Doğa ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar

4

Hikmet Y. ÇOĞUN
Zeynel KARACAGİL
Suna KIZILYILDIRIM



2024 ve 7075 Alüminyum Alaşımlarında Kaynak İşlemleri ve Özelliklere Etkisi

İlayda TÜRKMAN[1]
Selin AK[2]
Gizem KARABULUT[3]
Nuray BEKÖZ ÜLLEN[4]

Giriş

Malzemelerin genellikle tercih edilip kullanılmasını sağlayan en önemli unsurları fiziksel ve mekanik özellikleridir. Bunun yanı sıra kaynak edilebilirliği ve kolay şekillendirilebilmesi de gelmektedir. Alüminyum alaşımlarının sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek şekillendirilebilme kolaylığı, yüksek korozyon dayanımı, fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilebilmesi özellikleri sayesinde endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (İpekoğlu, 2011:1-3). Alüminyum ve alaşımlarının en sık tercih edildiği alan ulaşım özellikle havacılık endüstrisidir. Ulaşım endüstrisinde ise en çok paya sahip olan otomobil üretimidir. Uçak ve otomobil sanayisinde yoğun olarak tercih edilmesinin ana nedeni hafiflikten kaynaklı çok daha az enerji tüketimi ve buna bağlı olarak yük kapasitesinin fazla olmasıdır (Ozan, 2019:3-4).

Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları göz önüne alındığında kaynaklı bağlantıların gerekliliği ve yapılan kaynağın kabul edilebilir ölçüde olması önemlidir. Alüminyum alaşımları çeşitli kaynak yöntemleriyle kaynak edilebilirler. Ancak kaynak işlemi sonrası yapılarda çeşitli sorunlarla karşılaşılabilmektedir. Alüminyum alaşımlarının Tungsten inert gaz (TIG), Metal inert gaz (MIG), lazer, elektron ışın kaynağı (EBW) gibi ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirmelerinde oluşan istenmeyen faz oluşumu, tane irileşmesi ve metalurjik değişiklikler bu alaşımların kaynak edilebilirliklerini olumsuz şekilde etkilemektedir. Ergitme kaynak işlemlerinde kaynaklanan bölgedeki sıcaklık kaynaklana metal parçanın ergime sıcaklıklarının üstüne ulaştığından çoğu zaman dolgu metali kullanımı tercih edilir. Ergitme kaynak prosesinde, kaynak edilen metal parça başlangıçta eriyip ardından katılaşmaya başladığından malzemenin ergime-katılaşma durumu, gözenek ve çatlak oluşumu gibi kaynak hatalarına ve ısı tesiri altında kalan bölgede mekanik özelliklerin azalmasına neden olur. Alüminyum alaşımlarının kaynaklanmasında bunun gibi sorunlarla sıklıkla karşılaşıldığı için ergitme kaynak yöntemleri kullanımının yerine üretici firmalar tarafından başka kaynak yöntem arayışlarına gidilmiştir. Alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesinde dikkat edilmelidir ayrıca kaynak öncesi ve sonrası ısıl işlem gibi önlemler alınmalı ya da kaynak işlemi soruna neden olmayacak derecede yüksek hızlarda yapılmalıdır. Yaşanan problemler göz önüne alındığında çok farklı malzemeleri bile sorunsuz bir şekilde kaynak edebilen katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan "sürtünme kaynak yöntemi" çok avantajlı çözümler sunmaktadır (Sarsılmaz vd., 2012: 260-263; Da Silva vd., 2011: 2022-2024; Büyükarslan, 2006:27-38). Katı hal kaynak işleminde bahsedilen ergitme durumu ile karşılaşılmaz. Bu kaynak işlemlerinde, kaynak edilen metallerin ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıkta ve belirli bir süre ve basınç değeri altında metallerin birbirleri içerisine difüzyonu sonucu kaynak edilmiş olur ve herhangi bir dolgu metali

[1] Öğrenci, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-4472-7562
[2] Öğrenci, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-7765-2790
[3] Araş. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-0930-5380
[4] Dr. Öğr. Üyesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-2705-2559

gerektirmez. Bu durum özellikle alüminyum alaşımlarının kaynaklanmasında birçok avantaj sağlar. (İpekoğlu, 2011:1-2). Sürtünme kaynağı, iki parçanın aynı eksen üzerinde alın alına temas ettirilerek bir parçanın dönerken diğerinin basınç yardımıyla dönen parçaya belli bir basınç ve süre temas etmesi ile sürünmesi sonucu oluşan ısıdan yararlanılarak gerçekleşen bir katı hal kaynağıdır. Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynağı ile birleştirilmesi oldukça yeni bir teknoloji olup birçok araştırmacı için araştırma konusu olmuştur (Cavalier vd., 2005:3671).

