



## Joining AlSi10Mg plates produced by additive manufacturing with MIG method and optimization of welding parameters

Cemil Işlak<sup>1,2\*</sup>, Gonca Ünal<sup>1</sup>, Gürkan Yılmazoğlu<sup>1</sup>, Uğur Üzel<sup>1</sup>, Rafet Durgut<sup>3</sup>, Agah Uğuz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOFAŞ R&D, Yeni Yalova Yolu Cad., Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye

<sup>3</sup>Department of Computer Engineering, Bandırma Onyedi Eylül University, Bandırma, Türkiye

### Highlights:

- MIG welding joining of 3D AlSi10Mg plates
- Taguchi optimization of MIG parameters
- Microstructural and mechanical evaluation of base metal, weld zone and heat affected zone in 3D AlSi10Mg

### Keywords:

- Additive Manufacturing
- AlSi10Mg
- MIG
- Taguchi
- Parameter optimization

### Article Info:

Research Article

Received: 25.12.2023

Accepted: 05.05.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1408943

### Acknowledgement:

This research was carried out with the help of TÜBİTAK 2244 industry doctoral program (project 118C083). The first author would like to thank TÜBİTAK, where he received a scholarship. The authors would also like to thank TOFAŞ A.Ş., which provided financial support and testing facilities to this project together with TÜBİTAK.

### Correspondence:

Author: Cemil Işlak

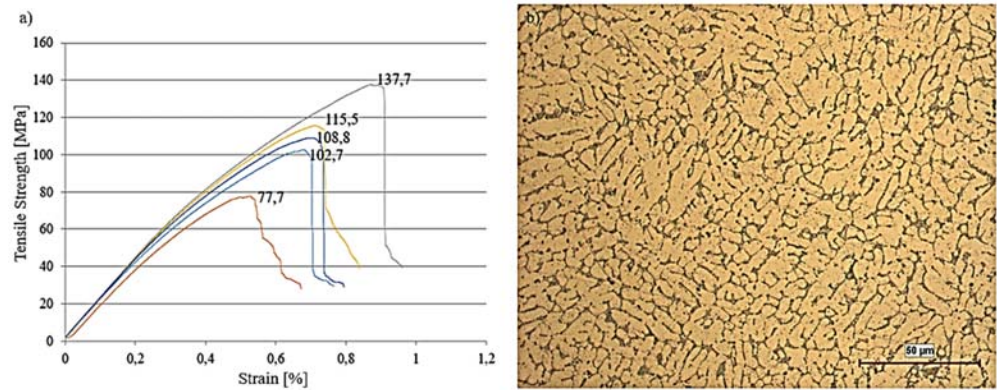
e-mail:

cemil.isilak@tofas.com.tr

phone: +90 507 371 7658

### Graphical/Tabular Abstract

This study focuses on investigating the weldability of AlSi10Mg SLM (Selective laser melting) plates with the MIG (Metal Inert Gas) method and then optimizing the changeable (Voltage, current and welding filler) welding parameters to improve the hardness and tensile strength properties of the weld zone. Summary of the workflow carried out in this study is shown in Figure A.



**Figure A.** Samples with optimized welding parameters a) Tensile strength graphs of five welded samples with tensile strength optimization b) Optical image showing the grain structure of the optimized hardness sample welding zone

### Purpose:

Effects of changeable MIG parameters on microstructure and mechanical properties were investigated in order to observe the suitable welding parameter ranges for an additive manufactured AlSi10Mg alloy.

### Theory and Methods:

Plates of AlSi10Mg were MIG welded with lap joint. Taguchi design of experiment was used in the experiments. ANOVA analyses also were performed to determine the effect of parameters on performance characteristics. Microhardness and tensile strength tests and microstructural investigation via SEM (Scanning electron microscopy) were performed to examine the weld metal and HAZ (Heat affected zone).

### Results:

Highest hardness values were achieved with the 5356 (AlMg5) filler when compared with 4047 (AlSi12) and 4043 (AlSi5) fillers. On the other hand, it is observed that choosing the 4047 filler gives notable better tensile strength results. When the ANOVA results are examined, the factor that significantly contributes the most to the result for both optimizations (Hardness and tensile strength) is the weld filler parameter.

### Conclusion:

4047 filler material, which offers both the best tensile strength performance and acceptable weld zone hardness with its relatively easy accessibility on the market. It can be concluded from this study that the most suitable filler material to be used in MIG welding of thin AlSi10Mg materials produced by additive manufacturing.



## Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg plakalarının MIG yöntemiyle birleştirilmesi ve kaynak parametrelerinin optimizasyonu

Cemil Işlak<sup>1,2\*</sup>, Gonca Ünal<sup>1</sup>, Gürkan Yılmazoğlu<sup>1</sup>, Uğur Üzel<sup>1</sup>, Rafet Durgut<sup>3</sup>, Agah Uğuz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TOFAŞ ARGE, Yeni Yalova Yolu Cad., Bursa, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

<sup>3</sup>Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bandırma, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- 3D AlSi10Mg plakaların MIG kaynakla birleştirilmesi
- MIG parametrelerinin Taguchi optimizasyonu
- 3D AlSi10Mg alaşımının kaynak uygulamasında meydana gelen mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 25.12.2023

Kabul: 05.05.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1408943

### Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat yöntemi,  
AlSi10Mg, MIG,  
taguchi,  
optimizasyon

### ÖZ

Eklemeli imalat yöntemi, hızlı prototipleme, tasarım esnekliği ve özgün parça üretimi gibi bir dizi avantaj sunmaktadır. Ancak, geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında, üretim hacmi sınırlıdır. Bu nedenle, geniş hacimli üretim taleplerini karşılamak için eklemeli imalat yöntemi, geleneksel yöntemler kadar etkili değildir. Bu dezavantajı gidermek amacıyla bilim insanları, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçaların birleştirilmesi üzerine araştırmalar yürütmektedir. Bu çalışma, SLM (Selective Laser Melting) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg plakalarının MIG (Metal Inert Gas) prosesi ile kaynaklanabilirliğinin araştırılmasına ve ardından kaynak bölgesi sertliği ve çekme mukavemeti için kaynak parametrelerinin optimize edilmesine odaklanmaktadır. Kaynak bölgesinin sertlik optimizasyonunda elde edilen en uygun parametreler 20,6 V, 120 A, 5356 (AlMg5) olarak belirlenmiştir. Çekme mukavemeti optimizasyonu için ise en uygun parametreler 20,6 V, 110 A ve 4047 (AlSi12) olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ortaya koyulmuştur ki 4047 kaynak dolgu teli diğer iki kaynak dolgu teline kıyasla en iyi çekme mukavemeti performansı gösteren kaynak dolgu telidir. Buna ek olarak 4047 kaynak dolgu teli kabul edilebilir bir kaynak bölgesi sertlik performansı sergilemiştir. Ayrıca, bu malzemenin piyasada kolayca bulunabilir olması da dikkate alındığında, 4047 kaynak dolgu telinin, bu çalışma için en uygun kaynak dolgu telini temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

## Joining AlSi10Mg plates produced by additive manufacturing with MIG method and optimization of welding parameters

### H I G H L I G H T S

- MIG welding joining of 3D AlSi10Mg plates
- Taguchi optimization of MIG parameters
- Evaluation of mechanical properties of 3D AlSi10Mg alloy occurring in welding application

### Article Info

Research Article

Received: 25.12.2023

Accepted: 05.05.2024

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1408943

### Keywords:

Additive manufacturing  
method,  
AlSi10Mg, MIG,  
taguchi,  
optimization

### ABSTRACT

The additive manufacturing method offers a number of advantages such as rapid prototyping, design flexibility and unique part production. However, compared to traditional production methods, the production volume is limited. Therefore, to meet large-volume production demands, additive manufacturing is not as effective as traditional methods. In order to overcome this disadvantage, scientists are conducting research on the assembly of parts produced by additive manufacturing method. This study focuses on investigating the MIG (Metal Inert Gas) weldability of AlSi10Mg SLM (Selective Laser Melting) plate to AlSi10Mg SLM plate and subsequently optimizing the welding parameters for welding zone hardness and tensile strength. The most suitable parameters obtained in the hardness optimization of the weld zone were determined as 20.6 V, 120 A, 5356 (AlMg5). The most suitable parameters for tensile strength optimization were determined as 20.6 V, 110 A and 4047 (AlSi12). In addition to all these, 4047 filler material is thought to be the most suitable weld filler material for this study, as it provides the best tensile strength performance, offers acceptable weld zone hardness and is relatively easily accessible in the market.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*cemil.isilak@tofas.com.tr, cemil.isilak@hotmail.com, gonca.unal@tofas.com.tr, gurkan.yilmazoglu@tofas.com.tr, ugur.uzel@tofas.com.tr, rdurgut@bandirma.edu.tr, uguz@uludag.edu.tr / Tel: +90 507 371 7658

## 1. Giriş (Introduction)

Alüminyum alaşımları yüksek mukavemet ve hafiflik özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık, demiryolu araçları ve yüksek hızlı gemiler gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaynak yöntemi, bu alaşımları birleştirmek için kullanılan birincil yöntemdir ancak teknoloji uzmanları, tasarımcılar ve bilim adamları için her zaman önemli zorluklar ortaya çıkarmıştır. Alüminyum alaşımlarının kaynaklanmasıyla ilgili zorluklar esas olarak inatçı bir oksit tabakasının varlığı, yüksek termal genişleme katsayısı, katılma bütülmeleri, yüksek termal iletkenlik ve en önemlisi hidrojen gibi gazların erimiş haldeki yüksek çözünürlüğü gibi faktörlere atfedilmektedir [1].

Al-Mg-Si alaşımları orta mukavemetli, en yaygın kullanılan alüminyum alaşımlarıdır ve hafif yapıların üretiminde önemli bir kabul görmektedir [2]. Bu alaşımlar için yaygın olarak tercih edilen kaynak türleri, GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ve GMAW (Gas Metal Arc Welding) kaynak türleridir. Bu kaynak türlerinin tercih edilme sebepleri, diğer kaynak uygulamalarına kıyasla daha kolay uygulanabilmesi ve daha yüksek maliyet etkinliği sunmalarıdır [3]. GMAW prosesi ergiyen bir elektrodun kullanıldığı ve kaynak prosesinin koruyucu bir gazaltında gerçekleştiği bir kaynak türüdür. Ergiyen elektrodun ve koruyucu gaz olarak soygazların kullanıldığı yöntemlere MIG kaynağı adı verilmiştir. Koruyucu gaz olarak aktif gazların kullanıldığı yöntemlere ise MAG (Metal Active Gas) adı verilmiştir. Amerika'da bu iki yöntem için kullanılan isim GMAW'dır. İngiltere ve Almanya'da ise GMAW isminin yerine koruyucu gaz türüne göre MIG kaynağı veya MAG kaynağı adları yer almaktadır. Türkiye'de bu yöntemler için kullanılan isimler "Ergiyen Elektrodla Gazaltı" veya MIG/MAG kaynağı isimleri kullanılmaktadır [4, 5].

