

# Soğuk Şekil Verilmiş Alüminyum Malzemelerinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi Üzerine Deneysel Bir Çalışma

**Mümin ŞAHİN**

*Yrd. Doç. Dr., Üniversitesi Müh-Mim Fakültesi Makina Müh. Bölümü*

**H. Erol AKATA**

*Prof. Dr., Trakya Üniversitesi Müh-Mim Fakültesi Makina Müh. Bölümü*

**Kaan ÖZEL**

*Araş. Gör., Trakya Üniversitesi Müh-Mim Fakültesi Makina Müh. Bölümü*

## ÖZET

Bu çalışmada, aşırı plastik deformasyona uğramış 5083 alüminyum alaşımına sürtünme kaynağı uygulandıktan sonra mekanik özelliklerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Aşırı plastik deformasyon yöntemleri, eşit kanal açılmal basma (eşit dik kesitli yanıl ekstrüzyon), çevrimsel ekstrüzyon - basma şeklinde sınıflandırılabilir. Çalışmada, deneysel malzeme olarak 5083 Alüminyum alaşımı ve aşırı plastik deformasyon için kare kesitli eşit kanal açılmal basma kalıbı kullanılmıştır. Deneysel olarak öncelikle 5083 alaşımının satın alınmış şekli ile hazırlanmış numuneler, sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynak için gerekli olan sürtünme süresi, yığıma süresi, sürtünme basıncı ve yığıma basıncı için optimum parametreler elde edilmiştir. Daha sonra satın alınan 5083 alüminyum malzemeler kare kesit haline getirilerek, numunelere eşit kanal açılmal basma kalıbı yardımıyla bir kademe aşırı plastik deformasyon uygulanmıştır. Kare şeklinde elde edilen parçalar, talaşlı şekil verme ile dairesel hale getirilerek laboratuvar şartlarında önceden tasarlanan ve imal edilen klasik sürtünme kaynak tesisatında birleştirilmiştir. Son olarak optimum şartlarda elde edilen parçaların çekme dayanımları ile satın alındığı gibi birleştirilen parçaların çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Aşırı plastik deformasyon, sürtünme kaynağı, 5083 alüminyum alaşımı, çekme deneyi

## ABSTRACT

In this study, 5083 aluminium alloys were the severe plastic deformed and, later, the parts were joined friction welding method. And, the mechanical properties of the joints have been experimentally investigated. Severe plastic deformation methods can be classified as Equal Channel Angular Pressing (Equal Cross Section Lateral Extrusion) and Cyclic Extrusion - Compression. 5083 aluminium alloy as test material and square cross - sectional equal channel angular pressing die for severe plastic deformation have been used in the study. Firstly, 5083 alloy as purchased has been joined with friction welding method. The optimum parameters for friction time, upset time, friction pressure and upset pressure, necessary for welding, have been obtained. Afterwards, 5083 aluminium materials as purchased have been prepared as square cross - section and, then, 1 pass severe plastic deformation has been applied to specimen by equal channel angular pressing die. Obtained parts as square form were prepared as cylindrical form by machining and, then, the parts were joined by continuous drive friction welding equipment that was designed and produced in laboratory conditions before. Finally, the tensile strengths of the parts obtained at optimum conditions were compared with those of the joined parts as purchased form. Then, obtained results were commented on.

**Keywords:** Severe plastic deformation, friction welding, 5083 aluminium alloy, tensile test

## ÇENTİK ETKİSİ

Genellikle, herhangi bir makine elemanı farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilebilir. Bu durumda hangi yöntemle karar verileceği malzeme, beklenen mukavemet, parça sayısı, maliyet gibi faktörler dikkate alınarak belirlenir. Buna karşılık parçayı tek bir yöntemle elde etmek yerine birbirini takip eden birden çok üretim yönteminin kombinasyonunu kullanmak tercih edilebilir. Bu tür bir yaklaşım bazı durumlarda ekonomik bir çözüme varılmasını sağlayabilir.

## AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON

Metalsel malzemeler katı fazda iken belirli, bir düzen gösteren kristal yapısına sahiptir. Metalin sıvı durumdan katı faza geçişi esnasında atomlar malzemenin iç yapı özelliğine göre sıralanmaktadır. Burada, en küçük yapı elemanı olan birim kafes tekrarlanmak suretiyle kristal yapısı oluşmaktadır. Geleneksel olarak metallere plastik şekil verme yöntemleri; yığıma, dövme, haddelme, ekstrüzyon, soğuk çekme, boru imali, sac malzemelere şekil verme şeklinde sınıflandırılabilir.