Alüminyum alaşımları sekiz seriden oluşmaktadır. Bunlar; 1XXX, 2XXX, 3XXX, 4XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX olarak adlandırılır. Havacılık endüstrisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan; yaşlandırılabilir 2XXX alaşımı ve çökelme yoluyla sertleştirilmiş 7XXX serisi alüminyum alaşımı ise yüksek mukavemetli, yorulma ve korozyona karşı dayanıklı kaynaklı birleştirmelerin üretimindeki güçlükler, uçak parçalarının kaynakla birleştirme yöntemini uzun bir süre engellemiştir. Bu alüminyum alaşımları, ergime bölgesinde sergiledikleri kötü katılaşma yapısı, metalurjik yapısı ve gözenekli yapısından dolayı genelde "kaynaklanabilirliği iyi değil" olarak değerlendirilmiştir. Kaynak yapılmamış ana malzemeyle karşılaştırıldığında mekanik özellikleri de azalmaktadır. Bu nedenler bu alaşımların kaynak edilmesinde geleneksel kaynak birleştirmelerinin kullanımını sınırlamıştır. Bu yüzden havacılık sektöründe yapısal kaynak birleştirmelerin büyük bir bölümünde perçinli birleştirme kullanılmaktadır. Bu üretim tekniğinde; yüksek maliyetlere, perçin deliklerinde korozyona, imalat zorluklarına ve gerilme yoğunlaşmalarına neden olmaktadır. Yaşanan bu süreç katı faz kaynağı olarak bilinen sürtünme karıştırma kaynağının geliştirilmesi ile ortadan kaldırılmıştır (Dalkılıç, 2012:26-27; Rajakumar, vd., 2011:536; Cavaliere ve Panella; 2008:251-252; Çevik vd., 2012:369-370; Aydın, 2008:1-4). Ancak, alüminyum alaşımlarının kullanım alanındaki kaynak gereksinimi buna karşılık kaynak yöntemindeki seçim darlığı ve yaşanan problemler bu konuda daha fazla çalışma yapılmasının önünü açmıştır. Bu çalışmada; 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilme özellikleri ve tercih edilen kaynak yöntemlerinin malzemenin mekanik özelliklerine etkileri, özellikle çeşitli sektörlerde kullanım alanları literatür incelemeleri doğrultusunda derlenerek düzenlenmiştir.

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyumun düşük yoğunluk, iyi haddelenebilme özelliği, iyi elektriksel iletkenlik, manyetik davranış göstermemesi, mükemmel korozyon direnci gibi mükemmel sayılabilecek özelliklerinin yanında, dökülebilirlik, kaynak edilebilme ve mekanik özellikleri o kadar iyi değildir. Özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla alüminyuma bazı alaşım elementleri katılır. Alüminyuma ilave edilen metale göre bir sınıflandırma yapılır. Bu sınıflandırma sisteminde birinci rakam, alüminyuma ilave edilen esas metali gösterir (Büyükarslan 2006:5-8; Gülbudak, 2013:14).

- 1XXX: Alaşımsız alüminyum
- 2XXX: Bakırlı alüminyum alaşımı
- 3XXX: Manganezli alüminyum alaşımı
- 4XXX: Silisyumlu alüminyum alaşımı
- 5XXX: Magnezyumlu alüminyum alaşımı
- 6XXX: Silisyum ve magnezyumlu alüminyum alaşımı
- 7XXX: Çinkolu alüminyum alaşımları
- 8XXX: Demir ve Silisyumlu alüminyum alaşımı

1XXX Serisi

Ağırlıkça en az %99 alüminyum içeren alaşım elementleridir. Çok az oranda silisyum ve demir gibi alaşım elementi içerebilirler (Gülbudak, 2013:15). Isıl işlem yöntemi uygulanamaz, elektrik ve ısıyı iyi iletir, kaynaklanabilme kabiliyeti yüksektir fakat mukavemeti çok düşüktür. İşlenebilirliği ve korozyon direnci en yüksek alüminyum alaşımı serisidir. Alüminyum folyo, kapı ve pencere profili yapımı gibi alanlarda tercih edilirler (Ozan, 2019:25).

2XXX Serisi

Duralüminum olarak da bilinen bakır ile alaşımlandırılmış alüminyum alaşımını içeren ve en yaygın kullanım alanı bulan alüminyum serisi alaşımlardır. Korozyona karşı direnci düşüktür fakat yüksek sertlik ve mukavemet özelliklerine sahiptir (Gülbudak, 2013:15-16). Isıl işlem ve soğuk şekillendirme yöntemleri kullanılabilir. Sıcak çatlak oluşumu yaşanabileceği için ergitme kaynağı yöntemine uygun değildir. Dayanımı ve hafifliği sayesinde; otomotiv, havacılık ve uzay sanayisi gibi alanlarda sıklıkla tercih edilir (Ozan, 2019:30). Endüstride çok fazla kullanıldığı için bu serinin en çok tercih edileni AA2024 alaşımıdır. Isıl işleme tabi tutulabilecek alaşımlar içinde ilk olması ve yaşlanma sertleşmesi özelliğinden olayı alüminyum serileri içinde en çok tercih edileni alaşımdır. AA2024 alaşımının kimyasal bileşimi ve ısıl işlem proseslerine göre kazandıkları mekanik özellikleri gösteren değerler sırasıyla Tablo 1 ve 2'de verilmektedir. Uçak yapısında, perçinlerde, karışık şekilli malzemelerde yoğun olarak tercih edilir (Gülbudak, 2013:16).