SLM teknolojisi, enerji girdisinin lazer ışını kullanılarak toz yatağı içinde gerçekleştirilen bir katmanlı imalat teknolojisidir. Bu yöntemde, inşa platformuna serilen metal tozları, toz serici aracılığıyla homojen bir şekilde dağıtılmaktadır ve ardından tarayıcı aynalar tarafından yönlendirilen lazer ışını ile istenen kesit geometrisinde taranmaktadır. Tarama sırasında metal tozları önce erir ve sonra katılarak parçanın ilgili katmanını oluşturmaktadır. Daha sonra, inşa platformu bir katman kalınlığı kadar aşağı hareket eder ve önceki adımlar tekrarlanmaktadır. Bu döngü, parçanın belirlenen toplam yüksekliğine ulaşana kadar devam eder, bu da parçanın inşa platformu üzerinde birleşik bir şekilde tamamlanmış olmasını sağlamaktadır [6].

Faktöriyel tasarım, yanıt yüzeyi metodolojisi, doğrusal regresyon, sonlu elemanlar yöntemleri, yapay sinir ağları ve Taguchi yöntemi de dahil olmak üzere girdi parametrelerini optimize etmek için çeşitli teknikler mevcuttur. Bu yöntemler arasında Taguchi yöntemi, yüksek kalite ve performansla süreç optimizasyonuna ulaşmada uygun maliyetli, basit ve güvenilir bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bir deney tasarımında birden fazla faktörün ve bu faktörlerin birden fazla seviyede kullanılmasının gerektiği durumlarda, Taguchi metodu ortogonal dizi tablolarını kullanarak deney sayısını minimize etmek mümkündür. Bu tablolar, faktörlerin ve seviyelerin sistemli bir şekilde kombinasyonlarını içerir, böylece en etkili kombinasyonlar belirlenir. Taguchi metodu, faktörlerin etkileşimlerini analiz ederek en iyi performans elde edilecek kombinasyonları belirler [7, 8].

Geleneksel yöntem ile üretilmiş alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı ile birleştirilmesi ve kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerinin davranışının incelenmesi üzerine yapılan araştırmalar literatürde yer almaktadır. Örneğin; Kerr

vd. GMAW yöntemiyle 6xxx serisi yedi farklı malzemeyi, iki farklı (4043 ve 5356) dolgu teli ile birleştirilmesini araştırmıştır. Kaynak akımı 110 ila 170 A ve kaynak voltajı da 22 ila 24 V arasında seçilerek yedi farklı malzeme iki farklı dolgu teli ile birleştirilmiştir. Kerr vd. bu çalışmalarında 4043 ve 5356 dolgu telleri için kaynak bölgesine aynı miktarda ısı vererek ve bu ısıyı da aynı oranda artırarak kaynak bölgesinde meydana gelen çatlakların uzunluklarını araştırmışlardır. Her iki tel için yapılan deneylerde ısı miktarları aynı oranda artırılmasına rağmen 4043 dolgu teli kullanımında meydana gelen çatlakların uzunlukları 5356 telinin kullanımına göre iki kat daha fazladır. Kerr vd. bu durumun sebebini, 4043 kaynak dolgu telinin daha düşük katılma sıcaklığı, sıvının ısıdan etkilenen bölgeye daha uzun bir mesafe boyunca nüfuz etmesini sağladığı için gerçekleştiğini belirtmiştir [9]. Huang vd. GMAW ve GMAW-TW (Twin Wire) yöntemiyle kalın 5083 malzemeli levhaların birleştirilmesinde kaynak bölgesinin mekanik özellikleri ile mikroyapısını ve kaynak bölgesinde meydana gelen poroziteyi araştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlar ise; GMAW-TW prosesinde dışa doğru akış ve itme-çekme desenlerinin ortaya çıkması ile yoğun karıştırma etkileri nedeniyle daha az gözenekliliğe sahip, sağlam bir kaynak dikişi elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Kabarcık oluşma ihtimalinin düşük olması, kabarcığın kaçış mesafesinin kısa olması, kabarcığın kolay bölünmesi, kabarcık kaçış hızının yüksek olması ve katılma oranının düşük olması porozitenin bastırılmasından sorumlu olduğunu belirtmişlerdir. GMAW-TW işlemindeki tane boyutu GMAW işlemindekinden daha büyük olmasına rağmen, bağlantıların nihai çekme mukavemeti daha büyüktür, bunun nedeni daha az gözenek oluşumu ve ikinci faz parçacıklarının kaynak bölgesinde hem daha fazla meydana gelmesi hem de daha düzgün dağılmasındadır [10]. Nuñez vd. 80Ar20He, 60Ar40He, 80Ar19He1O<sub>2</sub> ve 60Ar39He1O<sub>2</sub> gaz karışımlarının, 5183 kaynak dolgu metali kullanılarak alüminyum alaşımı AA5083-O malzemesinin otomatik GMAW prosesi ile kaynaklanabilirliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde dikkate alınan unsurlar; kaynak bölgelerinin mikroyapı değerlendirmesi, sertlik ve çekme özelliklerinin ölçülmesi, süreksizlik ve kusurların gözlemlenmesi, maliyet değerlendirmesi ve kaynak hızıdır. Sonuç olarak, O<sub>2</sub> ilave edilen gaz karışımlarının kaynak bağlantısının kaynaklanabilirliğini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. AA5083 alüminyum alaşımının kaynağı için 80Ar19He1O<sub>2</sub>'nin daha uygun olduğunu aktarmışlardır [11].

Bir üst paragrafta da bahsedildiği üzere, literatürde MIG kaynağı ile geleneksel yöntemlerle üretilmiş alüminyum malzemelerin kaynaklanabilirliği üzerine çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Ancak eklemeli imalat ile üretilen en yaygın alüminyum alaşımı olan AlSi10Mg malzemesinin MIG kaynağı ile birleştirilmesi konusuna literatürde rastlanmamıştır. Fakat birçok bilim insanı, AlSi10Mg malzemesinin kaynaklanabilirliğini ve kaynaklı bağlantıların davranışını çeşitli kaynak yöntemleri kullanarak araştırmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı, GTAW, lazer kaynağı, elektron ışın kaynağı ve manyetik darbe kaynağı türleri bu malzemenin kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde literatürde araştırılmaya konu olan kaynak türleridir. Örneğin Zhang vd. AlSi10Mg malzemesinin, SLM plakasının SLM plakasına, SLM plakasının döküm plakasına ve döküm plakasının döküm plakasına lazer kaynağı ve TIG kaynak teknikleri kullanılarak birleştirilmesini araştırdı. Elde edilen sonuçlar, 210 MPa ile maksimum çekme dayanımının SLM plakasından SLM plakasına kaynak konfigürasyonunda elde edildiğini göstermektedir. Buna ek olarak, SLM ile üretilmiş malzemelerin ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağında, kaynak füzyon alanında da poroziteler oluşmaktadır [12]. Nahmany vd. AlSi10Mg malzemesinin, SLM plakasından SLM plakasına ve döküm plakasından döküm plakasına elektron ışın kaynağı teknolojisi kullanılarak birleştirilmesini araştırmıştır. Dikkat çekici sonuçlar, ince mikroyapı nedeniyle, SLM

plakası ile SLM plakası arasındaki kaynaklı bağlantılarda kısmen erime bölgesinin oluşturulmamasıdır. Ek olarak SLM ile üretilen parçalarda, gözenekliliğin varlığı nedeniyle döküm plakalarla karşılaştırıldığında düşük kaynaklanabilirliğe sahip olduğu öne sürülmektedir [13]. Shribman vd. AA6060-T6'nın AlSi10Mg'nin boru bağlantısına birleştirilmesini araştırmıştır. Çalışmalarından çıkan ana sonuç, düşük erime noktalı alaşımın katı hal kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin umut verici bir süreç olduğu yönündedir [14]. Scherillo vd. SLM ile üretilen AlSi10Mg'nin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmesini araştırmıştır. Bu çalışmanın ana sonuçları gözenekliliğin azalması ve ince taneliliğin elde edilmesidir. En yüksek Sertlik (100 Hv) karıştırma alanında ölçülmüştür [15]. Eklemeli imalat sektörü, basılabilecek parçaların boyutları açısından sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu sınırlamalar ise 3 boyutlu malzemelerin birleştirilmesi konusundaki eksikliklerin keşfedilmesini ihtiyaç haline getirmektedir. 3D baskı için kullanılan çeşitli alaşımlar arasında AlSi10Mg alaşımı, maliyet etkinliği ve kolay erişilebilirliği nedeniyle öne çıkmaktadır. Alaşım, mekanik ve yorulma davranışı özellikleri açısından umut verici sonuçlar sağlamaktadır. Bu da onu havacılık ve otomotiv uygulamalarına uygun hale getirmektedir [16].

Nunes vd., eklemeli imalat ile üretilen alüminyum parçalarının füzyon ve katı hal kaynak prosesleri ile kaynaklanabilirliği üzerine bir derleme çalışma gerçekleştirmiştir. Yazarlar, literatür taraması için "Web of Science" ve "ScienceDirect" veritabanlarını kullanmışlardır ve toplamda 39 adet makaleye erişmişlerdir [17]. Bu çalışmada yer alan kaynak türleri; GTAW, LBW (Laser Beam Welding), FSW (Friction Stir Welding), EBW (Electron Beam Welding), RFSSW (Refrill Friction Stir Spot Welding), RFW (Rotational Friction Welding) ve MPW (Magnetic Pulse Welding). Yazarlar, literatürde eklemeli imalat ile üretilen alüminyum numunelerinin MIG yöntemi ile kaynaklanabilirliğine dair bir çalışmaya rastlamamıştır. Ancak MIG yöntemi, daha kolay uygulanabilirlik ve daha iyi maliyet avantajları sebebiyle Al-Si-Mg alaşımları için yaygın olarak tercih edilmektedir [3]. Bu sebeple, eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg parçalarının MIG yöntemiyle kaynaklanabilirliğinin araştırılması literatüre katkı sağlayacaktır.

Bu çalışma, AlSi10Mg SLM plakalarının MIG metodu ile kaynaklanabilirliğinin araştırılmasına ve ardından kaynak bölgesine ait sertlik ve çekme mukavemeti özelliklerinin iyileştirilmesi için kaynak parametrelerinin optimize edilmesine odaklanmaktadır. Son olarak SEM (Scanning Electron Microscope) yardımıyla kaynak metalinin mikroyapısının incelenmesi yapılmıştır.

## 2. Materyal ve metod (Materials and Methods)

### 2.1. Deneysel metod (Experimental Method)

Bu çalışmada, 2 mm kalınlığında SLM yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg levhalar kullanılarak bindirmeli kaynak bağlantıları incelenmiştir. Kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesi için seçilen

MIG makinesinin güç kaynağı kapasitesi 300 A'dır. Torç hareketi manuel kontrol edilmiştir. Koruyucu gaz olarak argon seçilmiş, kullanılan dolgu malzemeleri ise 1,2 mm çapında 4043 (AlSi5), 4047 (AlSi12) ve 5356 (AlMg5) kaynak dolgu telleridir. Gaz akış hızı 12 lt/dk. ve tel besleme hızı 4 m/dk belirlenmiştir. Kaynak ilerleme hızı tüm deneyler için sabit tutulmuştur. Kaynak torçu açısı 45 derece ayarlanmıştır. Kaynak işleminden sonra numuneler, ortam sıcaklığında herhangi bir müdahale edilmeden soğumaya bırakılmıştır.

