklarıyla 1. ve 3. tamiraty yapılmış numunelerin ITAB ve kaynak bölgelerinden alınan 50X büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

Koyu siyah parçacıklar  $Mg_2Si$  taneciklerini temsil etmektedir. Mg hem ana malzemede hem de ER5356 kodlu dolgu metalinde mevcut olup XRD analizleri ile varlığı tespit edilmiştir. Tamirat sayısı ve ısı girdisi arttıkça tane boyutlarındaki artış ile birlikte ITAB bölgesindeki tanelerde irileşme görülmektedir. Birinci ve üçüncü tamirat sonrası ITAB bölgelerindeki tane boyutu farkı açıkça görülmektedir.

Kaynak ve ITAB bölgesine ait SEM görüntüleri Şekil 17’de verilmiştir. SEM görüntülerine baktığımızda tamirat sayısı arttıkça yapıda özellikle ITAB bölgesinde ısı girdisinin etkisiyle tane boyutunda irileşme dikkat çekmektedir. Kaynak bölgesinde ise gözle görünür bir değişiklik olmadığı belirtilebilir.



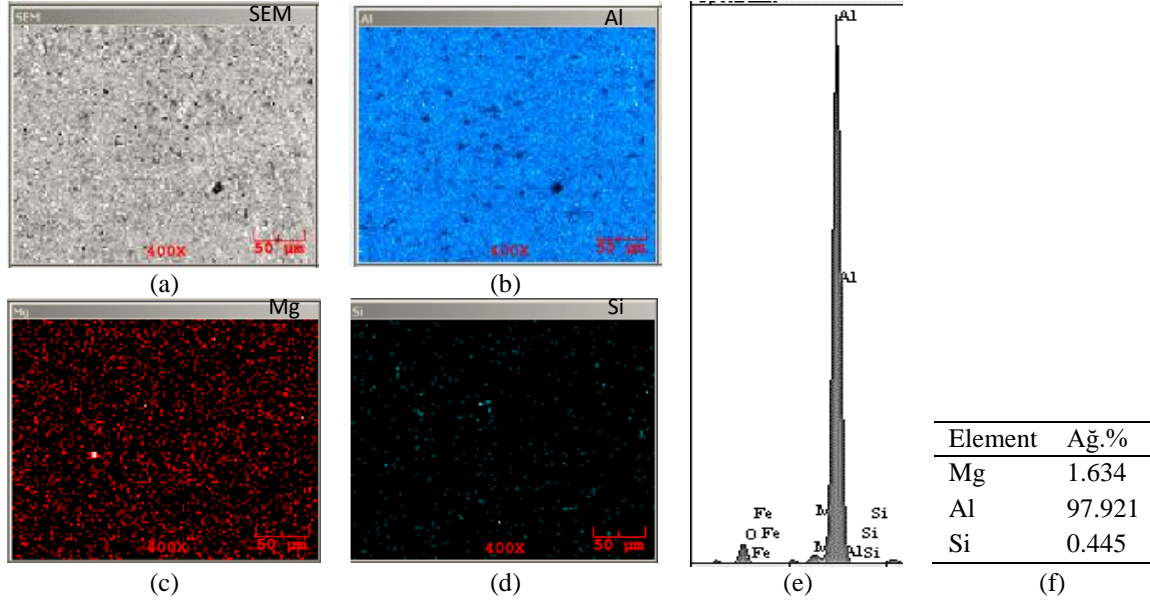


Şekil 17. Kaynak tamiri yapılmamış MIG kaynağının ve MIG ve TIG kaynaklarıyla 3 kez tamirata yapılmış numunelerin ITAB ve kaynak bölgelerinden alınan 500X büyütmedeki SEM görüntüleri