Tablo 1 – 2024 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (ağ. %) (Avas Metal, 2017)

Fe	Si	Cu	Cr	Mn	Mg	Zn	Zi+Ti	Diğer	Al
0.5	0.5	3.8-4.9	0.1	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.15	0.15	Kalan

Tablo 2 – 2024 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri (Avas Metal, 2017)

Temper	Akma Mukavemeti (MPa) Min.-Maks.	Çekme Mukavemeti (MPa) Min.-Maks.	Uzama (%50) Min.-Maks.	Sertlik (Brinell) Min.-Maks.
0	75	185	20	55
T3	340	475	18	120
T4	315-330	440-465	20	120
T8	450	485	6	130

3XXX Serisi

Mangan ile alaşımlandırılmış, ağırlıkça maksimum %1,5 mangan, çok az oranda demir ve silisyum elementleri içeren alaşım serisidir. Isıl işlemle sertleştirilemez buna karşı soğuk şekillendirme yöntemiyle mukavemeti arttırılabilir. Kolay şekillendirilebilir ve korozyona karşı direnci yüksektir. Ergitme kaynak yöntemi tercih edilebilir. İçecek kutusu, radyatör ve cephe kaplama gibi kullanım alanları vardır (Ozan, 2019:25).

4XXX Serisi

Temel alaşım elementi silisyumdur. Isıl işlem yöntemi uygulanamaz fakat soğuk şekillendirme yöntemi ile sertliği arttırılabilir. Esneklik ve düşük ergime sıcaklığı bu serinin en önemli özelliğidir (Ozan, 2019:26). Yüksek akıcılık özelliği sayesinde bu alaşımlar genellikle kaynak yönteminde dolgu metali olarak kullanılırlar (Eşit, 2006:10).

5XXX Serisi

Bu serinin temel alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum miktarı arttıkça süneklik azalırken, sertlik ve mukavemet değeri artar (Akça, 2006:28). Isıl işlem uygulanmayan bu seri iyi kaynak edilebilirliklerinin yanında yüksek oksidasyon direnci gösterdiklerinden gemilerde de kullanılmaktadır. Gerilmeli korozyon çatlamasını engellemek için %3,5 üzerinde magnezyum içeren alaşımlarda 65°C'nin üzerindeki işlem sıcaklıklarında ve soğuk deformasyon miktarında belirli kısıtlamalarda, düşük sıcaklıklarda depolama gerektiren basınçlı tanklarda, damperli kamyon gövdelerinde kullanılmaktadır (Yalçın, 2010:6; Gülbudak, 2013:17-18).

6XXX Serisi

Silisyum ve magnezyum ile alaşımlandırılmış, ısıl işlem ve yaşlandırma uygulanabilen seridir. Magnezyum silikat (Mg_2Si) intermetalik bileşiği oluşacak oranda magnezyum ve silisyum ile alaşımlama yapılır ve çökelti sertleştirilmesi ile mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanır (Gülbudak, 2013:19). Bu serinin mekanik özelliklerinde yaşanan artış, 2xxx ve 7xxx serisinde sağlanandan daha düşüktür. Talaşlı işleme kabiliyeti, kayak edilebilirlikleri ve şekillendirilebilme özellikleri iyidir. Yüksek korozyon direnci gereken durumlarda tercih edilirler (Tanrıöver, 2008:14-15). Kaynaklı yapılarda, mimari uygulamalarda, köprülerde ve ulaşım endüstrisinde genellikle tercih edilir (Yalçın, 2010:6-7).

7XXX Serisi

Bu alaşım serisi bütün alüminyum alaşımları içinde en mukavemetli olanlarıdır. %1-8 çinko içeren alaşım serisidir (Yalçın, 2010:7). Çinko, magnezyum ile birlikte kullanıldığında $MgZn_2$ intermetalik bileşiği oluşur. Magnezyum ile birlikte çinko, alüminyum içerisinde çözünmelerinden kaynaklı yüksek yoğunluklu çözeltilerin oluşmasına sebebiyet verir ve dayanımın artması sağlanır. Gerilme korozyon direnci yüksek olan alüminyum-çinko alaşımına, çatlama problemi yaşanmaması için yaşlandırma işlemi yapılır. Bu işle sonrası mukavemet ve kırılma dayanımı, tokluğu ve korozyon direnci yüksek bir yapı elde edilir. 7XXX alaşımları uçak gövde yapımında kullanılmaktadır (Gülbudak, 2013:19). 7075 alaşımı, uçak yapı elemanları için sıklıkla tercih edilmektedir. Rijitide modülü 14.927 N/cm^2'dir. 20°C'deki yoğunluğu 2,80 gr/cm^3'tür. Poisson oranı 0,33'tür. Kesme mukavemeti, çekme gerilmesi mukavemetinin yaklaşık %55'idir. 260-455°C arasında sıcak çalışılabilir. Tam tavlama 413°C'de 2-3 saat bekletmeye yapılır ve devamında havada soğutulur. Malzeme kullanılmadan önce bir sürü depolanacaksa, 232°C'de yeni bir ısıtmaya tabi tutulmalıdır. 7075-T6 alaşımının çekme dayanımı oldukça yüksek olduğundan yüksek dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadır (Tanrıöver, 2008:15-16). Tablo 3'te 7075 alaşımının temper şartlarına bağlı olarak değişen mekanik özellikleri görülmektedir.

Tablo 3 – 7075 Alaşımının Temperleme Şartlarına Göre Mekanik Özellikleri (İpekoğlu, 2011:21)

Temper	Çekme Dayanımı MPa	Akma Sınırı MPa	Uzama %	Brinell Sertliği 500 kg, 10 mm, %30	Kesme Mukavemeti MPa
O	228	103	17	60	152
T6,T651	572	503	11	150	331
T73	503	434	…	…	…

8XXX Serisi

Silisyum ve demir içeren alüminyum alaşım serisidir. Dökme alüminyumun Sn'li alaşımları yaşlandırılabilirler (Gülbudak, 2013:20).