### 2.2. Malzeme (Material)

Deneylerde kullanılan AlSi10Mg numuneleri SLM 280 metal eklemeli imalat makinesinde üretilmiştir. AlSi10Mg malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

4043, 4047 ve 5356 kaynak dolgu tellerinin kimyasal bileşimleri Tablo 2'de verilmiştir.

### 2.3. Kaynak prosesi için parametre seçimi (Selection of welding process parameters)

Deney tasarımında optimize edilmek üzere belirlenen üç ana kaynak parametresi gerilim, akım ve dolgu malzemesidir. Gerilim ve akım değerleri, literatürde yer alan Al-Si-Mg malzemesinin MIG yöntemi ile birleştirilmesinde kullanılan ortalama değerler ile dolgu telleri üreticisi firma tarafından önerilen parametre değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir [19]. Kimyasal kompozisyon benzerlikleri AlSi10Mg alaşımı ile birbirine yakın olduğu için önerilen kaynak dolgu malzemeleri 4043 ve 4047 kaynak dolgu telleridir. Ancak bu çalışmada 5356 dolgu malzemesi piyasada kolay bulunabilmesi nedeniyle çalışmaya dahil edilmiştir.

### 2.4. Kaynak numunelerinin hazırlanması (Welding samples preparation)

Her bir kaynak deney grubu için 60 x 150 x 2 mm'lik iki numune 20 mm üst üste oturtularak bindirme kaynağı uygulanmıştır. Her deney grubunun ortalama çekme mukavemetini hesaplamak için 20 x 100 mm ölçülerinde aynı kaynak dikişinden 5 adet çekme testi numunesi hazırlanmıştır. 8 mm genişliğinde kesilen numuneler ise sertlik ölçümlerinde ve makro-mikro görüntü elde etmede kullanılmıştır. Kaynak işlemi tamamlanmış levhaların başında ve sonunda aşırı erime ve malzeme kaybı görüldüğü için levhanın başlangıcında ve sonunda 9 mm genişliğinde parçalar levhadan kesilerek ıskartaya ayrılmıştır. Kesim işlemleri tel erezyon makinesi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bindirmeli bağlantı ile kaynaklanmış iki levhanın sematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.

20 mm üst üste bindirilmiş 20 x 100 x 2 mm ölçülerindeki numunelerin çekme mukavemeti testleri ISO-6892-1 standardı baz alınarak Zwick/Roell Z250 makinesinde gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** AlSi10Mg toz malzemesinin kimyasal kompozisyonu [18] (Chemical composition of AlSi10Mg sample)

| Element Ağırlıkça % | Al    | Si   | Mg       | Fe   | Mn   | Ti   | Zn   | Cu   | Ni   | Pb   | Sn   | Diğer |
|---------------------|-------|------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| AlSi10Mg            | Denge | 9-11 | 0,2-0,45 | 0,55 | 0,45 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,16  |

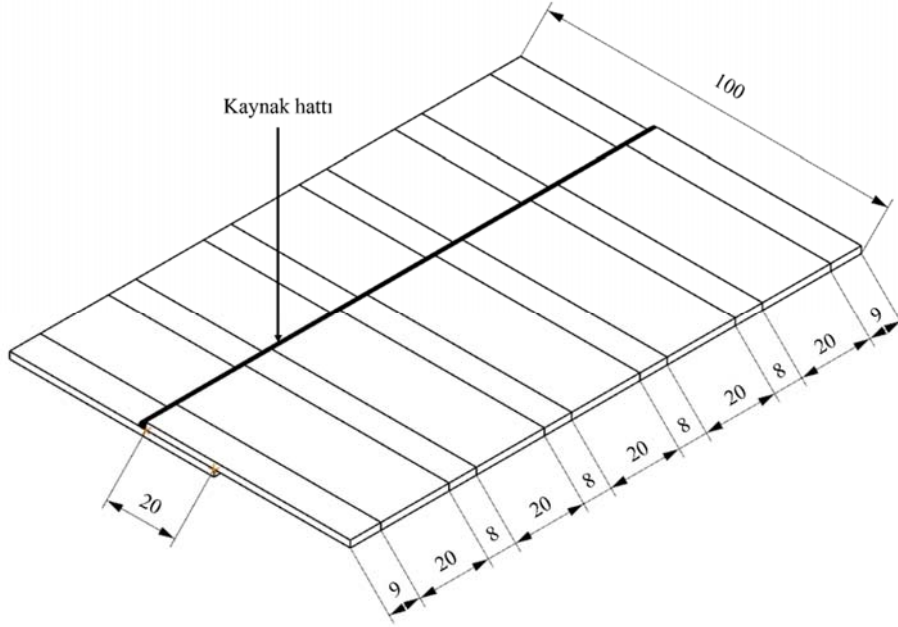
**Tablo 2.** Dolgu malzemelerinin kimyasal kompozisyonları [18] (Chemical composition of filler materials)

| Element Ağırlıkça % | Al    | Si    | Mg      | Fe   | Mn   | Ti   | Zn   | Cu   | Cr        | Diğer |
|---------------------|-------|-------|---------|------|------|------|------|------|-----------|-------|
| 4043                | Denge | 4,5-6 | 0,05    | 0,80 | 0,05 | 0,20 | 0,10 | 0,30 | -         | 0,15  |
| 4047                | Denge | 11-13 | 0,05    | 0,80 | 0,05 | 0,20 | 0,10 | 0,30 | -         | 0,15  |
| 5356                | Denge | -     | 4,5-5,5 | 0,40 | 0,05 | 0,12 | 0,10 | 0,10 | 0,05-0,20 | 0,15  |

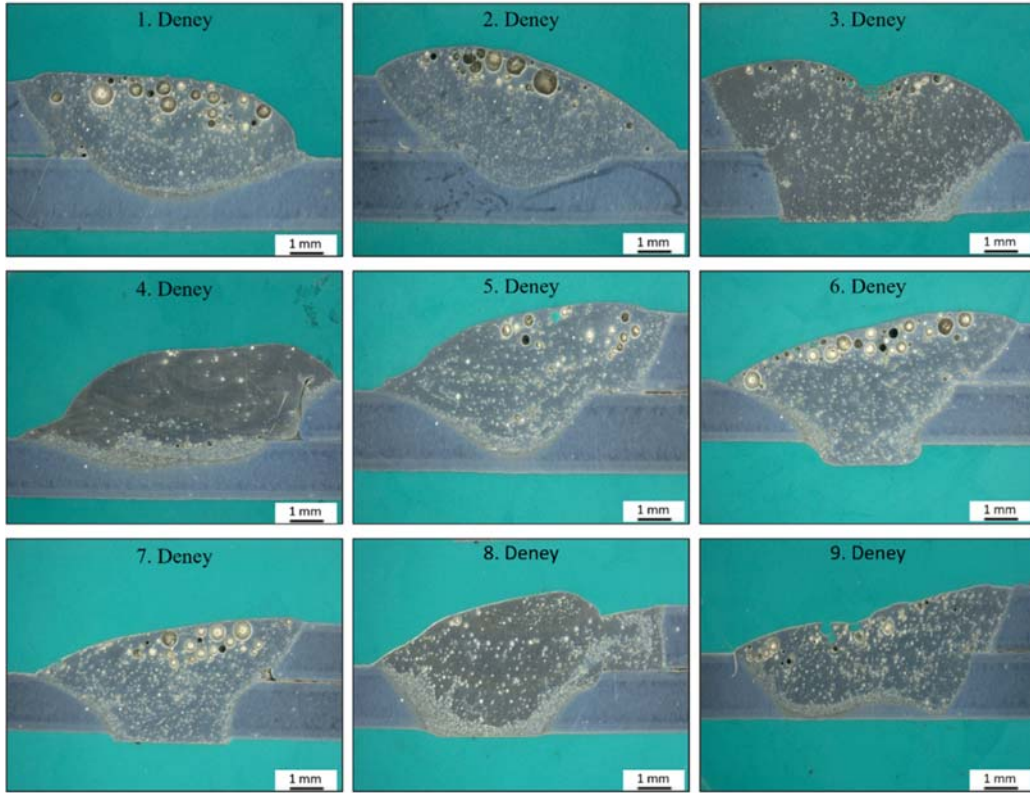
*2.5. Kaynak numunelerinin sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri için hazırlanması (Preparation of weld samples for hardness measurements and microstructure examinations)*

Sertlik ölçümleri için her deney grubundan 1'er adet 8 mm enindeki numuneler öncelikle bakalitlere alınmıştır. Bakalite alındıktan sonra sertlik numunelerine mekanik cilalama işlemleri uygulanmıştır.

Mekanik cilalamanın ardından numuneler Keller reaktifi (2,5 mL HNO<sub>3</sub>, 1,5 mL HCl, 1,0 mL HF ve 95 mL H<sub>2</sub>O) ile aşındırıldı. Bakalite alınan bu numunelerin mikrosertlik ölçümleri, 300 g'lık bir yük uygulayan Vickers elmas uç kullanılarak yapıldı. Bakalite alınan numunelerden, SEM cihazı kullanılarak mikroyapı incelemelerinde kullanılmak üzere görüntüler elde edildi. Her bir deney grubu için bakalite alınmış numuneler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bindirme kaynağı uygulaması şematik gösterimi (Lap joint welding application)



Şekil 2. Kaynak bağlantılarının stereoskop görüntüleri (Stereoscope images of weld joints)

### 3. Sonuçlar ve Tartışma (Results and Discussion)

AlSi10Mg levhalarının MIG yöntemi ile birleştirilmesinin sonucunda elde edilen kaynak bölgesi sertliği ve çekme mukavemeti sonuçlarına etki eden kaynak parametrelerini optimize etmek adına Taguchi yöntemi kullanılmıştır. ANOVA yöntemi yardımıyla değişken kaynak parametrelerinin çalışma sonuçlarına yüzdesel katkısı belirlenmiştir [20-21].

#### 3.1. Taguchi ortogonal dizisine dayalı deneyler (Experiments based on Taguchi orthogonal array)

Bu çalışmada optimize edilecek kaynak işlemi parametreleri kaynak voltajı (V), kaynak akımı (A) ve dolgu malzemesidir. Bu optimizasyon çalışmasında, her parametrenin üç farklı seviyede ayarlandığı üç kaynak parametresinden oluşan bir tasarım matrisi seçilmiştir. Çalışmanın amacı mümkün olan en yüksek çekme mukavemeti ve kaynak bölgesi sertlik değerine sahip bir kaynak bağlantısı elde etmektir. Üç proses parametresine atanan farklı seviyeler Tablo 3'te verilmiştir. Normal şartlar altında her faktörün tüm seviyeleri ile deney yapmak, 27 deney grubu oluşturmaktadır. Ancak Taguchi ortogonal dizi yöntemi kullanılarak aynı analiz yalnızca dokuz deneyle gerçekleştirilebilir ve bu da gerekli test senaryolarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu çalışmada 8 serbestlik derecesine sahip bir L9 (3<sup>3</sup>) ortogonal dizisi seçilmiştir.