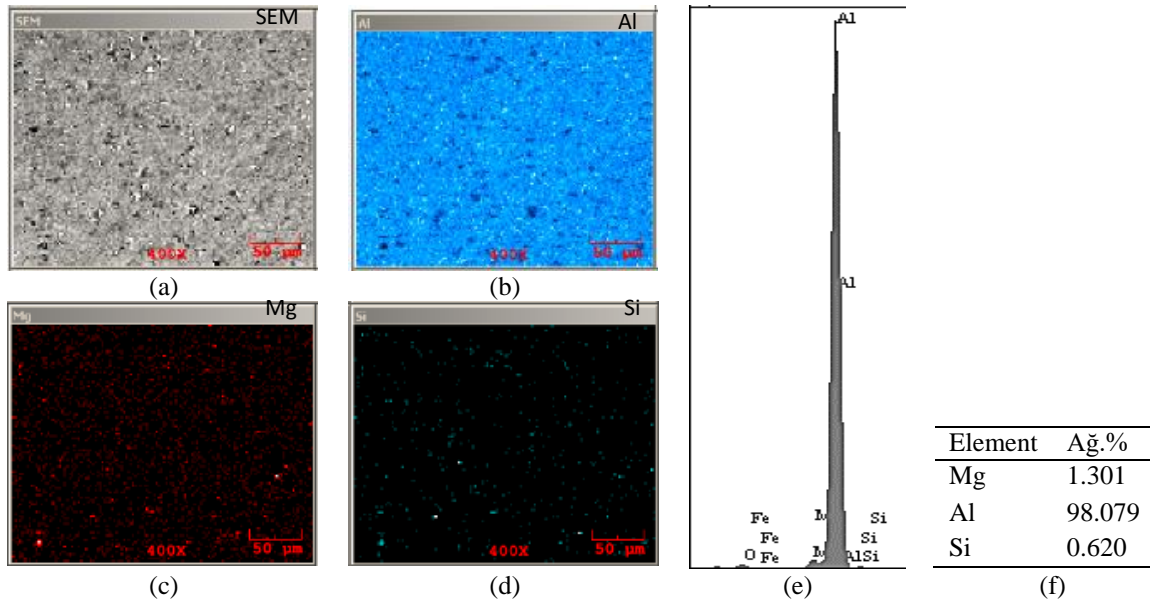
### 3.5 SEM-EDS Analizleri

0.0, 1.1, 1.2, 3.1, 3.2 kodlu numunelerin ITAB bölgelerindeki element dağılımını belirlemek için genel EDS analizleri yapılmış, Şekil 18’de tamirat yapılmayan 0.0 kodlu numunenin EDS analizi

ve elemental haritalaması (mapping) Şekil 19’da birinci MIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin, Şekil 20’de birinci TIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin, Şekil 21’de üçüncü MIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin ve Şekil 22’de üçüncü TIG kaynağı tamiratu yapılan numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması verilmiştir.