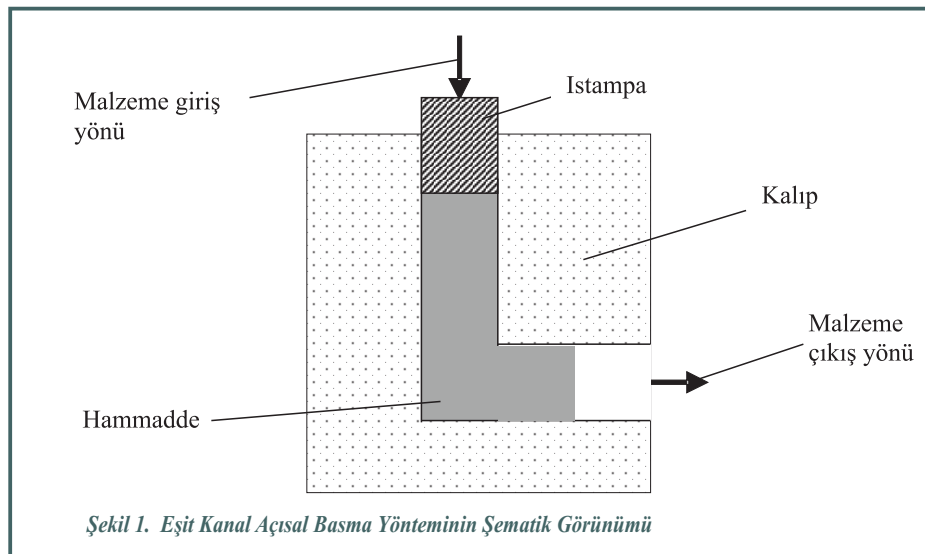
Metalik malzemelerde mekanik özellikleri yükseltmek için çok ince boyutlu tane (ultra-fine-grain) yapısına ulaşmanın iki yolu bulunmaktadır. Bunlar, düşük sıcaklıkta (yeniden kristalleşme sıcaklığının altında) şiddetli plastik deformasyon ve toz metalurjisi yöntemleridir.

Aşırı plastik deformasyon bir diğer adıyla şiddetli plastik deformasyon, bir metalik malzemenin düşük sıcaklıklarda (erime sıcaklığının 0.3 katının altında) yüksek miktarlarda plastik genlemeye maruz bırakılarak plastik deformasyona uğraması olarak bilinir. Şiddetli plastik deformasyon, kaba taneli mikro yapıların, hücre blokları ve dislokasyon hücrelerinin hiyerarşik bir sistem haline ayrılmasına öncelik eder. Malzemenin zorlanmasının artması ile birlikte, mikro yapısal boyutları aynı miktarda azalır. Malzeme işlemlerinin geleneksel yöntemleri, malzemenin yüksek genlemede hasarsız şekilde şekil değiştirmesine olanak sağlamaz.

Aşırı plastik deformasyonun tüm çeşitlerinin en belirleyici özelliği, aşırı plastik deformasyon işleminden sonra malzemenin kesit alanının sabit kalmasıdır. Bu nedenle kesit değişimi olmaksızın yüksek miktarlarda plastik deformasyon mümkündür. Çünkü bir numune, plastik genlemenin toplam miktarında çoğalması için birçok defa aşırı deformasyona maruz bırakılabilir.

#### Aşırı plastik deformasyon yöntemleri

1. Eşit kanal açısıl basma ( Equal Channel Angular Pressing - ECAP), (diğer adıyla eşit dik kesitli yanal ekstrüzyon (Equal Cross Section Lateral Extrusion - ECSLE))
2. Çevrimsel ekstrüzyon ve basma (Cyclic Extrusion Compression - CEC ) şeklinde sınıflandırılabilir ve çok ince yapılı malzemeler elde edilebilir. Bu yöntemlerde,



deformasyona uğrayan ürünün giriş ve çıkış kesitlerinin ölçüleri değişmemektedir.

#### Eşit Kanal Açısıl Basma

Eşit kanal açısıl basma yönteminde aşağıda Şekil 1'de görüldüğü gibi birbirini 90° açı ile kesen iki eşit boyutlu kanal vardır. Burada hammadde istenen kanalın bir tarafından bir istampa ile basınç uygulanarak bastırılıp boyutları değişmeden diğer ucundan çıkartılır. Bu sırada malzeme kayma deformasyonuna uğramaktadır. Genleme miktarını dolayısı ile plastik deformasyonu artırmak için proses birkaç kez tekrarlanabilir.

Eşit dik kesitli yanal ekstrüzyon ise eşit kanal açısıl basmanın özel bir halidir. Bu yöntemde birbirini 90° açıdan daha büyük açıda kesen iki kanal vardır. Bu kanalın bir S harfi şeklinde olup açısının kanalın her iki ucunda aynı olması hali ise S tipi eşit dik kesitli yanal ekstrüzyon olarak adlandırılır. Burada da malzeme kanalın bir ucundan istampa vasıtası ile bastırılıp diğer ucundan deforme edilmiş ancak boyutları değişmemiş olarak çıkartılır. Toplam genleme miktarını artırmak için proses birkaç kez tekrarlanabilir (Özel, 2005).

#### Çevrimsel Ekstrüzyon ve Basma

Çevrimsel ekstrüzyon ve basma yönteminde ise malzeme bir kalıptan birkaç kez geçirilerek hem ekstrüze edilir hem de basılır. Böylece plastik şekil verme miktarı artırılır.

## SÜRTÜNME KAYNAĞI

Bilindiği gibi sürtünme kaynağı; parçaların ara yüzeylerinde sürtünme yoluyla oluşturulan mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen ısı yardımıyla gerçekleştirilen bir kaynak türüdür. Genel olarak sürtünme kaynağı eksensel simetriye sahip ve daire kesitli parçaların birleştirilmelerinde

kullanılmasına rağmen cihazların otomasyonu ve bilgisayarlı kontrol olanaklarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılabilir. Ayrıca, bu kaynak yönteminde malzeme ve enerji tasarrufu sağlamak gibi önemli bir avantaja da sahip olduğu için gittikçe artan oranlarda tercih edilmektedir. Yine bunlara ek olarak sürtünme kaynağıyla aynı veya farklı malzeme türleri, eşit veya farklı kesitli parçaların birleştirilmesi de kolaylıkla gerçekleştirilmektedir.