2024 VE 7075 ALAŞIMLARINA UYGULANAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Şekillendirilebilir alaşımlar arasında gaz korumalı ark süreçleriyle en büyük kolaylıkla kaynak edilebilenler, ısıl işlem kabul etmez 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileridir. 6XXX serilerindeki ısıl işlem kabul etmeyenler de kolayca kaynak edilebilirler. 4XXX ile yüksek mukavemetli serilerinin ve ısıl işlem kabul eden 2XXX serilerinin 2024 alaşımı da arkla kaynak edilebilirlerse de, özel tekniklerinin uygulanması gerekebilir ve daha düşük bir süneklik elde edilebilir. Yüksek mukavemetli, ısıl işlem kabul eden 7XXX serilerinden 7075 alaşımı kaynak edilebilir ama bunların IEB'leri (ısıdan etkilenen bölge) gevrek olur; dolayısı ile de bunların kaynak edilmeleri tavsiye edilmez. (Taban, 2005:41-42; Büyükarslan 2006:12-29; Eşit, 2006:14). Alüminyum alaşımlarına uygulanabilen çeşitli kaynak türleri ve özellikleri aşağıdaki Tablo 4'te verilmiştir.

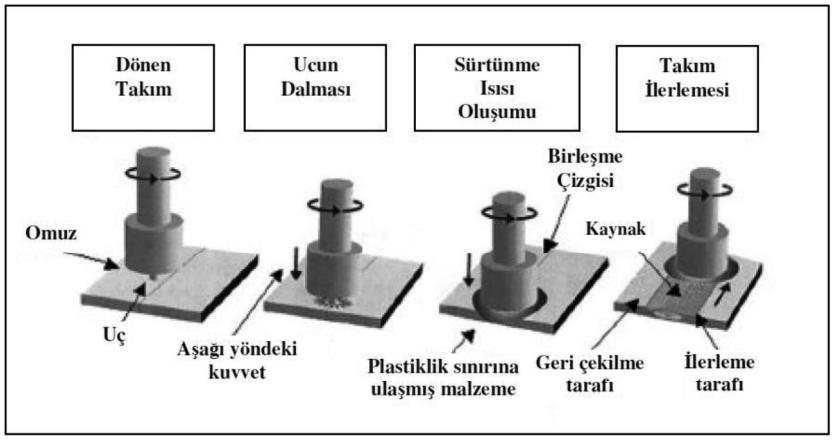
Tablo 4 – Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Kaynak Yöntemleri ve Özellikleri (Eşit, 2006:14-15)

Yöntem	Özellik
TIG	Yüksek kalite, her pozisyonda kullanılabilen tüketilmeyen elektrod, tel ilaveli veya ilavesiz, manuel, mekanik veya tamamen otomatik, sıcak tel ilaveleri ile yükseltilebilen düşük kaynak hızı, düz veya darbeli akım
MIG	Yüksek kalite, her pozisyonda kullanılabilen beslemeli tüketilir elektrod, manuel, mekanik veya tamamen otomatik, yüksek kaynak hızı, düz veya darbeli akım
Manuel metal ark	Sınırlı uygulama alanı, flaks-kaplı tüketilir elektrod, gerilmesiz bağlantı, demode yöntem
Oxy-gaz	Düşük kaynak kalitesi, gerilmesiz bağlantı, demode yöntem
Lazer kaynağı	Hassas ve yüksek kalitede kaynak, uzay, havacılık, elektronik ve savunma sanayiinde yaygın kullanım, yüksek yatırım maliyeti
Elektro-gaz, elektro-curuf, gaz altı kaynağı	Sınırlı uygulamalarda kullanılır ve porozite problemi görülür. Oldukça eski bir yöntemdir.

Manyetik tahrikli ark alın kaynağı	Borulardaki alın kaynağında kullanılır, flash kaynağına göre daha az yatırım maliyeti gerektiren tamamen otomatikleşmiş sistemlerde yapılır
Nokta, nokta dikiş kaynağı	Metalik saçların bağlantı noktalarında, otomotiv, mutfak eşyaları ve uzay endüstrisinde kullanılır, yüksek yatırım maliyetine karşı yüksek verimliliğe sahip
Kaynaklı bağlantı	Nokta kaynağı ile yapıştırıcılı bağlantıların bir kombinasyonu olup, mükemmel yorulma mukavemeti sağlar, otomotiv endüstrisinde kullanılır
Yüksek frekanslı indüksiyon dikiş kaynağı	Alın bağlantısı şeklinde yapılır, şeritten boru yapımında kullanılır. Yüksek yatırım maliyeti gerektirir ancak yüksek üretim hızına sahiptir.
Flash alın kaynağı	Metalik saçlarda, çubuk ve delikli bölümlerde çizgisel ve açılı alın bağlantı uygulamalarında, farklı metallerin kaynağında. Yüksek yatırım maliyetine karşılık yüksek üretim hızı
Kondansatör, kapasitör boşaltma	Maksimum 6 mm çaplı stud kaynağı; yalıtım pimleri, tava tutacakları, otomobil trimleri ve elektrik kontak yerlerinde
Drawn ark	5-12 mm çaplı stud kaynağında
Sürtünme kaynağı	Yuvarlak veya dikdörtgensel çubuk veya içi boş bölümlerin alın kaynağında, düz plaka veya yuvarlatılmış bölümlerin alın kaynağında, farklı metallerin kaynaklanmasında kullanılır. Yüksek yatırım maliyeti gerektirir.
Patlamalı kaynak	Boru hatlarının bağlantısında, farklı metallerin kaynağında veya kaplama amaçlı kaynaklarda kullanılır.
Ultrasonik kaynak	Folyo kaynağında, elektrik bağlantı uç amaçlı yapılan Al-Cu kaynağında
Soğuk basınçlı kaynak	Al-Cu, Al-Çelik veya alüminyum levhaların ve tellerin kaynağında kullanılır.
Sıcak basınçlı kaynak	Kenardan kenara alın kaynağında kullanılır.