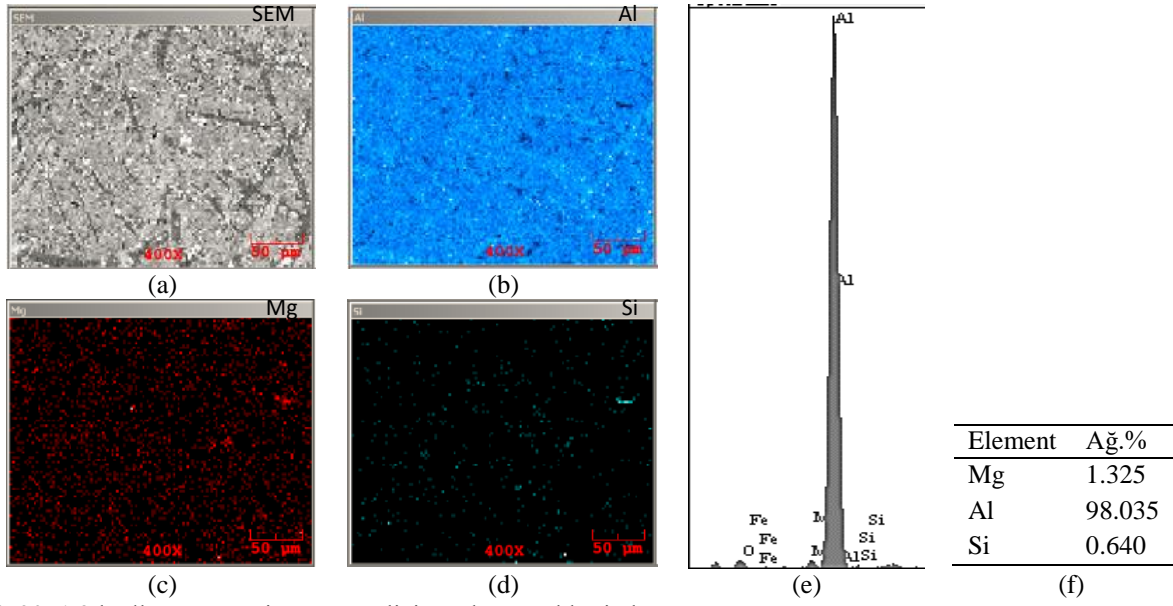


Şekil 18. 0.0 kodlu numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması



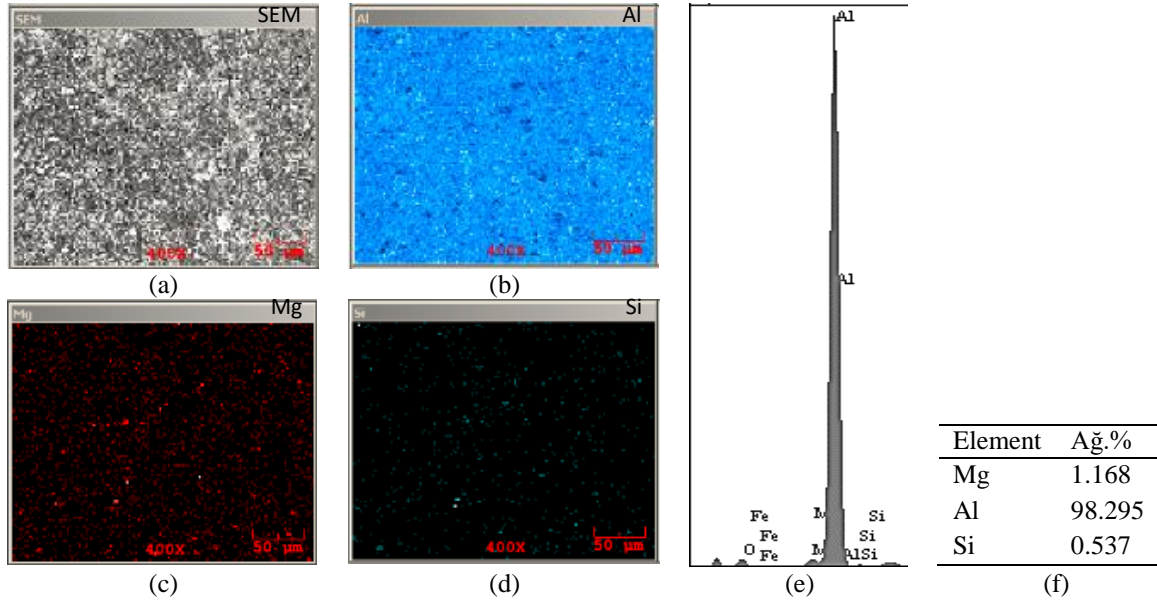
Şekil 19. 1.1 kodlu numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması

Birinci MIG kaynağı tamiratındaki elemental dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg’nin tamirat yapılmayan numuneye göre azaldığı görülmektedir.