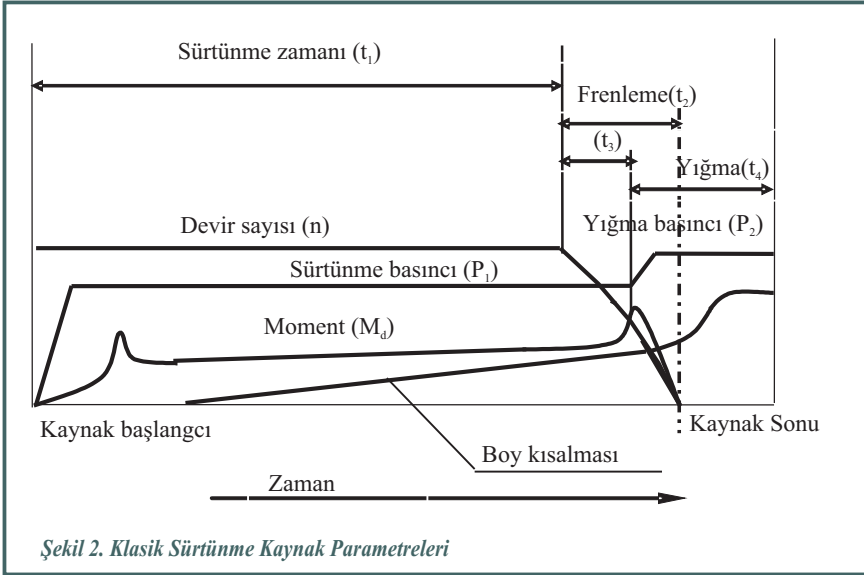
Sürtünme kaynağında parametrelerin belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu kaynak türündeki en önemli parametreler; sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığıma süresi, yığıma basıncı ve devir sayısı olarak sayılabilir. Parçalar kaynak edilirken birleştirilecek parçaların yüzeylerinin de yağ ve oksitten arındırılması kaynak yapılırken olumlu bir işlem olacaktır.

Sürtünme kaynak yöntemi genel olarak;

- Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı
  - Volanlı (Atalet) Sürtünme Kaynağı
- şeklinde ikiye ayrılabilir.

### Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı

Birleştirilecek parçalardan biri eksenini etrafında döndürülürken diğeri ise aksenal yönden hareketli olarak dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç arttırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır. Açıklamadan da anlaşılacağı gibi basınç iki kademeli olarak uygulanmaktadır. Basıncın birinci kademesine "Isınma veya Sürtünme Basıncı" ve ikinci kademesine de "Yığıma veya Dövme Basıncı" denir. Şekil 2' de bu yöntemin parametreleri verilmektedir.



Şekil 2. Klasik Sürtünme Kaynak Parametreleri

### Volanlı (Atalet) Sürtünme Kaynağı

Bu yöntemde bir volandaki kinetik enerjiden yararlanılır. Volan, işlemden önce belli bir devir sayısına getirilerek tahrik motoru devreden çıkarılır. Birleştirilecek parçaların birbirine bastırılmasıyla sürtünen yüzeyler ısınır ve kaynak edilir. Volan ise gittikçe artan bir şekilde yavaşlar ve durur. Ancak bundan sonra basınç (p) ve sıcaklık (T) azalmaya başlar ve

moment ( $M_d$ ) ile devir sayısı (n) birlikte sıfıra erişir. Boy kısalması ( $\Delta l$ ) ise eriştiği değerde kalır. Burada önceki proste görülen dövme zamanı  $t_d$  yoktur. Bu nedenle volanlı sürtünme kaynağı işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir (Anık, 1993, Şahin, 2001).

Eşit kanal açılmal basma işlemi, 1980'lerin başında Segal ve arkadaşları (1981) tarafından bulunmuş ve son yıllardaki yoğun çalışmaların konusu olmuştur. Bu işlemde malzemenin dış kesit alanı değişmeden büyük plastik deformasyonlar meydana gelmektedir.

Liu Z., ve Wang Z., tarafından 1999 yılında yapılmış olan çalışmada eşit dik kesitli yana ekstrüzyon (ECSLE) yükünün sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Lee, D.N., 2000 yılında kanal açılmal şekil değişiminin bir üst sınır çözümü üzerine bir çalışma yapmıştır. Horita Z., Fujinami T., Nemoto M., Langdon T.G., 2001 yılında alüminyum alaşımları için eşit kanal açılmal basma yönteminin kullanılarak mekanik özelliklerinin geliştirilmesi hakkında yaptıkları çalışmada, farklı alüminyum alaşımları olan 1100, 2024, 3004, 5083, 6061 ve 7075'i incelemişlerdir. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C., 2002 yılında aşırı plastik deformasyon ile işlenmiş malzemelerde dayanım ve sünekliğin paradoksu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Ivanisenko Y., Wunderlich

R.K., Valiev R.Z., Fecht H.-J., 2003 yılında aşırı plastik deformasyonla üretilen nano yapıları karbon çeliğinin tavlama davranışını araştırmışlardır. Alkorta J., Sevilano J.G., 2003 yılında eşit kanal açılmal basmanın sonlu elemanlar metodu ve üst sınır tipi analizinin bir karşılaştırmasını incelemişlerdir.