Al alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi sorunlu olduğundan bu sorunları gidermek amaçlı yeni geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı kullanılmaktadır (İpekoğlu, 2011:34-35). Günümüzde genellikle sağladığı üstünlük ve kolaylıklar sebebiyle sürtünme karıştırma kaynağı kullanılsa da, bu yöntem geliştirilmeden önce TIG kaynak yöntemi gibi gazaltı ark kaynak yöntemleriyle kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Özellikle 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının kaynağında sıklıkla Sürtünme Karıştırma Kaynak (SKK) yöntemi tercih edilmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynakla birleştirilmesi istenen malzemelerin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta işleme tabii tutulan bir çeşit katı hal kaynak yöntemidir (Sönmez ve Başak, 2017:600-601). Bu yöntem, en fazla ergitme kaynak yöntemiyle yapılan kaynaklarda çok problemli olan ya da genellikle ergitme kaynak yöntemiyle birleştirilemediği kabul edilen 2XXX ve 7XXX gibi alüminyum alaşımlarının kaynağında başarı sağlamıştır. SKK'de ergime söz konusu olmadığı için ergitme kaynak yöntemlerinde karşılaşılan ergime sebepli kaynak hataları görülmez. Ayrıca dolgu metali ve koruyucu gaz gerektirmez (İpekoğlu, 2011:34-36). Şekil 1'de şematik olarak sürtünme karıştırma kaynak yönteminin uygulanması gösterilmiştir.



Şekil 1. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin şematik gösterimi (Lomolino vd., 2005:306)

Kaynaklanacak bölge boyunca belirli bir ilerleme ve dönme hızında hareket eden omuz ve pimden oluşur. Alın alına sabitlenmiş levhalar arasında omuz ve pimin oluşturduğu sürtünmeden kaynaklı ısı girdisi mevcuttur. Fakat bu ısı girdisi malzemenin ergitme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıktadır. Bu sayede ergitmenin neden olduğu kaynak hataları oluşmaz ve ısı tesiri altında kalan bölgenin mekanik özellikleri diğer yöntemlere göre daha yüksektir. Batıcı ucun omuz kısmı kaynaklanacak bölge boyunca levhaların yüzeyini sıyırarak ilerler, batıcı ucun malzeme içinde kalan ve pim olarak isimlendirilen kısmı üzerindeki helisel oyuklar yardımıyla plastik deformasyona uğramış malzemeleri karıştırarak birleşmelerini sağlar (İpekoğlu, 2011:35-36).

Sürtünme karıştırma kaynağı havacılık, uzay, gemi inşaatı, raylı taşıt ve otomotiv sanayisinde kullanılan 2XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alüminyum alaşımlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. 7XXX serisi havacılık sanayisinde sıklıkla tercih edilen çökelme yoluyla sertleştirilmiş malzemelerdir. Bu seride yer alan 7075 alüminyum alaşımı düşük özgül ağırlık ve yüksek dayanıma sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde uçak yapısında sıklıkla kullanılır (Çevik vd., 2012:369-370). Dolayısıyla 7075 alüminyum alaşımının kaynağında karşılaşılabilecek hataların minimum seviyede tutulması önem teşkil etmektedir. Sahip olduğu dayanımı, hafifliği, sertliği ve mukavemeti sayesinde 2024 alüminyum alaşımı uçak gövdesi veya kanatlar gibi yapısal elemanlarda sıklıkla tercih edilir. Bu alaşımın uçak sanayisinde çok fazla tercih edilmesinin en önemli sebepleri; kaynak işleminden sonra ısı tesiri altında kalan bölgede oluşacak çatlağın ilerlememesi, yorulmadaki yüksek gerilimin azalması ve uç kısımlarda oluşan zararı minimuma indirmesidir. Bu yüzden kaynak işleminde yüksek ısı girdisi nedeniyle ergitme kaynak yöntemlerinin tercih edilmesi olası değildir. 2024 alüminyum alaşımının birleştirilmesinde katı hal kaynak yönteminin kullanılması büyük bir avantaj sağlamaktadır (Tanrıöver, 2008:1-4).

2024 VE 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK SONRASI ÖZELLİKLERİ

Bu alaşımların kaynağında önceleri TIG gibi gazaltı kaynak yöntemleri kullanılırken, sürtünme karıştırma kaynağının geliştirilmesiyle çalışmalar bu kaynak üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SKK üzerine birçok çalışma bulunmaktadır.