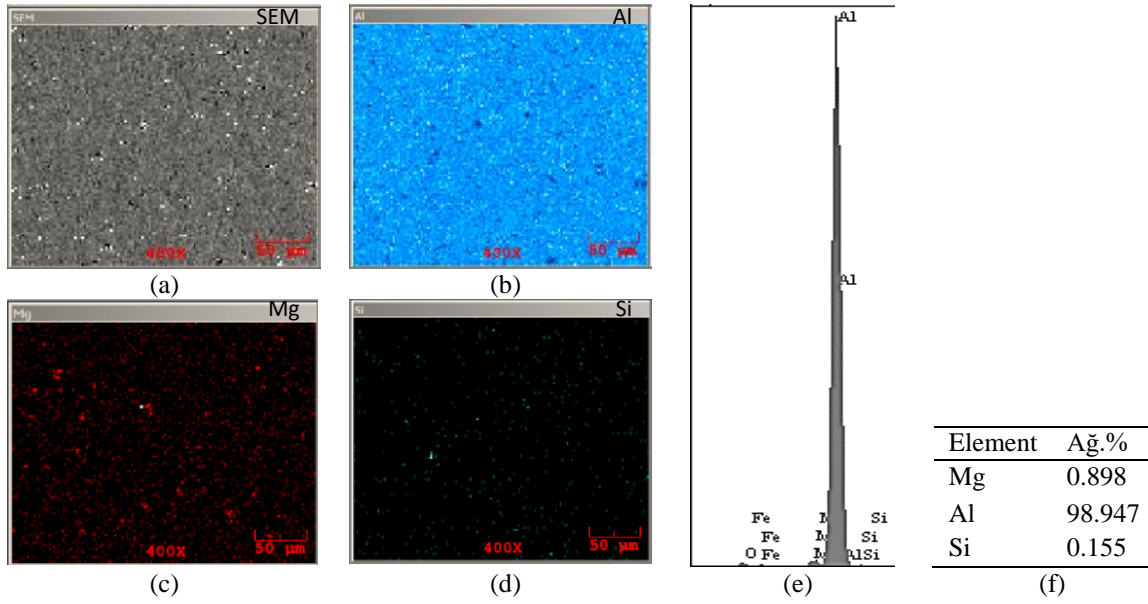
Şekil 20. 1.2 kodlu numunenin EDS analizi ve elementel haritalaması

Birinci TIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg'nin kaynak tamiratu yapılmayan numuneye göre azaldığı görülmektedir.



Şekil 21. 3.1 kodlu numunenin EDS analizi ve elementel haritalaması

Üçüncü MIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg'nin artan ısı girdisiyle beraber birinci MIG kaynağı tamiratına göre azaldığı görülmektedir. Artan ısı girdisinin  $Mg_2Si$  çökeltilerinin çözünmesine neden olduğu düşünülmektedir. Üçüncü TIG kaynağı tamiratındaki elementel dağılıma göre, mukavemet artırıcı Mg'nin artan ısı girdisiyle beraber birinci TIG kaynağı tamiratına göre daha da azaldığı görülmektedir. TIG kaynağı tamiratında ısı girdisi MIG kaynağına göre daha fazla olduğundan Mg'nin TIG kaynağında daha fazla çözülmeye uğradığı tespit edilmiştir. Bu durum çekme mukavemetlerinde değişimle benzerlik göstermektedir.



Şekil 22. 3.2 kodlu numunenin EDS analizi ve elemental haritalaması

#### 4. SONUÇ

4mm kalınlığındaki 6061 serisi alüminyum levhalar MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. MIG kaynak yapılmış numuneler taşlanarak 1., 2., ve 3. tamirat şeklinde hem MIG hem de TIG kaynağı ile onarımları gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tahribatsız testleri, makroyapı-mikroyapı incelemeleri, mekanik testleri, XRD ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Gözle muayene sonuçlarına göre kaynakta herhangi bir probleme rastlanmamıştır. Kaynak kep ve kök yükseklikleri kabul seviyesindedir. Kaynak işleminin yerine göre mukavemetli değil de görsel olarak da kabul görmesi istenilen yerlerde TIG kaynağı bir adım öne geçmektedir. Penetrant muayene sonuçlarına göre MIG kaynağında tamirat sayısı arttıkça kaynak yüzeyindeki gözeneklenmenin de arttığı görülmüştür. Radyografik muayene sonuçlarına göre kaynak dikişlerinde herhangi bir süreksizliğe rastlanmamıştır.

- Makro inceleme sonuçlarında gözeneklenmenin daha çok kök bölgesinde olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin kaynak öncesi temizlik işleminin yeteri kadar yapılmamasıdır. Yapılan tamiratlarda gözenek dağılımı ve boyutları kabul kriterlerinin içinde değerlendirilmiştir.