Ayrıca, sürtünme kaynağı ile ilgili araştırmalar 1970'lerden sonra başlamış hızlı bir ivmelenme göstermiştir. Kinley W. (1979) ve Anık S. (1993) sürtünme kaynağı hakkında bilgi vermişlerdir. Yılmaz M. (1993) ve Şahin M. (2001) sürtünme kaynağının çeşitli çeliklere uygulanışını ve sonuçlarını incelemişlerdir. Murti ve arkadaşları (1983) sürtünme kaynağında

önemli bir yer tutan parametreleri, istatistik analiz yardımıyla bulmuşlardır. Şahin M. ve Akata H.E. (2003) çalışmalarında sürtünme kaynağıyla ilgili çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Şahin M. (2004, 2005) sürtünme kaynağının simülasyonu ile yüksek hız çeliği ve orta karbonlu çeliğin sürtünme kaynağı ile ilgili araştırmalar yapmışlardır.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### Materyal ve Metot

Bu çalışmada, öncelikle satın alınan 5083 alüminyum parçalar hiçbir plastik deformasyona uğramadan sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve optimum kaynak parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra satın alınan parçalardan bir bölümü bir kademe aşırı plastik deformasyona maruz bırakılmıştır. Deformasyon için gerekli olan eşit kanal açısız basma için kalıp hazırlanmıştır. Bu tip işlem bir düzlem

### Eşit Kanal Açısız Basma İçin Kalıp Tasarımı

Bu çalışmada, eşit kanal açısız basma için kalıp hazırlanacağı bir önceki bölümde belirtilmişti. Talaşlı işlenmesi kolay olduğundan dolayı kare kalıp işlenmiştir ve piyasadan alınan alüminyum alaşımları bir kez deforme edilecektir. Deformasyon için 150 tonluk bir hidrolik pres kullanılmıştır. Yine deney için kullanılan kalıbın fotoğrafı Şekil 3'te verilmektedir.

Piyasadan alınan 5083 Alüminyum malzeme, freze yardımı ile yapılacak deneyler için yeterli sayıda, kesiti içi dolu kare

Tablo 1. 5083 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Bileşimi (ASM, 1985)

Malzeme	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Ti	Diğerleri	
										% Her biri	% Toplam
AA 5083	0.40	0.40	0.10	0.30	4.0	0.05	–	0.25	0.15	0.05	0.15
				1.0	4.9	0.25					

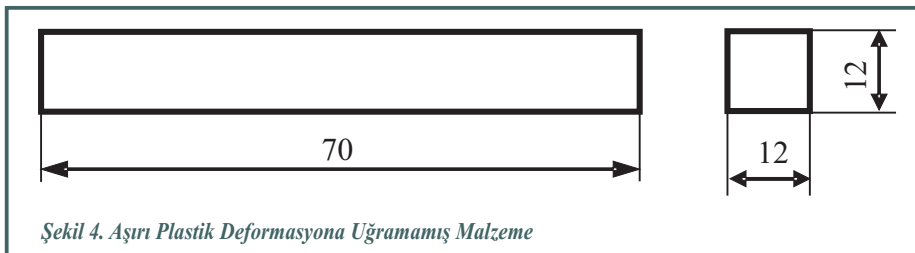
genleme işlemi olduğu için deforme edilen malzemenin kesitinin daire, kare veya herhangi bir şekil olması önemli değildir. Bu amaçla talaşlı işlenmesi kolay olması için kare kalıp işlenecek ve piyasadan alınan alüminyum alaşımları deforme edilecektir. Daha sonra elde edilen parçalar önceden belirlenen optimum parametrelerle sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirileceklerdir.