**Tablo 3.** Değişken kaynak parametreleri (Variable welding parameters)

| Kaynak parametreleri | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|----------------------|----------|----------|----------|
| Voltaj (V)           | 20,6     | 21,3     | 22,0     |
| Akım (A)             | 110      | 120      | 130      |
| Dolgu malzemesi      | 5356     | 4047     | 4043     |

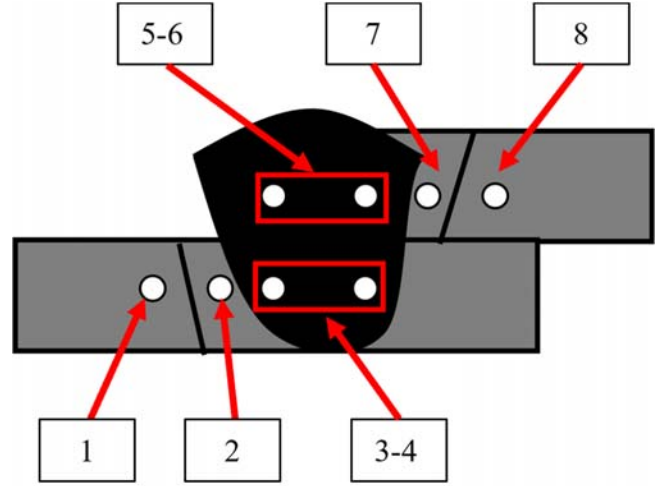
Tablo 4, önceden belirlenmiş voltaj, akım ve dolgu malzemesi kombinasyonlarıyla oluşan 9 adet deney grubunu içermektedir. Verilerin istatistiksel analizi MINITAB 21 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

**Tablo 4.** L9 ortogonal dizinin deneysel düzeni  
(Experimental layout of L9 orthogonal array)

| Deney no | Voltaj(V) | Current(A) | Dolgu Malzemesi |
|----------|-----------|------------|-----------------|
| 1        | 20,6      | 110        | 4043            |
| 2        | 20,6      | 120        | 4047            |
| 3        | 20,6      | 130        | 5356            |
| 4        | 21,3      | 110        | 5356            |
| 5        | 21,3      | 120        | 4043            |
| 6        | 21,3      | 130        | 4047            |
| 7        | 22,0      | 110        | 4047            |
| 8        | 22,0      | 120        | 5356            |
| 9        | 22,0      | 130        | 4043            |

#### 3.2. Sertlik için kaynak parametreleri optimizasyonu (Welding parameters optimization for hardness)

Bakalite alınmış numunelerin esas metal (EM) bölgesinden, ısı tesiri altındaki bölgeden (ITAB) ve kaynak metali (KM) bölgelerinden olmak üzere sekiz farklı bölgeden sertlik değerleri (HV<sub>0,3</sub>) ölçülmüştür. Kaynak bölgesinin ortalama sertliğini hesaplamak için kaynak bölgesinden dört farklı ölçüm yapılmış ve bunların ortalamaları alınmıştır. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin şematik gösterimi Şekil 3'te gösterilmiştir. 1. ve 8. bölgeler EM bölgesini, 2. ve 7. bölgeler ITAB'ı ve 3., 4., 5. ve 6. bölgeler ise KM bölgesini ifade etmektedir.



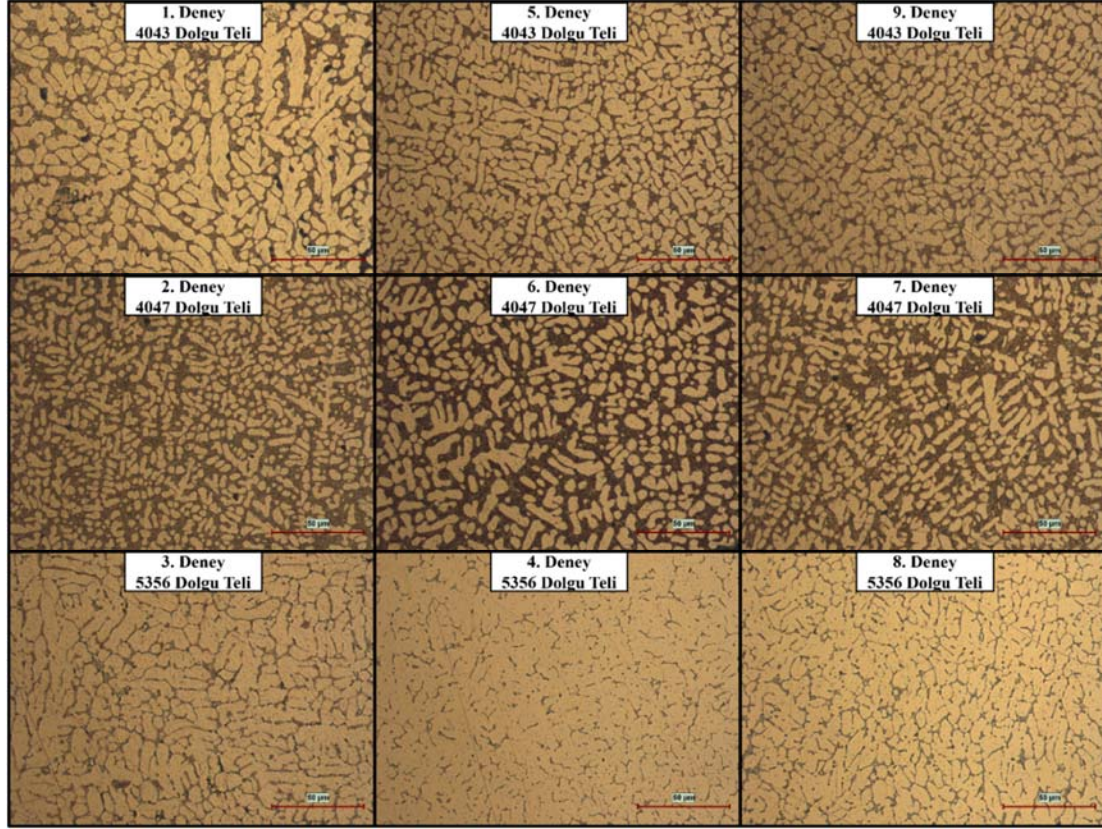
**Şekil 3.** Sertlik ölçüm bölgelerinin şematik gösterimi  
(Schematic representation of hardness measurement zones)

Şekil 3'te belirtilen bölgelerin sertlik değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Kaynak uygulaması ile birleştirilmiş levhaların bölgelerine göre sertlik değerleri  
(Hardness values of weld joint zones)

| Deney | 1. EM | 2. ITAB | 3.4.5.6. KM | 7. ITAB | 8. EM |
|-------|-------|---------|-------------|---------|-------|
| 1     | 86    | 81      | 68,75       | 81      | 92    |
| 2     | 105   | 88      | 87,5        | 89      | 110   |
| 3     | 93    | 76      | 109         | 80      | 99    |
| 4     | 97    | 54      | 80          | 74      | 94    |
| 5     | 107   | 82      | 69          | 84      | 107   |
| 6     | 103   | 80      | 79,75       | 83      | 106   |
| 7     | 107   | 80      | 84,25       | 83      | 100   |
| 8     | 91    | 73      | 107,75      | 78      | 92    |
| 9     | 102   | 78      | 70,25       | 82      | 108   |

3., 4. ve 8. deneylerde 4043 ve 4047 dolgu malzemelerine göre Mg açısından zengin olan 5356 kaynak dolgu malzemesi kullanılmıştır. 3. ve 8. deneylerde sadece kaynak bölgesinin sertliğinin ana metal ve ITAB'a göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer deneylerde kaynak bölgesinin sertliği ana metalin sertliğinden daha düşük olup, ITAB bölgesinin sertliğinden daha düşük veya ona çok yakındır. Mg'ce zengin malzeme ile Si'ce zengin malzeme arasındaki kaynaktan Mg-Al bileşiği veya Mg<sub>2</sub>Si gibi güçlendirme aşamaları meydana gelebilmektedir [12]. Bu güçlendirme aşamaları dislokasyon hareketini engeller ve bu da dikkate değer bir güçlendirme etkisine yol açmaktadır. Dolayısıyla Tablo 5'ten de görülebileceği gibi 3. ve 8. deneyler diğer deneylere göre en yüksek mikrosertlik sonuçlarına sahiptir. 4. deneyde Mg bakımından zengin dolgu malzemesi kullanılmıştır ancak sertlik sonucu nispeten daha düşük elde edilmiştir. Bunun sebebi 3. ve 8. deneylere göre daha az ısı girişi olduğundan 4. deneyde bu güçlendirme fazlarının oluşumu 3. ve 8. deneylere kıyasla tam olarak tamamlanmamış olabilir çünkü MIG kaynağı prosesinde, kaynak bölgesine verilen ısı miktarı, kaynak voltajı ve akımı ile doğru orantılı olarak kaynak ilerleme hızıyla ters orantılıdır [22]. Daha önce de bahsedildiği üzere bu çalışmada kaynak ilerleme hızı sabit tutulmuştur, böylece kaynak bölgesindeki ısı miktarı kaynak voltajına ve akımına bağlı olarak değişmektedir. Sertlik değerlerini daha detaylı değerlendirmek adına her bir deney grubu için kaynak bölgelerinin mikro görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler Şekil 4'te yer almaktadır.



**Şekil 4.** Her bir deney grubuna ait kaynak bölgelerinin tanecik yapısını gösteren optik görüntüler  
(Optical images showing the grain structure of the welding zones of each set of experiment)

Tane boyutunun küçültülmesi ve birim alan başına düşen tane sınırı sayısının artırılması, kaynak bölgesinin sertliğinin artmasına yardımcı olmaktadır. Çünkü bu durum dislokasyon hareketinin engellenmesinde faydalı olduğu için içyapıda güçlendirme etkisi sağlamaktadır [23]. Sertlik sonuçlarını değerlendirirken, üç farklı dolgu teli kullanıldığı için, ilk olarak üç ana grup ile kendi içlerinde değerlendirmek daha anlamlı olacaktır. Çünkü her üç dolgu teli Şekil 4'te görüleceği üzere üç ana farklı içyapı ortaya koymaktadır. Şekil 4 incelendiğinde 1. deneye ait görselde yer alan taneciklerin boyutu nispeten 5. ve 9. deneye kıyasla daha kaba olduğu ve tanecik sınırlarının daha süresiz olduğu görülmektedir. Bu durum 1. deneyin, 5. ve 9. deneye kıyasla az da olsa daha düşük sertlik değerine sahip olmasına sebep olmaktadır. Bu olay aynı şekilde 4047 dolgu teline sahip deney grupları için de geçerlidir. 2. deneye ait mikroyapı incelendiğinde tanecik boyutları 6. deneye kıyasla daha küçük olması kolayca anlaşılmaktadır. Bu durum 2. deneyin, 6. deneye kıyasla daha yüksek bir sertlik değerine sahip olmasını açıklamaktadır. Son olarak 5356 dolgu teline sahip deney grupları incelendiğinde, 4. deneye ait kaynak bölgesindeki tanecik sınırlarının daha süresiz yapısı daha düşük sertliğe yol açtığı gözlemlenmiştir. 3. ve 8. deneye ait kaynak bölgesindeki tanecik sınırlarının tamamlandığı ve böylece daha yüksek sertliğe sahip olmalarına yardımcı olduğu görülmektedir. Ancak Zhang vd. mikrosertliği etkileyen tek faktör tane boyutunun olmadığı aynı zamanda kusurlar ve güçlendirme aşamaları da mikrosertliği etkileyen önemli roller arasında olduğunu belirtmiştir [12]. Çünkü Zhang vd. çalışmasında benzer tanecik yapısına sahip kaynak bölgeleri, farklı sertliklere sahiptir. Diğer taraftan yüksek Si içeriğine sahip dolgu malzemesi ile yapılan kaynak uygulamalarında Si'ce zengin ötektik fazların aşırı oluşumu söz konusudur. Si açısından zengin ötektik fazlar da Mg<sub>2</sub>Si fazında olduğu gibi yük taşıyıcı olarak görev yaparak dislokasyon hareketlerini engellemektedir [24].