- Mikroyapı görüntülerinde görülen koyu siyah parçacıklar  $Mg_2Si$  taneciklerini temsil etmektedir. Dolgu metal ER5356 olduğundan kaynak yapısının içinde de  $Mg_2Si$  tanecikleri mevcuttur. Isı girdisi arttıkça tane boyutlarında da artış görülmüştür. Tamir sayısı arttıkça ITAB bölgesindeki tanelerde irileşme görülmektedir ve buna bağlı olarak dayanım azalmıştır.

- Ambriz ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada, gaz metal ark kaynağının 6061-T6 üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tipik olarak, ısı girdisi ne kadar yüksek olursa, ITAB'ın mekanik özellikleri o kadar düşük olmaktadır sonucuna varmışlardır (Ambriz ve ark., 2009). Uygulanan tamir işlemleri ve mekanik mukavemet testleri doğrultusunda malzemeye tamir işlemi uygulandıkça çekme mukavemetlerinde düşüş görülmüştür. Tablo 7'de kaynak tamiratyyla birlikte akma ve çekme mukavemet değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca tablolardaki veriler incelendiğinde yapılan tamiratlarda MIG kaynağının çekme mukavemetinin TIG kaynağının çekme mukavemetinden daha fazla olduğu görülmüştür. MIG kaynağında en düşük çekme muavemeti 180 MPa, TIG kaynağında ise 175 MPa olarak ölçülmüştür. 3.TIG kaynak tamiri sonucunda çekme mukavemet değeri suni yaşlandırılmış malzeme için kabul kriterlerinin dışına çıkmıştır. Çekme deneyinde bütün kopmalar

ITAB bölgesinde gerçekleşmiştir. 6061 T6 alüminyum alaşımının kaynağında, ısıdan etkilenen bölgelerde mukavemet arttırıcı ( $Mg_2Si$ ) çökeltilerinin çözünmesinin mekanik özelliklerde düşüşe yol açtığı düşünülmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalara benzerlik göstermektedir.

- Isı girdileri MIG kaynağında 214 J/mm, TIG kaynağında ise 285 J/mm civarında hesaplanmıştır. Isı girdisinin daha fazla olmasından ötürü TIG kaynağı ile yapılan tamiratlardan sonra malzemede daha fazla yamulma (distorsiyon, çarpılma) gözlemlenmiştir.

- Sertlik deneyi sonuçlarına göre en yüksek sertlik değerinin ana malzemede, daha sonra kaynak bölgesinde ve en düşük değer de ITAB bölgesinde olduğu görülmüştür. V. Malin tarafından yapılan çalışmada ısıdan etkilenen bölgedeki sertlik değerlerinin ana malzemenin yaklaşık %70'i olduğu gösterilmiştir (Malin, 1995). Mevcut çalışmada ise bu oran birinci MIG kaynağı tamiratında % 82 iken üçüncü MIG tamirinde % 78, üçüncü TIG tamirinde % 76 olarak belirlenmiştir.

- XRD sonuçlarında da alüminyum pikleri ile birlikte  $Mg_2Si$  fazının varlığı tespit edilmiştir. Hirose ve arkadaşları kaynak sırasında, yüksek ısı girdisinin dalgalanması ITAB'da çökeltilerin çözünmesine neden olmaktadır sonucuna varmışlardır (Hirose ve ark., 1999). Mevcut çalışmada da artan ısı girdisiyle  $Mg_2Si$  miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

- ITAB bölgelerinden alınan EDS analizi ve haritalama sonuçlarına göre artan tamirat sayısı ve ısı girdisiyle paralel olarak Mg miktarında düşüş görülmüştür. Çekme dayanımlarının da bu durumla ilişkili olarak azaldığı düşünülmektedir.

## 5. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 6. YAZAR KATKISI

Mustafa ARSLAN ve Nil TOPLAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelenmesi ve son onay ve tam sorumluluk kısmında katkıda bulunmuştur.