### Malzeme Seçimi

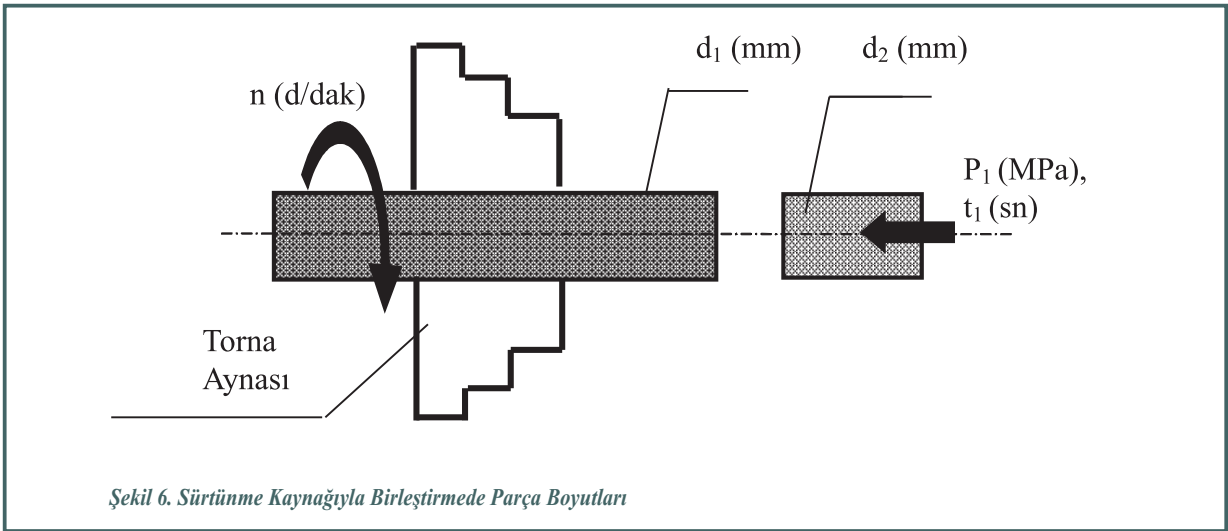
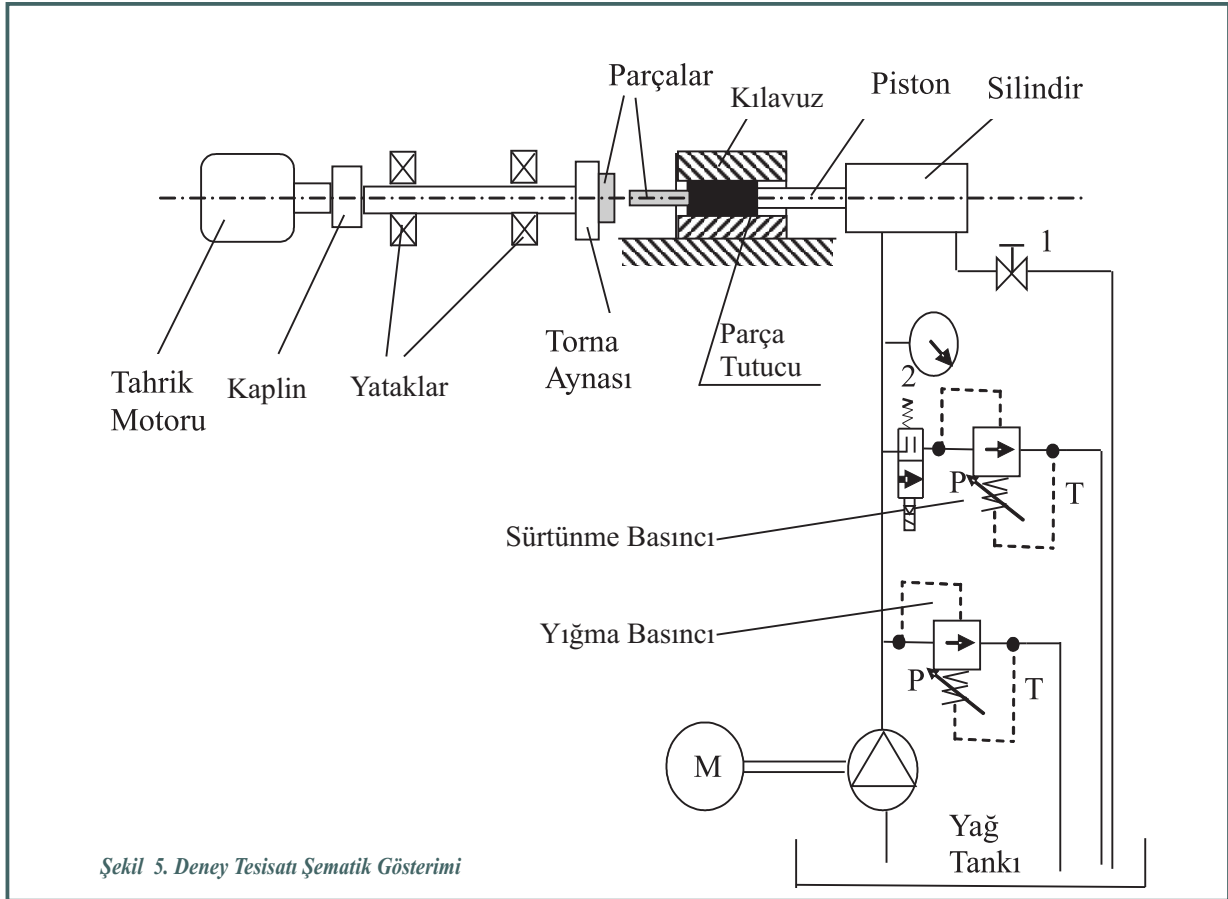
Bu çalışmada, alüminyum alaşımlarına şiddetli plastik deformasyon uygulanarak mekanik özelliklerin değiştirileceği daha önceden belirtilmişti. Alüminyum alaşımları şiddetli plastik deformasyona uygun olduğundan, fiziksel özelliklerinden ve piyasada kolay bulunabildiğinden dolayı bu çalışma için seçilmiştir. Magnezyum miktarı fazla olduğundan dolayı bu çalışmada kullanılacak malzeme 5083 olarak belirlenmiştir. Bu malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 3. Deneyde Kullanılan Kalıbın Fotoğrafi



Şekil 4. Aşırı Plastik Deformasyona Uğramamış Malzeme



profil olacak şekilde işlenmiştir. Freze ile işlenmiş numunenin teknik resmi şekil 4' de verilmiştir.