Böylece sadece kullanılan dolgu telinin sertlik testi sonucunu etkilediğini iddia etmek doğru olmaz. Isı girdisi ile oluşan mikroyapı, gözenek miktarı ve çeşitli kusurların oluşumu da sertlik testi sonucunu önemli ölçüde etkilemektedir.

Si açısından zengin 4043 dolgu malzemesinin kullanıldığı 1. deneyin SEM görüntüleri ve EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) haritalamaları Şekil 5'te gösterilmiştir.

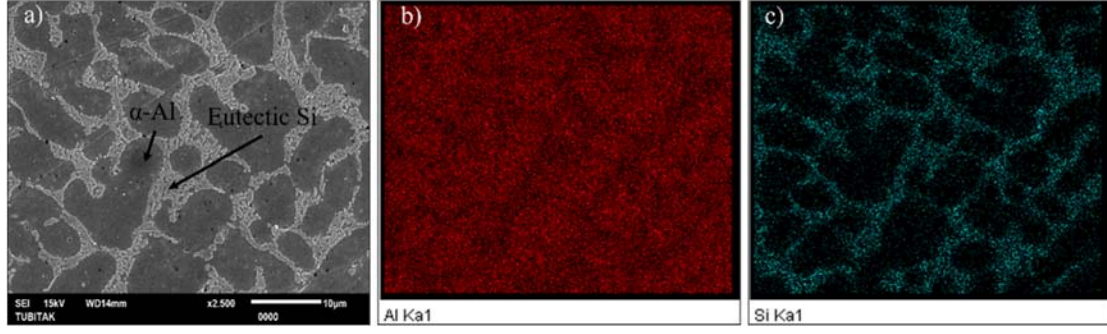
Şekil 5'te EDS haritalama analizi yardımıyla görülebileceği gibi Si elementinin varlığı tanecik sınırlarında tanecik merkezine göre daha fazladır. Bir numaralı deney kaynak bölgesine ait Sem görüntüleri ve EDS spektrum analizi Şekil 5'te gösterilmiştir.

Şekil 5'ten görüleceği üzere tane sınırlarında Si elementinin varlığı daha fazladır, bu da tane sınırlarında Si ötektik fazlarının varlığını göstermektedir.

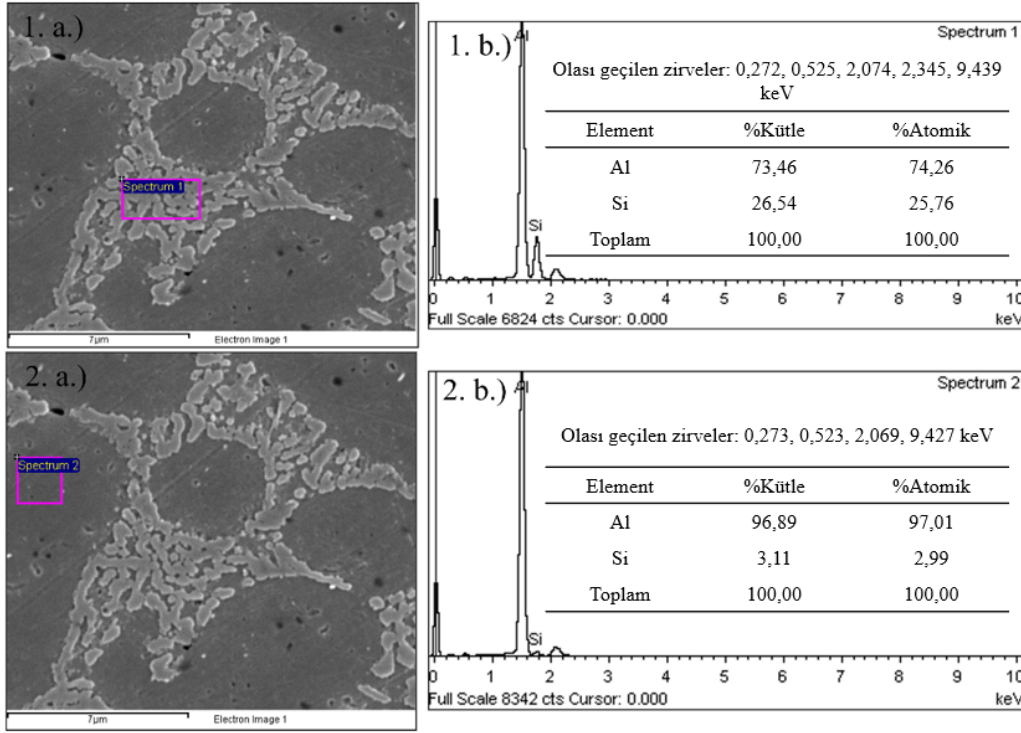
### 3.2.1. Daha büyük daha iyi metodu (The larger is better method)

Bu kısımda, kaynak bölgesindeki sertliğin iyileştirilmesi için daha büyük daha iyidir Taguchi metodu kullanılarak kaynak parametreleri optimize edilmiştir. Bu methoda daha yüksek sinyal/gürültü oranları daha üstün sonuçlara işaret etmektedir [25]. Tablo 6'da, sertlik optimizasyonu için her bir faktör ve bu faktörlere bağlı seviyelerin sinyal/gürültü oranları sunulmaktadır.

Tablo 6'da görüleceği üzere her bir faktöre ait en yüksek sinyal/gürültü oranlarına sahip seviyeler; 20,6 V, 120 A ve 5356 dolgu malzemesi olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. a) Bir numaralı deneye ait kaynak bölgesinin SEM görüntüsü. b) Kaynak bölgesinin Al element haritası c) Kaynak bölgesinin Si element haritası ( a) SEM image of the number one experiment welding zone. b) Al element mapping of the welding zone c) Si element mapping of the welding zone)



Şekil 6. Bir numaralı deneye ait numunenin kaynak bölgesinin SEM görüntüleri ve EDS spektrum analizi. 1.a) EDS element analizinin yapıldığı tanecik sınırı bölgesinin SEM görüntüsü 1.b.) Tanecik sınırı bölgesinin EDS spektrum element analizi. 2.a.) EDS element analizinin yapıldığı tanecik merkezi bölgesinin SEM görüntüsü 2.b.) Tanecik merkezi EDS spektrum element analizi (Sem images and EDS spectrum analysis of the number one experiment welding zone. 1.a) SEM image of grain boundary and grain boundary's spectrum location. 1.b.) EDS spectrum elemental analysis of grain boundary. 2.a.) SEM image of grain and grain's spectrum location. 2.b.) EDS spectrum elemental analysis of grain)

Tablo 6. Sertlik optimizasyonu için sinyal-gürültü oranları (Response table for signal to noise ratio)

| Kaynak parametreleri | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 | Delta | Sıralama |
|----------------------|----------|----------|----------|-------|----------|
| Voltaj (V)           | 38,78    | 37,62    | 38,70    | 1,15  | 2        |
| Akım (A)             | 37,77    | 38,76    | 38,46    | 0,98  | 3        |
| Dolgu malzemesi      | 39,82    | 38,46    | 36,82    | 3,00  | 1        |

### 3.2.2. Varyans analizi ANOVA (Analysis of variance ANOVA)

ANOVA, faktörlerin önemini belirlemek ve süreç parametrelerinin yanıt değişkenini ne ölçüde etkilediğini ölçmek için istatistiksel bir araç olarak kullanılmaktadır. ANOVA'yı kullanarak, her bir faktörün önemini ve yanıt üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde anlaşılması mümkün hale gelmektedir. Sertlik optimizasyonuna ilişkin ANOVA sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Sertlik optimizasyonu ANOVA sonuçları (ANOVA results for hardness optimization)

| Kaynak          | Katkı   | P-Değeri |
|-----------------|---------|----------|
| Voltaj (V)      | %14,54  | 0,284    |
| Akım (A)        | %9,92   | 0,368    |
| Dolgu malzemesi | %69,76  | 0,076    |
| Hata            | %5,78   |          |
| Toplam          | %100,00 |          |



P değeri ilgili parametrenin anlamlılık düzeyini göstermektedir. Bu nedenle bilimsel çalışmalarda optimizasyon sonucu elde edilen P değerlerinin teorik olarak 0,05 değerinden küçük olması beklenmektedir. Ancak literatürde endüstriyel uygulamalarda bu değer 0,4'e kadar çıktığı ve gerçek endüstriyel uygulamalar için kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [7]. Bu kapsamda Tablo 7 incelendiğinde kaynak bölgesi sertlik sonucunu en çok etkileyen faktör dolgu malzemesi faktörü olduğu görülmektedir. Sertlik değerini etkileyen diğer faktörler sırasıyla Voltaj ve Akım faktörleridir ancak ikisi arasında kaydedeğer bir fark gözlenmemektedir.

### 3.2.3. Sertlik değerinin tahmini (Prediction of hardness value)

Tablo 6'da sunulan 20,6 V, 120 A ve 5356 dolgu malzemesi parametreleri, sertlik optimizasyonu için belirlenen en uygun kaynak parametreleridir. Bu parametreler aşağıda yer alan Eş. 1'de, kullanılmıştır. Eş. 1, 5356 dolgu malzemesinin sonuç tahmin denklemini vermektedir.

$$\text{Tahmin } HV_{0,3} = 62 - 0,71 * (\text{Voltaj}) + 0,433 * (\text{Akım}). \quad (1)$$

Eş. 1'de optimum kaynak parametreleri denklemde yerlerine konulduğunda tahmin değeri 5356 kaynak dolgu teli için 99,334 HV<sub>0,3</sub> olarak hesaplanmaktadır.

Regresyon matematik modelinin R-kare değeri %94,22 olup, regresyon modeli için bu değer oldukça sağlam bir yüzdeye işaret etmektedir.

Eş. 1'de elde edilen 99,334 HV<sub>0,3</sub> değeri lineer regresyon modelinden elde edilen tahmin değeridir. Ancak daha sağlam sonuç alabilmek için polinomal regresyon analizi de tahmin işlemlerine dahil edilmiştir. Polinomal regresyon denklemi aşağıda Eş. 2'de verilmiştir. Lineer regresyon denkleminde elde edilen tahmin sonucu, polinomal regresyon denkleminde kullanılarak sertlik için nihai tahmin değeri elde edilmektedir.

$$\text{Nihai tahmin } HV_{0,3} = 87,68 - 1,076 * (HV_{0,3}) + 0,01195 * (HV_{0,3})^2 \quad (2)$$

Lineer regresyon denkleminde elde edilen sertlik değeri Eş. 2'de yerine konulduğunda elde edilen nihai sertlik değeri 98,7 HV<sub>0,3</sub> olarak hesaplanmıştır.

### 3.2.4. Tahmin edilen sertlik değerinin doğrulanması (The confirmation of the predicted hardness value)

Tahmin edilen değeri doğrulamak amacıyla optimum kaynak parametreleri kullanılarak tekrar kaynak işlemi uygulanmıştır. Dolgu malzemesi olarak Mg bakımından zengin 5356 elektrot teli kullanılmıştır. Kaynak voltajı 20,6 V ve kaynak akımı 120 A olarak

ayarlanmıştır. Bu yapılan kaynak işlemi sonucunda elde edilen kaynak bölgesi sertlik değeri 96 HV<sub>0,3</sub> bulunmuştur. Optimize edilmiş sertlik sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.

**Tablo 8.** Optimize edilmiş sertlik numunesinin sertlik ölçüm sonuçları (Hardness measurement results of the optimized hardness sample)

| Deney              | 1. EM | 2. ITAB | 3.4.5.6. KM | 7. ITAB | 8. EM |
|--------------------|-------|---------|-------------|---------|-------|
| Doğrulanmış numune | 112   | 58      | 96          | 73      | 118   |

Optimize edilmiş kaynak parametreleriyle kaynak uygulaması yapılan levhalardan sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemeleri için bakalite alınan numune görseli Şekil 7'de gösterilmiştir.

Elde edilen sertlik değeri 96 HV<sub>0,3</sub> ile tahmin edilen sertlik değeri 98,7 HV<sub>0,3</sub> arasında kaydedeğer bir fark bulunmamaktadır. Bu durumda sertlik için tahmin edilen değer ile elde edilen sertlik değeri karşılaştırıldığında, sertlik için belirlenen regresyon tahmin modelinin oldukça sağlam bir model olduğu ortaya koymaktadır.

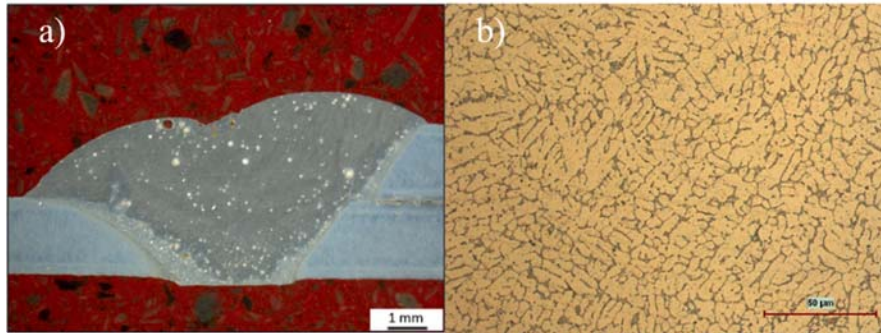
Şekil 6'da bahsi geçen bakalite alınmış numunenin kaynak bölgesi taneçik yapısını gösteren SEM görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda görülmüştür ki Si'ce zengin ve Mg'ce zengin malzemeler arasındaki kaynak uygulamalarında, kaynak bölgesinde yer alan taneçik sınırlarında Mg<sub>2</sub>Si fazlarına rastlanılmaktadır [12]. Mg<sub>2</sub>Si fazlarının yukarıda Şekil 7'de gösterilen tanelerin sınırlarında yer aldığı düşünülmektedir. Dolayısıyla tane sınırlarındaki bu güçlendirme fazları, dislokasyon hareketini önleyerek dikkate değer bir güçlendirme etkisi sağlamaktadır. Şekil 6'da bahsi geçen bakalite alınmış numunenin kaynak bölgesinde yer alan taneçik yapısının Sem görüntüleri ve EDS spektrum analizi Şekil 9'da gösterilmiştir.

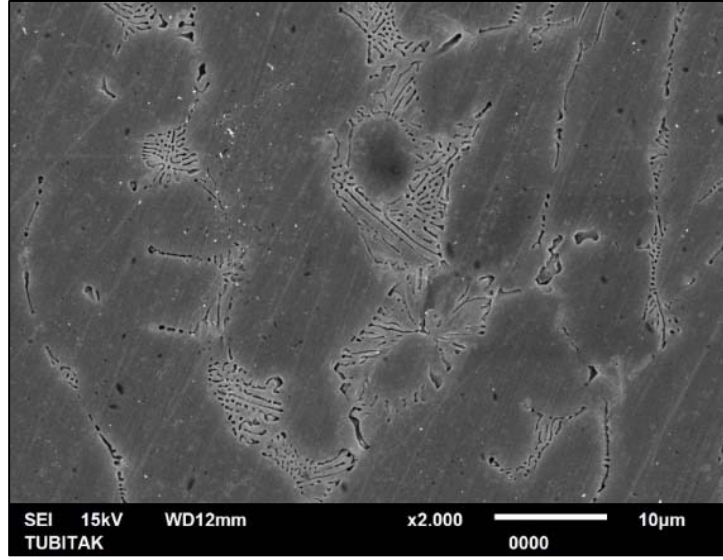
Şekil 9'deki görseller ve analizler incelendiğinde, Şekil 6'da bahsi geçen bir numaralı deneyden farklı olarak tane sınırlarında Mg elementinin varlığının tespit edildiği görülmektedir. Bu durum literatür araştırmalarında karşılaşılan Mg<sub>2</sub>Si fazının varlığının bir göstergesi olduğu düşünülmektedir. Çünkü optimize edilmiş kaynak parametreleri ile yapılan bu deneyde dolgu teli olarak Mg bakımından zengin 5356 dolgu teli kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi Mg'ce zengin dolgu teli ve Si'ce zengin ana metalin kaynak uygulamalarında kaynak bölgesindeki tane sınırlarında Mg<sub>2</sub>Si fazları oluşabilmektedir [12].

### 3.3. Çekme mukavemeti için kaynak parametreleri optimizasyonu (Welding parameters optimization for tensile strength)

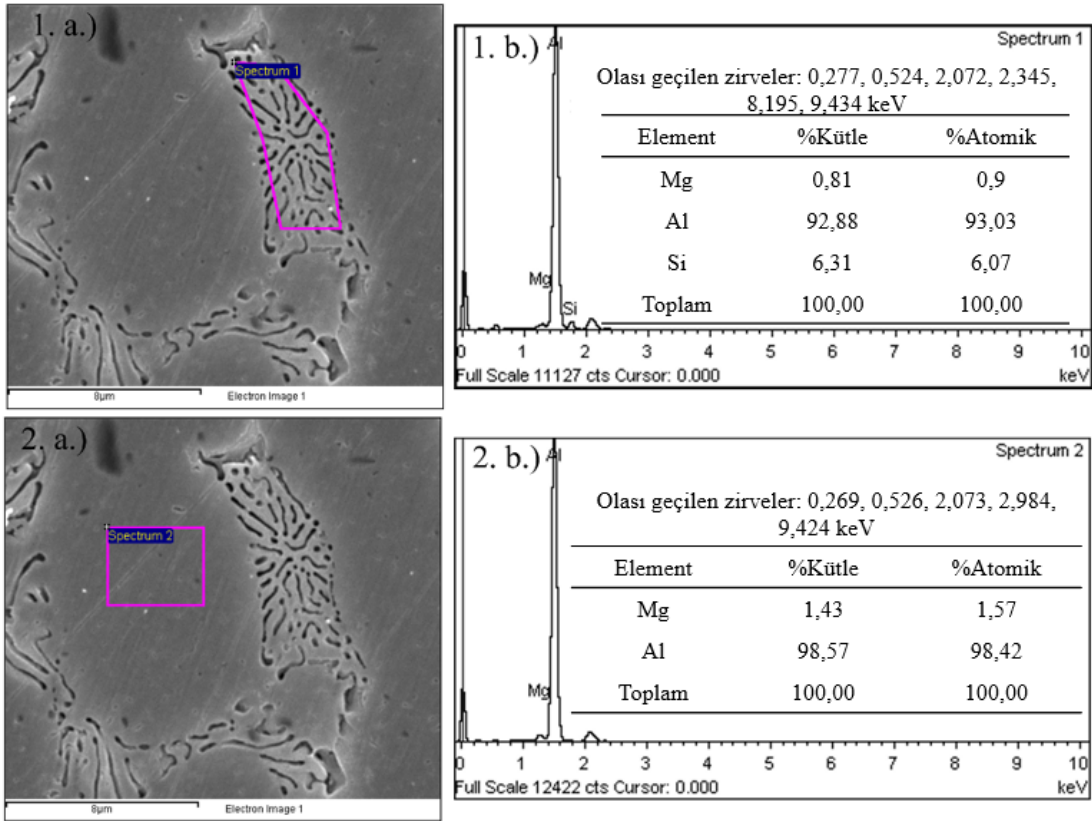
Çekme mukavemeti optimizasyonunda kullanılacak olan çekme mukavemeti numunelerinin sayısı her bir deney parametre seti için



**Şekil 7.** Optimize edilmiş sertlik numunesi a.) Stereoscope görüntüsü b.) Kaynak bölgesi optik mikroyapı görüntüsü (Optimized hardness sample. a) Stereoscope image. b) Optical image showing the grain structure of the welding zone)



Şekil 8. Sertlik optimizasyonu gerçekleştirilmiş numunenin kaynak bölgesi SEM görüntüsü (SEM image of the welding zone of the sample optimized for hardness)



Şekil 9. Sertlik optimizasyonu gerçekleştirilmiş numunenin kaynak bölgesi SEM görüntüleri ve EDS spektrum analizi. 1.a) EDS element analizinin yapıldığı tanecik sınırı bölgesinin SEM görüntüsü 1.b.) Tanecik sınırı bölgesinin EDS spektrum element analizi. 2.a.) EDS element analizinin yapıldığı tanecik merkezi bölgesinin SEM görüntüsü 2.b.) Tanecik merkezi EDS spektrum element analizi (Sem images and EDS spectrum analysis of the welding zone of the sample optimized for hardness. 1.a) SEM image of grain boundary and grain boundary's spectrum location. 1.b.) EDS spectrum elemental analysis of grain boundary. 2.a.) SEM image of the grain and grain's spectrum location. 2.b.) EDS spectrum elemental analysis of grain)

beş adet olarak belirlenmiştir. Her bir deney parametre setine ait çekme mukavemeti sonuçlarını daha güvenilir elde edebilmek adına bu beş adet çekme mukavemeti testi sonuçlarının aritmetik ortalaması

alınmıştır. Böylece çekme mukavemeti optimizasyonunda bu aritmetik ortalamalar kullanılmıştır. Her bir deney parametre setine ait çekme mukavemeti numuneleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Her bir deney parametre setine ait çekme mukavemeti testi uygulanmış numuneler  
(The tensile strength tested samples for each set of experiment)

Tablo 9’da, her bir deney grubunun çekme mukavemeti ortalamaları sunulmuştur.

**Tablo 9.** Deney parametre setlerine ait çekme mukavemeti sonuçları  
(Tensile strength results of experiment parameter sets)

| Deney | Voltaj (V) | Akım (A) | Dolgu Malzemesi | Çekme Muk. Ort. (MPa) |
|-------|------------|----------|-----------------|-----------------------|
| 1     | 20,6       | 110      | 4043            | 101,7                 |
| 2     | 20,6       | 120      | 4047            | 111,3                 |
| 3     | 20,6       | 130      | 5356            | 87,6                  |
| 4     | 21,3       | 110      | 5356            | 87,9                  |
| 5     | 21,3       | 120      | 4043            | 90,4                  |
| 6     | 21,3       | 130      | 4047            | 88                    |
| 7     | 22,0       | 110      | 4047            | 103,8                 |
| 8     | 22,0       | 120      | 5356            | 83,1                  |
| 9     | 22,0       | 130      | 4043            | 86,8                  |

Tablo 9’da görüldüğü gibi en yüksek çekme mukavemetine Si açısından en zengin kaynak dolgu malzemesi olan 4047 kullanımında ulaşılmıştır. Bunun nedeni yüksek Si içeriğine sahip dolgu malzemesi ile yapılan kaynaklarda Si açısından zengin ötektik fazların aşırı oluşmasıdır. Çünkü Si açısından zengin ötektik fazlar yük taşıyıcı görevi görerek dislokasyon hareketlerini engellemektedir ve Mg<sub>2</sub>Si fazının aksine yapıya gevreklik sağlamadığı için çekme mukavemeti sonuçları daha yüksek elde edilmiştir [24,26]. Bu durum Şekil 4 incelendiğinde açıkça görülmektedir. Çünkü 4047 teli ile yapılan kaynak uygulamalarının mikroyapı görüntülerinde açıkça görülmektedir ki tane sınırları 4043 teli ile yapılan kaynak uygulamalarına göre daha kalındır. Bunun sebebi de 4047 telinde yer

alan Si miktarının 4043 teline göre çok daha fazla olmasından ötürüdür. Öte yandan, 2., 6. ve 7. deneylerde yüksek Si içeriğine sahip 4047 dolgu teli kullanılmıştır. Fakat bunlardan en düşük çekme mukavemetine sahip olan deney 6. deneydir. Bunun nedeni, 6. deneyin kaynak bölgesine ısı girişi 2. ve 7. deneylerden daha fazla olmasıdır. Çünkü daha yüksek ısı girişinin daha düşük soğutma hızlarına yol açtığı bilinmektedir [27]. Katılma sırasında eriyiğin hızla soğumasıyla, çözünmeyen hidrojen zamanla eriyik havuzundan kaçamaz ve parçada gözenekler oluşturarak sıkışıp kalır [28]. Şekil 2 incelendiğinde 6. deney grubuna ait kaynak bölgesinde yer alan büyük çaplı gözenekli yapı, 2. ve 7. deney grubuna kıyasla kaynak yüzeyine daha çok yayılmış durumdadır. Bu durum doğrudan çekme mukavemeti performansını belirlemese de kaynak bölgesinin çekme mukavemetini negatif yönde etkilemektedir. Tüm bunlara ek olarak Kerr vd. çalışmalarında Si bakımından zengin dolgu tellerinin kaynağında ısı miktarı arttıkça Mg bakımından zengin dolgu tellerine göre neredeyse 2 kat daha fazla çatlakların meydana geldiğini belirtmişlerdir [9]. Özetlemek gerekirse Si bakımından zengin dolgu teli ile yapılan kaynaklarda, kaynak bölgesine verilen ısı miktarı diğer dolgu teline nazaran daha önemli rol oynamaktadır ve belli bir seviyeden sonra artan ısı seviyesi, kaynak bölgesi mekanik performansını negatif yönde etkilemektedir.

### 3.3.1. Daha büyük daha iyi metodu (The larger is better method)

Kaynak bölgesi çekme mukavemetinin maksimuma çıkarılması amaçlandığı için daha büyük daha iyidir Taguchi metodu tercih edilmiştir. Çekme mukavemeti optimizasyonu için Tablo 10’da her bir

faktör ve bu faktöre bağlı seviyelerin sinyal/gürültü oranları sunulmaktadır.

**Tablo 10.** Çekme mukavemeti optimizasyonu için sinyal-gürültü oranları  
(Response table for signal to noise ratio)

| Kaynak Parametreleri | 1. Seviye | 2. Seviye | 3. Seviye | Fark Sıralama |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Voltaj (V)           | 39,98     | 38,97     | 39,16     | 1,01 2        |
| Akım (A)             | 39,79     | 39,48     | 38,84     | 0,95 3        |
| Dolgu malzemesi      | 38,71     | 40,05     | 39,35     | 1,34 1        |

Tablo 10'da yer alan her bir seviye için en yüksek sinyal/gürültü sahip parametreler, çekme mukavemeti için en uygun kaynak parametrelerine işaret etmektedir. Bu kapsamda, en uygun kaynak parametreleri 20,6 V, 110 A ve 4047 dolgu malzemesi olarak belirlenmiştir.

### 3.3.2. Varyans Analizi ANOVA (Analysis of variance ANOVA)

Çekme mukavemeti optimizasyonuna ilişkin ANOVA sonuçları Tablo 11'de verilmiştir.

**Tablo 11.** Çekme mukavemeti optimizasyonu için ANOVA sonuçları  
(ANOVA results for tensile strength optimization)

| Kaynak          | Katkı   | P-Değeri |
|-----------------|---------|----------|
| Voltaj (V)      | %28,95  | 0,122    |
| Akım (A)        | %22,77  | 0,150    |
| Dolgu malzemesi | %44,26  | 0,083    |
| Hata            | %4,02   |          |
| Toplam          | %100,00 |          |

Tablo 11 incelendiğinde, çekme mukavemeti sonucunu en fazla etkileyen faktör dolgu malzemesidir. Dolgu malzemesini sırasıyla Voltaj ve Akım parametreleri takip etmektedir. Sertlik optimizasyonu ANOVA sonuçlarında kaynak dolgu malzemesi sertlik sonucuna bariz etki ederken, burada yer alan parametrelerin katkı oranları birbirine nispeten daha yakındır.

### 3.3.3. Çekme mukavemeti değerinin tahmini (Prediction of Tensile strength value)

Çekme mukavemeti optimizasyonu için elde edilen optimum kaynak parametreleri; 20,6 V, 110 A ve 4047 dolgu malzemesi parametreleridir. Bu parametreler Tablo 10'da sunulmuştur. 4047 dolgu malzemesi için lineer regresyon sonuç tahmin denklemi aşağıdaki Eş. 3'te verilmiştir.

$$\text{Tahmin } R_m \text{ (MPa)} = 299,7 - 6,41 * (\text{Voltaj}) - 0,517 * (\text{Akım}). \quad (3)$$

Eş. 3'de yer alan lineer regresyon denklemine göre tahmin edilen değer 110,8 MPa olarak hesaplanmıştır.

Lineer regresyon matematik modelinin R-kare değeri %95,98 olup, regresyon modeli için bu değer, sertlik regresyon modelinde olduğu gibi oldukça sağlam ve güvenilir bir değer işaret etmektedir.

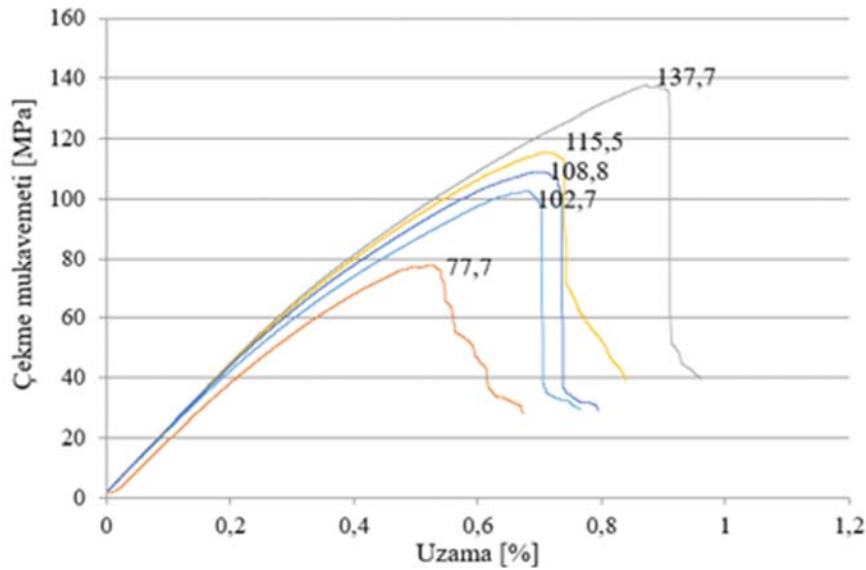
Eş. 3'de elde edilen 110,8 MPa değeri Eş. 4'te verilen çekme mukavemeti polinomal regresyon denklemine kullanılarak çekme mukavemeti için nihai tahmin değeri elde edilmiştir.

$$\text{Nihai tahmin } R_m \text{ (MPa)} = 193,9 - 3,057 * (R_m) + 0,02102 * (R_m^2). \quad (4)$$

Böylece nihai tahmin edilen değer Eş. 4'e göre 113,2 MPa olarak hesaplanmıştır.

### 3.3.4. Tahmin edilen çekme mukavemeti değerinin doğrulanması (The confirmation of the predicted tensile strength value)

Tahmin edilen değeri doğrulamak adına optimize edilmiş kaynak parametreleri ile tekrar kaynak işlemi uygulanmıştır. Doğrulamak adına yapılan kaynak uygulamasında dolgu malzemesi olarak 4047 kaynak dolgu teli kullanılmıştır. Kaynak voltajı 20,6 V ve kaynak akımı 110 A olarak ayarlanmıştır. Bunun sonucunda deneysel olarak aynı kaynak dikişi üzerinden elde edilen beş adet çekme testi numunesinin ortalama çekme mukavemeti sonucu 108,5 MPa'dır. Bu numunelerin çekme mukavemeti grafikleri Şekil 11'de gösterilmektedir.