## 7. KAYNAKLAR

- Akman A.B., Raylı Sistem Araçları İmalatında Kullanılan 6061 ve 5083 Alaşımının TIG ve MIG Kaynaklarının Tahribatlı ve Tahribatsız Muayene Yöntemleriyle Karşılaştırılması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2018.
- Ambriz R.R., Barrera G., Garcia R., Lopez V.H., A Comparative Study of the Mechanical Properties of 6061-T6 GMA Welds Obtained by the Indirect Electric Arc (IEA) and the Modified Indirect Electric Arc (MIEA). *Materials and Design* 30 (7), 2446-2453, 2009.
- Bhatia A., Introduction to Welding and NonDestructive Testing (NDT), [https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Welding%20&%20Non-Destructive%20Testing%20\(NDT\)%20-%20R1.pdf/](https://www.cedengineering.com/userfiles/Introduction%20to%20Welding%20&%20Non-Destructive%20Testing%20(NDT)%20-%20R1.pdf/) (Erişim Tarihi: 07.03.2023).
- Çüngür R., Kaynaklı ve Kaynaksız 5754 Alüminyum Alaşımının Korozif Ortamlardaki Çekme Davranışı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2021.



- Debeski M.A.M., The Effect of Different Additional Wires on the Microstructure and Mechanical Properties of AISI 304L and AISI 430 Stainless Steels Combined with TIG Welding, Karabük University Graduate School of Natural and Applied Science, Master Thesis (Printed), 2017.
- Gönül E., Kaynaklı İmalatta Tahribatsız Muayene Ve Tahribatsız Muayene Metotları, [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/NDT%20METHODS%20FOR%20WELDING\\_Rev02.pdf/](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/users/zeynep/NDT%20METHODS%20FOR%20WELDING_Rev02.pdf/) (Erişim Tarihi: 07.03.2023).
- Hirose A., Kurosawa N., Kobayashi K.F., Todaka H., Yamaoka H., Quantitative Evaluation of Softened Regions in Weld Heat-Affected Zones of 6061-T6 Aluminum Alloy-Characterizing of the Laser Beam Welding Process. *Metallurgical and Materials Transactions A* 30, 2115-2120, 1999.
- Kamat S.K., Kumar A., An Experimental Investigation of Mechanical Properties of Al 6106 T6 Alloy Joined by Friction Stir Welding and TIG Welding. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology* 3 (1), 246–253, 2013.
- Khafaji L.A., The Effect of Welding Methods in the Weldment Design on the Distortions, Hardness and Stresses Generation of Steel Type S355J2C+N, Türk Hava Kurumu University Graduate School of Natural and Applied Science, Doctoral Thesis (Printed), 2020.
- Kocaman A.G., Demirer A., AA6061 T6 Alüminyum Alaşımında Bilyeli Dövme İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi* 4 (2), 49-58, 2021.
- Kumar P., Arif A., Prasad A.C.V.S., Danaiah P., Singh A.K., Patro M., Kishore K.S., Murugan M., Study of Welding Process Parameter in TIG Joining of Aluminum Alloy (6061). *Materials Today: Proceedings* 47 (13), 4020-4025, 2021.
- Malin V., Study of Metallurgical Phenomena in the HAZ of 6061-T6 Aluminum Welded Joints. *Welding Journal* 305-318, 1995.
- Okay S., Investigation of Mechanical Property Changes After MIG Welding of (7XXX) Series Aluminum Alloys, Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master Thesis (Printed), 2016.
- Prakash J., Tewari S.P., Srivastava B.K., Shielding Gas For Welding of Aluminium Alloys by TIG/MIG Welding A Review. *International Journal of Modern Engineering Research* 1 (2), 690-699, 2012.
- Singh L., Singh R., Singh N.K., Singh D., Singh P., An Evaluation of TIG Welding Parametric Influence on Tensile Strength of 5083 Aluminium Alloy. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering* 7 (11), 1262–1265, 2013.
- Withers P.J., Residual Stress and Its Role in Failure. *Reports on Progress in Physics* 70, 2211-2264, 2007.