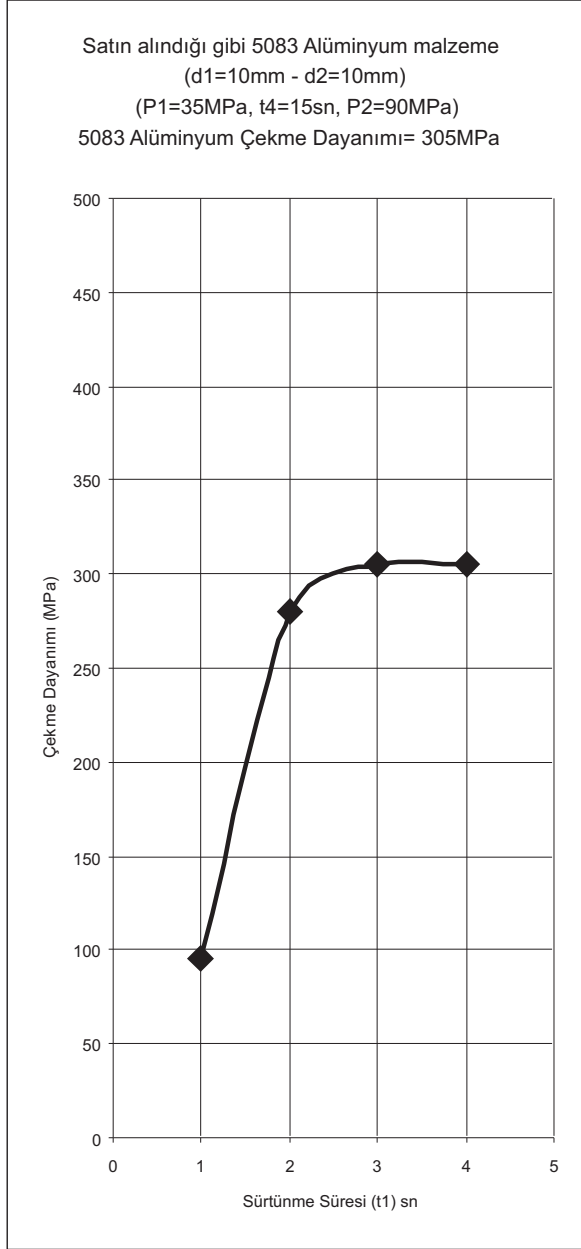
#### Sürtünme Kaynak Deneyi

Bu çalışmada laboratuvar şartlarında oluşturulan bir klasik sürtünme kaynak düzeneği kullanılmıştır. Bu düzeneğin şematik şekli Şekil 5' te verilmiştir (Şahin, 2001).

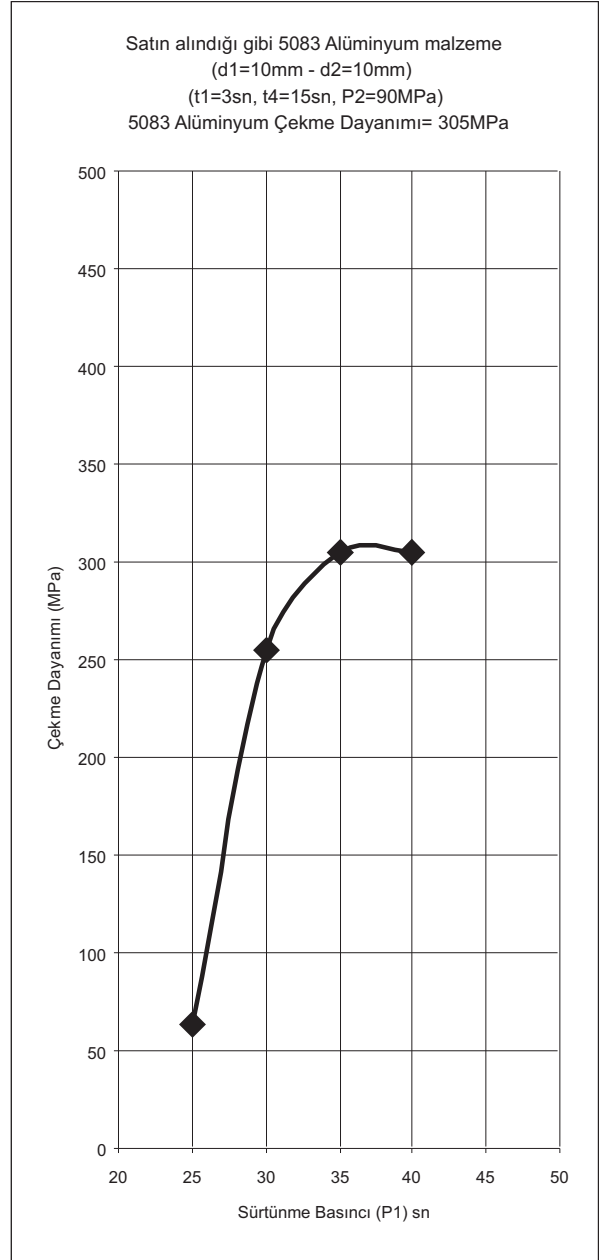
Çalışmada, Şekil 6' da boyutları tanımlanan iş parçalarının sürtünme kaynağıyla birleştirilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmada  $d_1$  ve  $d_2$  eşit tutulmuş ve 10mm olarak alınmıştır.

## DENEYSEL SONUÇLAR

Yukarıda açıklanan prosedüre göre pilot deneylerde satın alındığı gibi talaşlı şekil verme ile işlenerek silindirik hale getirilen ve birleştirilen alüminyum alaşımlarının çekme dayanımları incelenmiştir. Hesaplanan çekme dayanımlarının, sürtünme süresi ve sürtünme basıncına göre değişimi Şekil 7 ve 8' deki diyagramlarda verilmiştir. Kaynaklı birleştirme ile elde edilen parçaların benzerleri talaşlı şekil verme yoluyla işlenmiş ve bu parçaların çekme dayanımları da



Şekil 7. Sürtünme Süresinin Çekme Dayanımına Etkisi



Şekil 8. Sürtünme Basıncının Çekme Dayanımına Etkisi

ölçülerek ortalamaları, diyagramlarda “malzeme çekme dayanımı” olarak belirtilmiştir.