**Şekil 11.** Çekme mukavemeti optimizasyonu gerçekleştirilmiş beş adet kaynaklı numunenin çekme mukavemeti grafikleri  
(Tensile strength graphs of five welded samples with tensile strength optimization)

Optimize edilmiş kaynak parametreleri ile kaynak uygulaması yapıldıktan sonra elde edilen ortalama çekme mukavemeti değeri 108,5 MPa ve tahmin edilen çekme mukavemeti değeri ise 113,2 MPa'dır. Tahmin edilen değer ile kaynak uygulaması yapıldıktan sonra elde edilen değer birbirine oldukça yakındır. Bu durum regresyon tahmin modelinin oldukça güvenilir olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, Şekil 11'deki sonuçlar irdelendiğinde aynı kaynak dikişinde yer alan numunelerin çekme mukavemeti performanslarında bir miktar sapmalar yer aldığı görülmektedir. Her ne kadar kaynak dikişi göz ile muayene edildiğinde sağlıklı gözükse de eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg malzemesinin mikroyapısında yer alan çeşitli kusurlar sebebiyle, aynı kaynak dikişinde yer alan numunelerin çekme mukavemetlerinde bir miktar farklılıklara sebebiyet verebilmektedir. Eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesi, geleneksel yöntem ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesine kıyasla anizotropik ve yüksek gözenekli bir yapıya sahiptir [17]. Ayrıca, AlSi10Mg malzemesinin üretiminde kullanılan geri dönüştürülmüş tozların kullanım miktarı arttıkça, içeriğinde yer alan oksidasyon miktarı artmaktadır [29]. Tüm bu kusurlar dikkate alındığında aynı kaynak dikişinde bir miktar çekme mukavemeti performanslarında sapmalar meydana gelebilir. Bu sapmaların oluşmasını etkilemesinin önüne geçilmesi adına, her kaynak dikişinden 5 adet numune çıkartılarak ortalama çekme mukavemeti hesaplanmıştır. Böylece ufak miktardaki sapmaların, çalışmanın güvenilirliğine etkisinin azaltılması hedeflenmiştir.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemesinin kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak bölgesinin sertliğini ve çekme mukavemetini arttırmak amacıyla MIG kaynak parametrelerinin optimize edilmesi araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir:

Şekil 2'de görüldüğü gibi numunelerin hemen hemen tamamında kaynak bölgelerinde gözenekli bir yapı görülmektedir. SLM ile üretilmiş AlSi10Mg malzemelerinin kaynağı, döküm AlSi10Mg kaynaklarına göre daha fazla gözeneklilik üretme eğilimindedir çünkü Zhang vd., çalışmasında belirtildiği gibi; SLM ile üretilen AlSi10Mg malzemelerin yapısında mikro boşluklu gözenekliliğin oluşması kaynak bölgelerinde de gözenekli bir yapıya neden olmaktadır. SLM ile üretilmiş AlSi10Mg malzemesinin kaynağında gözenekli yapıdan kurtulmak oldukça zordur [12].

Kaynak bölgesi sertliğinin optimizasyonunda kaynak işlemine en fazla katkı sağlayan faktörün %69,76 gibi büyük bir oranla dolgu malzemesi faktörü olduğu görülmektedir. Dolgu malzemesi faktörünü sırasıyla %14,54 ile Volta ve %9,92 ile Akım faktörleri takip etmektedir. En yüksek sertlik değerleri 5356 kaynak dolgu malzemesi ile elde edilmiştir. 4047 kaynak dolgu telinin 4043 kaynak dolgu teline göre daha iyi bir sertlik performansı sergilediği Tablo 5'ten anlaşılmaktadır. Ancak sadece dolgu malzemesinin sertliği etkilediğini söylemek yeterli değildir. Isı girdisinin oluşturduğu mikroyapı, gözenek miktarı ve kaynak bölgesinde oluşan çeşitli kusurlardan dolayı sertlik değeri oldukça etkilenmektedir.

Nihai ölçülen sertlik değeri 96 HV<sub>0,3</sub> ve tahmin edilen sertlik değeri 98,7 HV<sub>0,3</sub>tür. Bu sebeple sertlik için belirlenen regresyon tahmin modelinin oldukça sağlam bir model olduğu sonucuna varılmaktadır.

Çekme mukavemeti sonuçlarının belirlenmesinde en fazla katkı sağlayan faktör %44,26 oranıyla dolgu malzemesi faktörüdür. Dolgu malzemesini sırasıyla %28,95 ile Voltaj ve %22,77 ile Akım faktörleri takip etmektedir. 4047 kaynak dolgu malzemesinin seçilmesinin çekme mukavemetini önemli ölçüde arttırdığı Tablo 9'da görülmektedir. Ek olarak, 4043 dolgu malzemesi 5356 dolgu

malzemesinden daha iyi çekme mukavemeti sonuçları sergilediği gözlenmiştir. Ancak çekme mukavemetinin sadece dolgu malzemesinden etkilendiğini söylemek mümkün olamaz çünkü aynı şekilde sertliği etkileyen mikroyapı, gözenek miktarı ve çeşitli kusurların oluşumu gibi diğer kusurlar da çekme mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedir.

Nihai ortalama çekme mukavemeti değeri olan 108,5 MPa, 113,2 MPa olarak tahmin edilen çekme mukavemeti değerine neredeyse çok yakın olup, bu da regresyon tahmin modelinin güvenilirliğini göstermektedir.

5356 dolgu malzemesi ile yapılan kaynak uygulamalarının 4043 ve 4047 dolgu malzemeleri ile yapılan kaynak uygulamalarına göre nispeten daha düşük çekme mukavemeti performansı göstermesinin nedeninin, kaynak bölgesinde oluşan Mg<sub>2</sub>Si parçacıklarının tane sınırlarında çökmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Mg<sub>2</sub>Si'nin süneklik ve tokluk üzerinde olumsuz etkisi olduğundan çekme mukavemeti sonuçlarını negatif yönde etkilemektedir [26].

Sonuç olarak, 4047 dolgu malzemesi endüstride nispeten kolay ulaşılabilirliği ile hem en iyi çekme mukavemeti performansını sağlayarak hem de kabul edilebilir kaynak bölgesi sertliği sunarak AlSi10Mg malzemesinin MIG yöntemi ile birleştirilmesinde en uygun kaynak dolgu malzemesi olduğu belirlenmiştir.

#### Teşekkürler (Acknowledgement)

Bu araştırma TÜBİTAK 2244 sanayi doktora programı (proje 118C083) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Birinci yazar burslu olduğu TÜBİTAK'a teşekkürlerini borç bilir. Yazarlar ayrıca TÜBİTAK ile birlikte bu projeye mali destek ve test imkanlarını sağlayan TOFAŞ A.Ş.'ye de teşekkürlerini borç bilir.

#### Kaynaklar (References)

1. Matrukanitz RP., Selection and weldability of heat-treatable aluminum alloys. ASM Handbook-Welding, Brazing and Soldering, 6, 528-536, 1990.
2. Balasubramanian V., Ravisankar V., & Madhusudhan Reddy G., Effect of pulsed current welding on mechanical properties of high strength aluminum alloy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 36, 254-262, 2008.
3. Reddy G.M., Gokhale A. A., & Rao K. P., Optimisation of pulse frequency in pulsed current gas tungsten arc welding of aluminium-lithium alloy sheets, Materials Science and Technology, 14 (1), 61-66, 1998.
4. Eryürek İ., Barlas., Gazaltı ark kaynağı, İTÜ Yayınları, 1, 2007.
5. Ahmad Z., (Ed.), Recent trends in processing and degradation of aluminium alloys, BoD-Books on Demand, 64, 2011.
6. Poyraz Ö., Kuşhan M.C., Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 730-742, 2018.
7. Nobrega G., Souza M.S., Rodríguez-Martín M., Rodríguez-González P., & Ribeiro J., Parametric optimization of the GMAW welding process in thin thickness of austenitic stainless steel by Taguchi method, Applied Sciences, 11 (18), 8742 2021.
8. Gülcan O., Şimşek U., Özdemir M., Günaydın K., Tekoğlu E., The effect of build parameters on distortion, dimensional deviation and surface roughness of laser powder bed fusion built lattice structures, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (1), 101-111, 2024.
9. Kerr H., W., & Katoh M., Investigation of heat-affected zone cracking of GMA welds of Al-Mg-Si alloys using the Vareststraint test, Welding Journal, 66, 1987.
10. Huang L., Hua X., Wu., D., Jiang Z., Li F., Wang H., & Shi S., Microstructural characterization of 5083 aluminum alloy thick plates welded with GMAW and twin wire GMAW processes, The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 93, 1809-1817, 2017.
11. Nuñez E., E., N., Unfried Silgado J., Torres Salcedo J., E., & Ramírez, A., J., Influence of gas mixtures Ar-He and Ar-He-O<sub>2</sub> on weldability of aluminum alloy AA5083-O using automated GMAW-P, *Welding international*, 30 (6), 423-431, 2016.
  12. Zhang C, Bao Y, Zhu H, et al. A comparison between laser and TIG welding of selective laser melted AlSi10Mg, *Opt Laser Technol.*, 120, 105696, 2019.
  13. Nahmany M, Rosenthal I, Benishti I, et al., Electron beam welding of AlSi10Mg workpieces produced by selected laser melting additive manufacturing technology, *Addit Manuf.*, 8, 63–70, 2015.
  14. Shribman V, Nahmany M, Levi S, et al., MP welding of dissimilar materials: AM laser powder-bed fusion AlSi10Mg to wrought AA6060-T6, *Prog Addit Manuf.*, 5, 171–181, 2020.
  15. Scherillo F, Astarita A, Prisco U, et al., Friction stir welding of AlSi10Mg plates produced by selective laser melting, *Metallogr Microstruct Anal.*, 7, 457–463, 2018.
  16. Minhas N., Sharma V., & Bhadauria S.S., A review on weldability and corrosion behaviour of L-PBF printed AlSi10Mg alloy, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1-33, 2022.
  17. Nunes R, Faes K, De Waele W, Simar A, Verlinde W, Lezaack M, Sneyers W, Arnhold J, A Review on the Weldability of Additively Manufactured Aluminium Parts by Fusion and Solid-State Welding Processes, *Metals*, 13 (10), 1724, 2023.
  18. SLM Solutions, <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/powders/>, Erişim tarihi Aralık 2023.
  19. Cao G., & Kou S., Liquation cracking in full penetration Al-Si welds, *Welding Journal*, 84, 63-71, 2005.
  20. Tewari SP et al., Effect of welding parameters on the weld- ability of materials: improve in effectiveness, *Int J Eng Sci Tech- nol.*, 2 (4), 512–516, 2010.
  21. Tesfaye F.K., Parameter optimizations of GMAW process for dissimilar steel welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-8, 2023.
  22. Lakshminarayanan A.K., Balasubramanian V., & Elangovan K., Effect of welding processes on tensile properties of AA6061 aluminium alloy joints, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 286-296, 2009.
  23. Kuang X., Qi B., & Zheng H., Effect of pulse mode and frequency on microstructure and properties of 2219 aluminum alloy by ultrahigh-frequency pulse Metal-Inert Gas Welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 3391-3407, 2022.
  24. Li Z., Li Z., Tan Z., Xiong D.B., & Guo Q., Stress relaxation and the cellular structure-dependence of plastic deformation in additively manufactured AlSi10Mg alloys, *International Journal of Plasticity*, 127, 102640, 2020.
  25. Sagheer-Abbasi Y., Ikramullah-Butt S., Hussain G., Imran S. H., Mohammad-Khan A., & Baseer R. A., Optimization of parameters for micro friction stir welding of aluminum 5052 using Taguchi technique, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 369-378, 2019.
  26. Min S.Y., Kwang S.S., & Nack J.K., Effect of Mg<sub>2</sub>Si Particles on the Elevated Temperature Tensile Properties of Squeeze-Cast Mg-Al Alloys, *Metallurgical And Materials Transactions A*, 35, 1629, 2004.
  27. Oliveira J.P., Santos T.G., & Miranda R.M., Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. *Progress in Materials Science*, 107, 100590, 2020.
  28. Da Silva C.L.M., & Scotti A., The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW, *Journal of materials processing technology*, 171 (3), 366-372, 2006.
  29. Beckmann, F., & Emmelmann, C., Optimization of the weldability of laser additive manufactured aluminum by means of hydrogen minimization in the component and welding parameter optimization, In *Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference*, 2019.