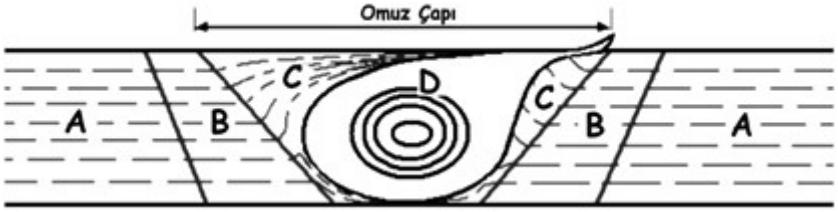
Akça (2006), yaptığı çalışmada 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarını TIG kaynağı kullanılarak küt alın formunda farklı kaynak parametreleriyle birleştirmiş ardından çökelme sertleştirmesi uygulayarak incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda 7075 alaşımının kaynağında yumuşak durumda kaynak yapıldığı zaman, kaynak işlemi nedeniyle gerçekleşen ısı artışı numuneye çözeltiye alma etkisi yapmakta ve yapı içerisindeki bileşikleri soğuma esnasında tane sınırında yoğunlaşmasına

neden olmaktadır. AlZn alaşımı olması nedeniyle, içeriğinde bulunan çinko kaynak bölgesinde gevrekleşmeye sebep olmaktadır. Bunun sonucunda sıcak çatlak oluşumu gözlemlenmektedir. Bu nedenlerle 7075 alaşımı TIG kaynağı ile birleştirilme için uygun olmadığı belirtilmiştir. 2024 alaşımının kaynağında aynı şekilde çökeltilerin tane sınırında biriktiği gözlemlenmiştir. Ancak kaynaklı yapıya tekrar çökelme sertleşmesi uygulandığında tane sınırında biriken bileşikler tekrar malzeme içerisine dağıtılabilmiştir ve sertliğin yükselmesi sağlanmıştır. Bu gözlem sonucunda 2024 alaşımı için şartlar sağlandığında TIG kaynağının kısmen başarılı olabildiği belirtilmiştir. Tablo 5'te TIG kaynak yöntemiyle birleştirilen 2024 ve 7075 alaşımlarının çekme deney sonuçları verilmiştir.

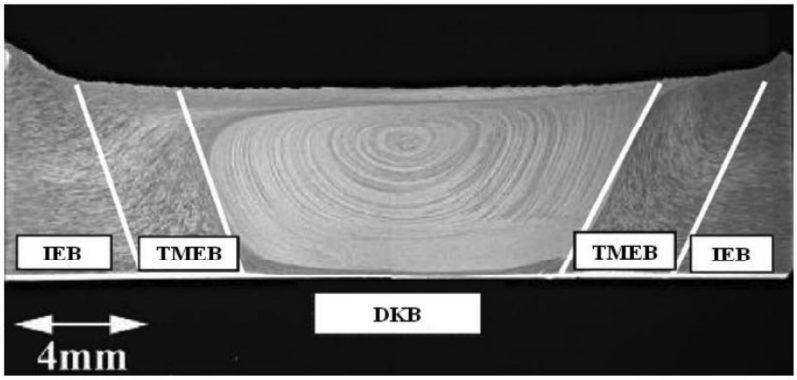
Tablo 5 – 2024 ve 7075 alaşımlarının TIG kaynağı öncesi, sonrası ve ısıl işlem uygulaması sonrası çekme deney sonuçları (Akça, 2006:96)

Malzeme		**E-Modülü MPa**	**Çekme Mukavemeti MPa**	**Kopma Mukavemeti MPa**	**Kopma Uzaması %**
2024	Kaynaksız	496,4	417,18	411,95	14,18
	Isıl işlem uygulanmamış kaynaklı	628,08	100,23	95,03	5,61
	Isıl işlem uygulanmış kaynaklı	1000,37	165,43	154,17	12,18
7075	Kaynaksız	566,17	438,75	438,75	6,80
	Isıl işlem uygulanmamış kaynaklı	480,06	198,61	198,61	5,26
	Isıl işlem uygulanmış kaynaklı	1027	175,64	175,64	5,53

Kaynak bölgesi üç farklı kısımdan oluşur. Bunlar; baz malzeme (BM), ısıdan etkilen bölge (IEB) ve karıştırma bölgesidir (KB). IEB'de yalnızca ısı etkisi mevcuttur. Yaşlandırma sertleştirmesi yapılmış al alaşımlarında ısının etkisiyle IEB'de bir bakıma aşırı yaşlanma ve baz malzemeye göre sertlik kaybı görülür. KB'de ise hem ısı etkisi hem de plastik deformasyon mevcuttur. IEB'de olduğu gibi yaşlandırma sertleştirmesi yapılmış Al alaşımlarında, bu bölgede oluşan ısı sebebiyle aşırı yaşlanma ve/veya partiküllerin çözünmesi ve baz malzemeye göre sertlik kaybı görülür. Al alaşımları gibi yeniden kristalleşmenin kolay olmadığı durumlarda KB iki ayrı kısımdan oluşur. Bunlar; dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) ve termomekanik olarak etkilenen bölge (TMEB)'dir. DKB, kaynak bölgesinin en belirgin kısmıdır. Plastik deformasyonun çok yoğun yaşandığı, yeniden kristalleşmiş ve ince taneli bölgedir (İpekoğlu, 2011:46-47). Sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinin şematik olarak gösterimi Şekil 2'de, mikroyapısal görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Yeniden kristalleşmenin kolay olmadığı durumlarda (örneğin Al-alaşımları), sürtünme karıştırma kaynağı sonrası oluşan kaynak bölgesinin şematik gösterimi : (A) Baz Malzeme, (B) IEB, (C) TMEB, (D) DKB (KB bu durumda B ve C bölgelerinden oluşur) (İpekoğlu, 2011:47)



Şekil 3. Alüminyum alaşımlarında SKK sonrası oluşan kaynak bölgeleri (Mishra ve Mahoney, 2007:158)

Çevik vd., (2012:371-373) yaptığı çalışmada kaynak bölgesindeki sertlik değerlerinin artan kaynak ilerleme hızıyla arttığını söylemiştir. Bunun sebebi olarak kaynak ilerleme hızının artmasıyla kaynak bölgesinde daha az ısı oluşması gösterilmiştir. Yaptıkları çalışmada kaynak bölgesinde oluşan en düşük sertlik değerinin karıştırıcı takımın omuz genişliğine yakın bölgelerde oluştuğunu söylemişlerdir. Aynı çalışmada kaynak işlemi sırasında kaynak dikişi boyunca kök kısımlarında tünel kusurları oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bunun sebebi olarak kaynak ilerleme hızının kaynaklanan malzemeyi yetersiz plastikleştirmesinden oluşabileceğini düşünmüşlerdir. Şekil 4'te deneyde kullandıkları 7075-T651 alüminyum alaşımının farklı hızlarda yapılan kaynakların dağlanmış yüzey görüntüleri ve oluşan tünel kusurları gösterilmiştir.

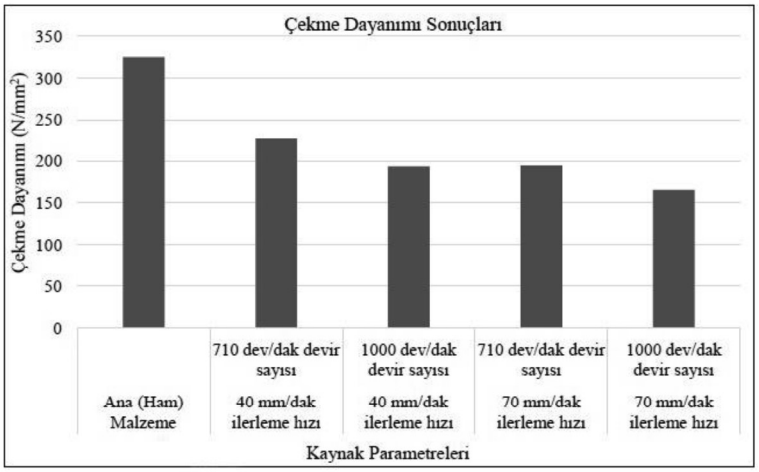


Şekil 4. 900 dev/dk devirde yapılan kaynakların dağlanmış yüzey görüntüleri, (a) 20 mm/dk, (b) 40 mm/dk, (c) 60 mm/dk (Çevik vd., 2012)

Aydın (2008:160-175), yaptığı çalışmada 2024 alüminyum alaşımı gibi daha sert ve mukavemetli malzemelerde yüksek ısı girdisi sağlayacak yüksek dönme hızı ve düşük ilerleme hızı gibi kaynak parametrelerine ihtiyaç duyulduğunu tespit etmiştir. 2024 Al alaşımlarında yüksek ilerleme hızı sebebiyle yeterli ısı sağlanmadığı için kaynak dikişinde hatalar görmüş ve bağlantının zayıf kaldığını dile getirmiştir. Aynı çalışmada SSK yöntemiyle kaynak edilen 2024 Al alaşımlarında T4 durumundaki malzemede mukavemet değerleri %21, kopma uzaması %59; T6 durumundaki malzemede mukavemet değerleri %24, kopma uzaması %72 aralığında azaldığı söylenmiştir. T4 ve T6 durumunda kaynak edilen 2024 Al alaşımlarında çekme deneyi uygulanmış ve kırılmaların KM ve TEB arasındaki yüzeyde oluştuğu söylenmiştir. 2024 Al alaşımlarının korozyona hassasiyeti arttığı görülmüş ve bu durumun yaşlandırma sonucu oluşan çökeltilerden oluştuğu söylenmiştir.

Sönmez ve Başak (2016:31-34), yaptıkları çalışmada 7075 T6 alüminyum alaşımını SSK yöntemi ile birleştirilmesini incelemiştir. Kaynaklanan numunelere çekme testi uygulamış ve düşük ilerleme hızı ile düşük devir sayısının kaynak işlemine olumlu etki gösterdiği ve en iyi kaynak koşullarında yaklaşık %70 dayanım elde edildiğini göstermiştir. Yüksek ilerleme hızı ve yüksek devir sayısında ise çekme dayanımı yaklaşık %50 olarak şekillenmiştir. Yüksek devir sayısı ve yüksek

ilerleme hızının kaynaklamaya olumsuz etki gösterdiği söylenmiştir. Şekil 5'te farklı ilerleme hızı ve farklı devir sayılarında görülen çekme dayanımları sonuçları yer almaktadır.



Şekil 5. Çekme dayanımı sonuçları (Sönmez ve Başak, 2016)

GENEL DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada ulaşım sektöründe, özellikle havacılık ve taşımacılık sanayisinde, hafifliği ve dayanımı sayesinde çok fazla kullanım alanı bulan 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının kaynak yöntemleri incelenmiştir. Günümüzde ergitme kaynak yöntemlerine alternatif olarak sunulan katı hal kaynak yöntemlerinden sürtünme karıştırma kaynağı alüminyum alaşımlarının kaynağında birinci sırada tercih edilmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden biri ergitme kaynak yönteminde olduğu gibi kaynak işlemi sırasında malzemenin ergime sıcaklığının üzerine çıkılmamasıdır ve dolayısıyla malzemenin mekanik özelliklerinin çok fazla etkilenmemesidir. Konu ile ilgili literatür çalışmalarından elde edilen bilgiler ışığında aşağıdaki sonuçlar özetlenmiştir.

- Alüminyum alaşımlarının kaynağında yaşanan olumsuzluklar katı faz kaynağı olan Sürtünme Karıştırma Kaynağının geliştirilmesi ile büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. SKK yöntemi, havacılık endüstrisinde kullanılan MIG, TIG, EBW gibi kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özellikler (çekme ve yorulma dayanımı, çatlak ilerleme hızı, kalıntı gerilme vb.) verdiği rapor edilmiştir.

- Kaynak kalitesi, kaynak takımının geometrik özellikleri ile dönüş hızı ve kaynak ilerleme hızı gibi kaynak proses parametrelerine, kaynak edilecek malzemenin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine, birleştirme şekline bağlı olarak değişmektedir ve bunların optimizasyonu oldukça önemlidir.

- Geleneksel kaynak yöntemleri ile kıyaslandığında SKK yöntemi daha az enerji tüketir. Dolgu metali gerektirmediğinden uyum sorunu yaşanmaz ve koruyucu bir gaz kullanılmadığından çevre dostu bir tekniktir.

- Kaynak işlemi katı faz olduğundan, kaynak birleşim bölgesi çok iyi tanesel yapıda ve metalurjik formdadır. Düşük ısısal girdiden dolayı eğilme ve çatlama olasılığı çok

düşüktür. Birçok kaynak birleşim konfigürasyonunun da kullanılabiliyor olması tekniği ön plana çıkarmaktadır.

- SKK yöntemi ile uygun kaynak parametreleri ile kusursuz kaynak bölgeleri üretimi mümkündür. Kaynak parametrelerinin optimize edilmesi, oluşabilecek kaynak hatalarının saptanabilmesi içinde uygun tahribatsız kaynak tekniklerinin tespitinin önemli olduğu da çalışmalarda vurgulanmıştır.

KAYNAKÇA

Akça, H. (2006). *TIG yöntemiyle kaynak edilen alüminyum ve alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi.

Avas Metal (2007) 2024 Alüminyum (Erişim Tarihi: 26.04.2022) https://www.avasmetal.com.tr/?/aluminyum/2024-aluminyum

Aydın, H. (2008). *Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve korozyon davranışlarının incelenmesi*, Doktora Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Backer, J.D. ve Bolmsjö, G., (2014). Deflection model for robotic friction stir welding, *Industrial Robot: An International Journal*, 41, 4, 365 – 372.

Büyükarslan, S. (2006). *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Cavaliere, P., Cerri, E., ve Squillace, A. (2005). Mechanical response of 2024-7075 aluminium alloys joined by Friction Stir Welding. *Journal of Materials Science*, 40(14), 3669-3676.

Cavaliere, P. ve Panella, F. (2008). "Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024- 7075 sheets joined by Friction Stir Welding ", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 206, 249-255.

Çevik, B., Özçatalbaş, Y., ve Uygur, İ. (2012). 7075 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi. *In International Conference on Welding Technologies* (pp. 369-376).

Dalkılıç, S. (2012). Sürtünme karıştırma kaynağı ve havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulama alanları. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi,* 5 (4), 25-33.

Da Silva, A. A. M., Arruti, E., Janeiro, G., Aldanondo, E., Alvarez, P., ve Echeverria, A. (2011). Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds. *Materials & Design*, 32(4), 2021-2027.

Eşit, F. (2006). *Soğuk ve sıcak haddelenmiş alüminyum 6016 alaşımlarının kaynak davranışları ve kalıntı gerilme analizi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gülbudak, M. (2013). *Farklı alüminyum levha çiftinin sürtünme karıştırma kaynak özellikleri.* Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

İpekoğlu, G. (2011). *Kaynak sonrası ısıl işlemin sürtünme karıştırma kaynaklı AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımı levhalarda içyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Lomolino, S., Tovo, R., ve Dos Santos, J. (2005). On the fatigue behaviour and design curves of friction stir butt-welded Al alloys. *International Journal of Fatigue*, 27(3), 305-316.

Mishra, R.S. ve Mahoney, M. W. (2007). Mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys. *Joining of Advanced and Specialty Materials*, 157-159.

Mishra, R. S., Mahoney, M. W., Sato, Y., Hovanski, Y., ve Verma, R. (Eds.). (2011). *Friction stir welding and processing* VI. John Wiley & Sons.

Ozan, C. (2019). *Alüminyumun kaynağında kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Rajakumar, S., Muralidharan, C., ve Balasubramanian, V. (2011). Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549.

Sarsılmaz, F., Ozdemir, N., ve Kirik, I. (2012). Evaluation of microstructure and fatigue properties of dissimilar AA7075/AA6061 joints produced by friction stir welding. *Kovove Mater*, 50, 259-268.

Sönmez, F., ve Başak, H. (2016). Sürtünme karıştırma kaynağının yaşlandırılabilir parçalar üzerinde etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS1), 29-34.

Sönmez, F., ve Başak, H. (2017). Al-7075-T6 malzemenin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 599-608.

Taban, E. ve Kaluç, E. (2005) EN AW-5083-H321 alüminyum alasımının MIG, TIG ve sürtünme karıştırma kaynaklı (FSW) bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelikleri, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 46, 541, 40- 51.

Tanrıöver, L. (2008). *AA5052/2024 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yalçın, E. D. (2010). *AA7075 ve AA5754 alüminyum alaşımların sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.