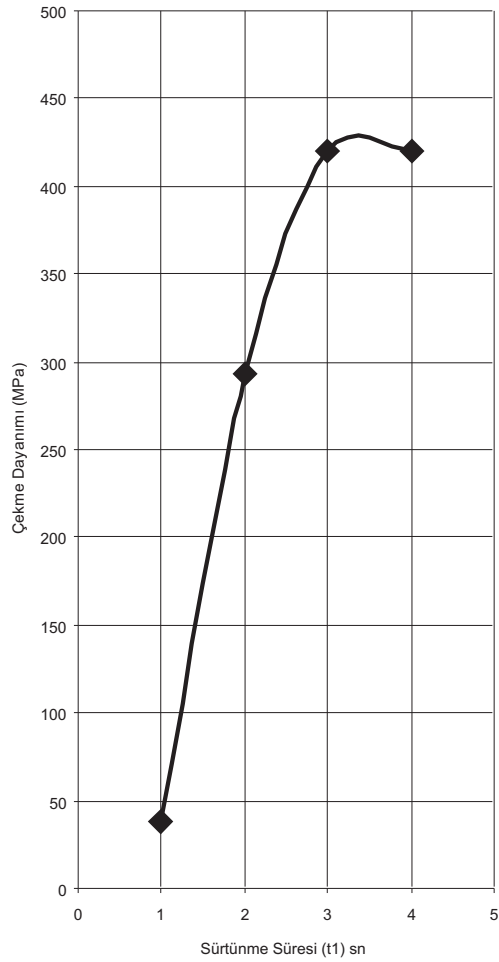
Şekil 7 ve 8'de verilen diyagramlardan görüldüğü gibi birleştirmelerin dayanımı sürtünme süresiyle ve sürtünme basıncıyla birlikte artmaktadır. Ayrıca her iki şekilden, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi için en yüksek mukavemetin elde edildiği değerler optimum değer olarak kabul edilmiştir ( $t_1=3$  sn ve  $P_1=35$  MPa).

Daha sonra bir kademe aşırı plastik deformasyona uğratan ve silindirik hale getirilen ardından sürtünme kaynak

yöntemiyle birleştirilen alüminyum alaşımlarının çekme dayanımları incelenmiştir. Hesaplanan çekme dayanımlarının, sürtünme süresi ve sürtünme basıncına göre değişimi Şekil 9 ve 10'daki diyagramlarda verilmiştir.

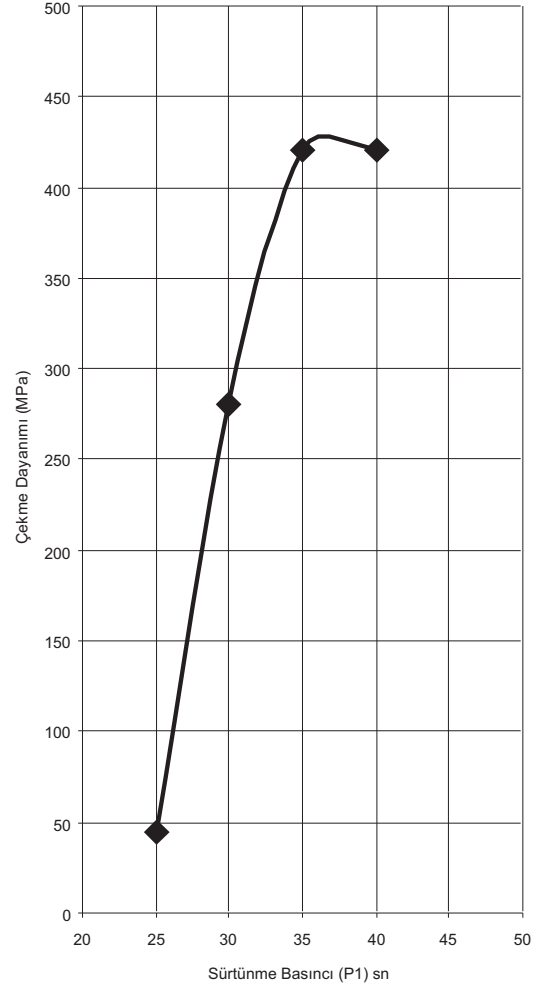
Şekil 9 ve 10'da verilen diyagramlardan görüldüğü gibi birleştirmelerin dayanımı sürtünme süresiyle ve sürtünme basıncıyla birlikte artmaktadır. Ayrıca her iki şekilden, sürtünme basıncı ve sürtünme süresi için en yüksek mukavemetin önceki parametrelere uygun olarak elde edildiği görülmektedir.

Aşırı Plastik Şekil Değiştirmiş 5083 Alüminyum malzeme  
(d1=10mm - d2=10mm)  
(P1=35MPa, t4=15sn, P2=90MPa)  
5083 Alüminyum Çekme Dayanımı= 420MPa



Şekil 9. Sürtünme Süresinin Çekme Dayanımına Etkisi

Aşırı Plastik Şekil Değiştirmiş 5083 Alüminyum malzeme  
(d1=10mm - d2=10mm)  
(t1=3sn, t4=15sn, P2=90MPa)  
5083 Alüminyum Çekme Dayanımı= 420MPa



Şekil 10. Sürtünme Basıncının Çekme Dayanımına Etkisi

## TARTIŞMA

Bu çalışmada, satın alındığı gibi ve bir kademe aşırı plastik deformasyona uğramış alüminyum malzemelerin sürtünme kaynağıyla birleştirildikten sonra çekme dayanımları incelendiğinde, sürtünme süresi ve sürtünme basıncı arttıkça birleştirmelerin çekme dayanımının da arttığı görülmüştür. Yine yapılan incelemelerde, satın alınan 5083 alüminyum parçalarının çekme dayanımı değerleri yaklaşık olarak 305MPa iken, bir kademe aşırı plastik deformasyona uğratılmış 5083 alüminyum parçalarının çekme dayanımı değerleri yaklaşık olarak 420MPa olarak bulunmuştur. Bu da

çeşitli literatürlerde verildiği üzere, soğuk şekil vernenin parçalara kattığı bir özelliktir. Ayrıca, satın alınıp birleştirilen ve bir kademe aşırı plastik deformasyona uğratılıp optimum parametrelerde birleştirilen parçalar çekme deneyine tabi tutulduğunda parçalar kaynak dışından esas malzemeden kopmuşlardır. Aşırı plastik deformasyona uğramış malzemelerin kaynağıyla elde edilen birleştirmelerin kaynak mukavemeti de malzemenin deformasyon sonrası mukavemetine yakın çıkmıştır. Bu da parametrelerin doğru bulunduğunu ve kaynak mukavemetinin yeterli olduğunu göstermektedir.

Yine aynı diyagramlar, çekme dayanımının belirli bir sürtünme basıncı veya sürtünme süresinin ötesinde sabit kaldığını göstermektedir. Bu durumdaki çekme dayanımı değerleri, hem satın alındığı gibi 5083 alüminyum malzemesinin hem de bir kademe aşırı plastik deformasyona uğratılmış 5083 alüminyum malzemesinin çekme dayanımı değerine yakın çıktığı için bağlantı mukavemeti sabit olarak diyagramlarda gösterilmiştir. Bu nedenle, optimum parametre noktasından sonraki değerleri kullanmanın fazla bir anlamı yoktur. Çünkü, gereksiz malzeme ve enerji kaybı olmaktadır.

Ayrıca, aşırı plastik deformasyona uğrayarak ve uğramadan birleştirilen 5083 malzemelerin mikro yapı ve sertlik dağılımına ait çalışmalar devam etmektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, çalışmayı destekleyen Trakya Üniversitesi ve Hema Endüstri A.Ş.'ye teşekkür eder.

## KAYNAKÇA

1. **Akata E. H., Şahin M.**, 2003, An Investigation on the Effect of dimensional Differences in Friction welding of Aisi 1040 specimens, *Industrial Lubrication & Tribology*, Volume 55, Number 5, pp: 223-232
2. **Alkorta J., Sevillano J. G.**, 2003, A comparison of FEM and upper-bound type analysis of equal-channel angular pressing (ECAP), *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 313-318
3. **Anık S.**, 1993, *Kaynak Teknolojisi El Kitabı*, Birsen Yayınevi, İstanbul
4. **ASM**, 1985, *ASM Metals Handbook Properties and Selection of Metals*, Volume 1, 8th Edition, pp: 917, Metals Park, Ohio
5. **Horita Z., Fujinami T., Nemoto M., Langdon T. G.**, 2001, Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing, *Journal of Materials Processing Technology*, 117, 288-292
6. **Ivanisenko Y., Wunderlich R. K., Valiev R. Z., Fecht H. -J.**, 2003, Annealing Behaviour of Nanostructured Carbon Steel Produced by Severe Plastic Deformation, *Scripta Materialia*, 47, 947-952
7. **Kinley W.**, Oct. 1979, Inertia Welding: Simple in Principle and Application, *Weld. And Met. Fab.*, pp: 585-589
8. **Lee D. N.**, 2000, An Upper-Bound Solution of Channel Angular Deformation, *Scripta Materialia*, 43, 115-118
9. **Liu Z., Wang Z.**, 1999, Finite-element Analysis of the Load of Equal-Cross-Section Lateral Extrusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 94, 193-196
10. **Murti K. G. K.**, Sundaresan S, June 1983, Parameter Optimization in Friction Welding Dissimilar Materials, *Met. Const.*, pp: 331-335
11. **Özel K.**, 2005, Aşırı Plastik Deformasyon Metotlarının Alüminyum Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y. Lisans Tezi, Edirne
12. **Segal V. M., Reznikov V. I., Drobyshevkiy A. E., Kopylov, V. I.**, 1981, *Metally*. 1, 115, [English translation: *Russian Metallurgy* 1, 99]
13. **Şahin M.**, 2001, Sürtünme Kaynağı ile Birleştirmede Parça Boyutları ve Plastik Şekil Değiştirmenin Etkilerinin Araştırılması, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Edirne
14. **Şahin M., Akata, H. E.**, 2003, Joining with Friction Welding of Plastically Deformed Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 142, Issue 1, pp: 239-246
15. **Şahin M., Akata, H. E.**, 2004, An Experimental Study on Friction Welding of Medium Carbon and Austenitic Stainless Steel Components, *Industrial Lubrication & Tribology*, Volume 56, Number 2, pp: 122-129
16. **Şahin M.**, 2004, Simulation of Friction Welding Using A Developed Computer Program, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 153-154, pp: 1011-1018
17. **Şahin M.**, 2005, Joining with Friction Welding of High-Speed Steel and Medium-Carbon Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, In Press
18. **Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Zhu Y. T., Lowe, T. C.**, January 2002, Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed by Severe Plastic Deformation, *Journal of Materials Res. Vol. 17, No. 1*, 5-8
19. **Yılmaz M.**, 1993, Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul