

YENİDEN ÇÖZELTİYE ALMA PARAMETRELERİNİN 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SERTLİK VE AŞINMA DAVRANIŞLARINA ETKİSİ

Ramazan YILMAZ^a, Dursun ÖZYÜREK^b, Erkan KİBAR^c

^aSakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Esentepe Kampüsü, 54187, SAKARYA,

^bKarabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK,

^cSakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı Esentepe Kampüsü, 54187, SAKARYA,

ryilmaz@sakarya.edu.tr, dozyurek@karabuk.edu.tr, erkan_kibaroglu@hotmail.com

(Geliş/Received: 22.06.2011; Kabul/Accepted: 14.10.2011)

ÖZET

Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımlarında yeniden çözeltilmeye alma ve yeniden yaşlandırma (RRA) ısıl işlemleri çalışıldı. Halihazırda T6 yaşlandırma işlemi uygulanmış alüminyum alaşımları 180–260°C sıcaklık aralığında 15-75 dakika sürelerde yeniden çözeltilmeye alınmış ve daha sonra 120°C’ de 24 saat süre bekletme şartlarında (T6) yeniden yaşlandırılmıştır. RRA ısıl işlemi yeniden çözeltilmeye alma süresi ve sıcaklıkları değiştirilerek bu parametrelerin 7075 alüminyum alaşımlarının sertliklerine ve aşınma davranışlarına etkileri incelenmiştir. Aşınma deneylerinde pin-on-disk yöntemi uygulanan cihaz kullanılmıştır. Aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılması için aşınan yüzeyler tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonunda yeniden çözeltilmeye alma sıcaklığı ve süresi alaşımın sertliğini ve aşınma direncini etkilediği görülmüştür. Aşınma direnci ile sertlik değerleri arasında sıkı ilişki bulunmakta ve sertlik değerleri sıcaklığa ve süreye bağlı olarak değişmektedir. En yüksek sertlik ve aşınma direncini 220°C’ de 60 dakika yeniden çözeltilmeye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşım göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, yaşlandırma, 7075, aşınma, sertlik, yeniden çözeltilmeye alma ve yeniden sertleştirme (RRA).

THE EFFECTS OF RETROGRESSION PARAMETERS ON HARDNESS AND WEAR BEHAVIOURS OF 7075 ALUMINIUM ALLOYS

ABSTRACT

In this study, retrogression and re-aging (RRA) treatments on 7075 aluminium alloys has been carried out. 7075 aluminium alloys that were already T6 temper applied were retrogressed at the range of 180-260°C for durations between 15-75 minutes and later re-aged in T6 aging condition of 120°C for 24 hours. The effects of retrogression temperature and times on the hardness and wear properties were investigated. Wear tests were carried out by using machine that is for pin on disc technique. Worn surfaces of the samples after tests were also examined by scanning electron microscopy (SEM) for better understanding of wear mechanism. Experimental studies show that retrogression treatments parameters such as temperatures and times have great effects on wear resistance of 7075 aluminium alloys. Close relationship between the hardness and wear resistance values were seen in those alloys. Variations in hardness values were all depend on retrogression temperatures and times. The alloy retrogressed at 220°C for 60 minutes showed the highest hardness values and wear resistance.

Keywords: Aluminium, aging, 7075, wear, hardness, retrogression and re-aging (RRA)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alaşımları diğer malzemelere göre düşük yoğunluk, iyi korozyon direnci, işlenebilme, elektrik iletimi gibi birçok mükemmel özelliklere sahip olduğundan uçak ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Uçak ve otomotiv endüstrisinde yüksek dayanıma sahip hafif metallerin kullanılması gerekmektedir [1-3]. 7xxx serisi alüminyum alaşımları % 4-8 Zn ve % 1-3 Mg içermekte ve diğer alüminyum alaşımlarına oranla daha yüksek sertlik ve dayanıma sahip olduğundan uçak, uzay ve otomotiv sektörü için ideal malzemelerdir [2-7]. Bu elementlerden çinko ve magnezyum alüminyum içerisinde yüksek oranda çözünebildiğinden çökelti mukavemetinin artırılması sağlanmaktadır. Bu alaşımlara ilave edilen bakır ise dayanım değerlerinin bir miktar daha artırılmasını sağlamaktadır. Uçakların imalatında hem çok dayanıklı hem de hafif olan yüksek performanslı malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bu malzemeler çalışma şartlarında karşılaşılan farklı yükler sonucu yorulma, ortam şartlarının etkisi ile korozyon, güç sistemlerindeki ani sıcaklık değişimleri ile termal şoka maruz kalmaktadır [5-7]. Yorulma çatlaklarının oluşması ve ilerlemesi uçak tasarımında en önemli hususlardan biridir. Örneğin birden fazla yorulma çatlaklarının oluşması ve ilerlemesi ile meydana gelen çoklu kırılmalar sonucu 29 Nisan 1988'de Aloha Airlines'in Boeing 737 uçağının uçuşu esnasında gövdenin üst bölümünün büyük bir kısmı uçaktan ayrılmıştır [5,6].

Metaller sahip oldukları mikroyapı ve mekanik özellikleri, uygulanan farklı ısıl işlemlerin uygulanması ile artırılabilmektedir. Alüminyum alaşımlarının sertlik ve dayanımları yaşlandırma işlemi ile artırılabilir [8]. 7xxx serisi alüminyum alaşımları katı çözeltiliye alma işlemini ardından su verme ve yaşlandırma sonrası oluşan çökeltme sonucu dayanımları artırılmaktadır [2]. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında T6 ısıl işlemi ile yüksek sertlik ve dayanım sağlanmaktadır. 7075 alüminyum alaşımında T6 ısıl işlemi 121°C'de 24 saat yaşlandırılması ile gerçekleştirilmektedir [9-11]. Bu işlem sonucunda korozyona karşı duyarlı bir durum ortaya çıktığından, bu tür alaşımların korozyon dirençlerinin artırılması için T73 ısıl işlemi geliştirilmiştir. Bu ısıl işlem ile alaşımların korozyon direncinde büyük miktarda artış sağlanırken, alaşımların dayanımında ise % 10-15 oranında bir azalma olmaktadır [6,9,12]. Alüminyum alaşımlarının dayanım ve korozyon özelliklerinin optimum değerlere ulaşmasının sağlanması amacıyla ilk olarak 1974 yılında Cina tarafından, yeniden çözeltiliye alma ve yeniden yaşlandırma (RRA) ısıl işlemi önerilmiştir [9]. Ticari olarak kullanılan uçakların % 65'inde ana yapıda alüminyum alaşımlarının kullanılması nedeniyle, RRA ısıl işlemi önemli olup, özellikle 7150 ve 7075 türü alüminyum alaşımları RRA işlemi için geliştirilmiştir [9,10-12]. RRA işlemi yeniden çözeltiliye alma ve yeniden

yaşlandırma olmak üzere iki kademelidir. Öncelikle 480°C civarında yüksek sıcaklıklarda çözeltiliye alındıktan sonra T6 ısıl işlemi uygulanmaktadır. T6 ısıl işlemi ile alaşımlar RRA işleminin birinci aşamasından nispeten daha yüksek sıcaklıklarda (200-280°C) kısa süreli çözeltiliye alınmaktadır. Bu işlemin hemen sonrasında yeniden T6 işlemi uygulanmakta ve RRA ısıl işlemi tamamlanmaktadır [9,10-12]. RRA işleminin bütün aşamalarında kullanılan parametreler malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Aşınma, malzemelerin önemli mekanik özelliklerden biridir ve makine elemanlarının beraber çalışması sonucu oluşan yüzey hatasıdır. Çeşitli endüstriyel sektörlerde karşılaşılan önemli problemlerden biridir. Oluşturulan sistemlerin verimliliğinin azalmasına neden olmaktadır. Endüstrinin birçok alanında uygulama alanı bulan alüminyum alaşımlarının aşınma davranışları ile ilgili birçok araştırma gerçekleştirilmiştir [13-21]. Aşınma esnasında uygulanan yük, hız ve çevre şartları aşınma direncine önemli etkileri olmaktadır [13-18]. Daha önceki çalışmalarda daha çok ince kesitli parçalara RRA işlemi uygulanmış ve özellikleri incelenmiştir [19].

Bu çalışmada ise kalın kesitli 7075 alüminyum alaşımlarına çözeltiliye alma ve T6 işlemini takiben 180-260°C sıcaklıkları arasında 15 ile 75 dakika sürelerde yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanmıştır. Yeniden çözeltiliye alma sıcaklıkları alaşımların aşınma davranışına etkileri sertlik değerleri ile beraber incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut literatür ile mukayeseli olarak tartışılmıştır.

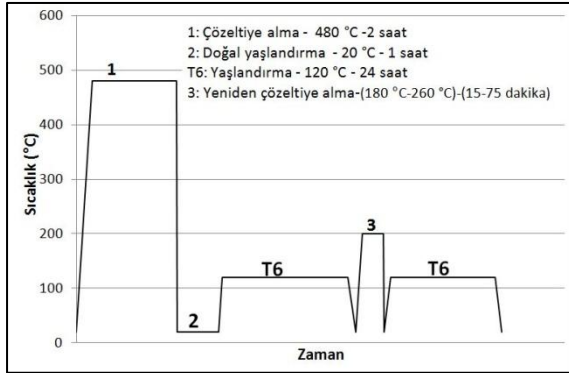
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Çalışmalarda kullanılan 7075 alüminyum alaşımlarının kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir.

Aşınma deney numuneleri alüminyum 7075 çubuğundan 7 mm çapında ve 10 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Çalışmada alaşımların ilk T6 işlemi gördüğünden emin olmak için ısıl işlemlerin ilk aşamasından itibaren başlanmıştır. Uygulanan ısıl işlem çevriminin daha kolay anlaşılması için grafiksel olarak Şekil 1'de gösterilmiştir. 7075 alüminyum alaşımı öncelikle 480°C'da 2 saat çözeltiliye alınmış sonra, suda soğutulduktan sonra 1 saat oda sıcaklığında doğal olarak yaşlandırılmıştır. Alaşım daha sonra 120°C'da 24 saat (T6) ilk yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemden sonra alaşım (180-260°C) sıcaklıkları arasında 15 ile 75 dakika sürelerde yeniden çözeltiliye alınmış ve hemen sonrasında ikinci defa 120°C de 24 saat yeniden yaşlandırma işlemi uygulanarak RRA ısıl işlemi tamamlanmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan 7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of 7075 aluminium alloys used in the study)

Elementler	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Zr
Ortalama % Ağırlık	89,6	0,403	0,549	0,014	1,568	2,596	5,480	0,0125	0,0305

**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan RRA ısıl işlem çevrim grafiği (Diagram of RRA heat treatment cycle used in the study microscopy)

Metalografik inceleme için numuneler SiC aşındırıcı zımparalarla zımparalanmış ve 0,3µ elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler su ile yıkanıp, yüzeylerine etil alkol püskürtülerek hızla kurutulması sağlanmıştır. Mikroyapıları açığa çıkarması için numuneler 2 ml HF, 3 ml HCl, 20 ml HNO₃, 175 ml H₂O solüsyonuyla 1–2 dakika dağlanan numuneler NIKON LP 1200 ELIPSE mikroskop ile mikroyapıları görüntülenmiştir. Malzemelerin aşınma yüzeyleri “JEOL JSM–6060” tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

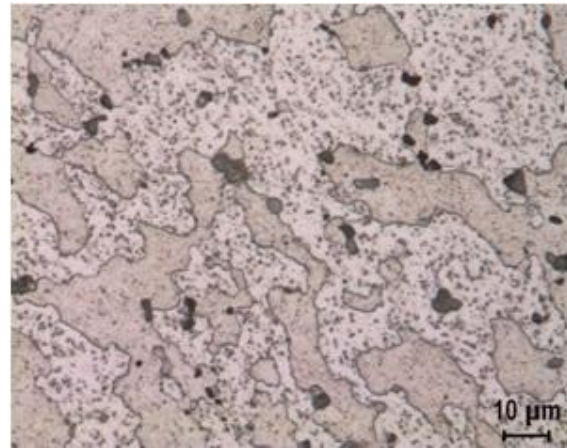
Sertlik değerlerinin ölçülmesinde Vickers sertlik metodu kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri universal AFFRI marka RSD251 model cihazda 3kg yük uygulanarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri alınan numuneler 1200 # numara zımpara ile zımparalandırdıktan sonra beş farklı noktalardan sertlik ölçümü alınıp, ortalama sertlik değerleri tespit edilmiştir. Aşınma deneylerinde Pin-On-Disk tipi standart deney cihazı kullanılmıştır. Aşınma testlerinde kullanılan aşındırma diski 56 HRC sertliğe sahip Ç4140 malzemesidir. Aşınma deneylerine başlamadan önce her numune ve disk yüzeyi aseton ile temizlenmiştir. Her numune farklı bir iz oluşturacak şekilde yerleştirilerek her test için aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Aşınma testlerinden sonra disk yeniden taşlanarak yeni test için hazır hale getirilmiştir. Aşınma testleri 15 ve 50N yükler altında, 2000 metre kayma mesafesi seçilmiştir. Kayma hızı olarak da 1,5 ms⁻¹ seçilmiştir. Numuneler deney öncesinde ve sonrasında 10⁻⁴g hassasiyetindeki dijital terazide tartılarak ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Aşınma oranı, aşınan malzemenin hacminin aşınma deneyinde alınan yola bölünmesi ile hesaplanmıştır. Aşınan malzemenin hacmi ise aşınma sonrasında elde

edilen ağırlık kaybının, malzemenin yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

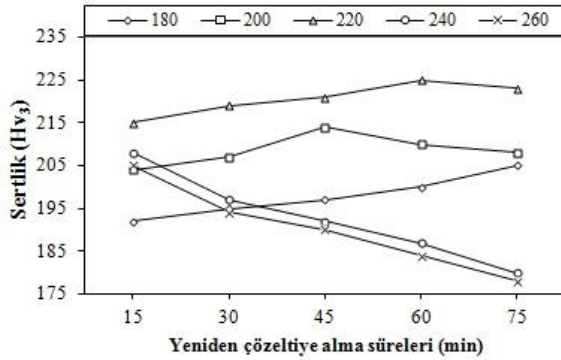
3.1 RRA İşleminde yeniden Çözeltiliye Alma Süresi ve Sıcaklıklarının Mikroyapı ve Sertliğe etkisi (Effects of Times and Temperatures of Regrogetions in RRA on Microstructure and Hardness)

T6 ısıl işlemi uygulanan 7075 alüminyum alaşımlarına 180-260°C’de arasındaki belirli sıcaklıklarda 15-75 dakika sürelerde yeniden çözeltiliye alınarak sonrasında RRA ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem sonrası mikroyapıda meydana gelen değişimler nanometre boyutlarında olduğundan oluşan farklar optik mikroskop ile belirlenememektedir. Buna rağmen bu alaşımların optik mikroyapısının görüntüsü ile ilgili genel bir fikir verilmesi amacıyla 220°C’de 60 dakika süre yeniden çözeltiliye alınan ve yeniden sertleştirilen 7075 alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yeniden çözeltiliye alınarak RRA ısıl işlemi uygulanan 7075 alüminyum alaşımlarında optik ve düşük büyütmelemlerde gerçekleştirilen SEM mikroyapı görüntülerinde benzer yapılar görülmüştür [11,22-25].

**Şekil 2.** 220°C’de sıcaklığında 60 dakika yeniden çözeltiliye alınan ve yeniden sertleştirilen 7075 alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüsü (View of optical microscopy of 7075 aluminium alloy retrogressed at 220°C for 60 minutes and re-aged)

Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiliye alma ve yağlandırma işlemi uygulanan 7075 alüminyum alaşımlarının öncelikle sertlik değerleri Şekil 3’de verilmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde 180-

220°C sıcaklıklar arasında gerçekleştirilen sertlik değerleri genel olarak yeniden çözeltiliye alma süresine paralel olarak artmaktadır. Ancak, 240°C'de 45 dakika daha fazla sürede yeniden çözeltiliye alınan 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik değerleri süre artışına bağlı olarak düşmektedir. 220°C'de 60 dakika daha fazla sürelerde yeniden çözeltiliye alınan alaşımların sertlik değerlerinde düşüş görülmüştür. Diğer taraftan 240°C ve 260°C'de yeniden çözeltiliye alınan alaşımların RRA işlemi sonrasında çözeltiliye alma süresinin artışına paralel olarak sertlik değerlerinde sürekli düşme görülmektedir. En yüksek sertlik değeri 225 Hv ile 220 °C'de 60 dakika yeniden çözeltiliye alınan alaşımların sahip olduğu görülmüştür. En düşük sertlik değeri ise 185 Hv ile 260 °C'de 75 dakika yeniden çözeltiliye alınan alaşımlarda elde edilmiştir. Daha önceden yapılan çalışmalarda RRA işleminde yeniden çözeltiliye alma sıcaklıkları 220°C ve 240 °C'ler civarındadır [11,25,26]. Daha yüksek ve uzun süreli yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarında aşırı yaşlanma meydana geldiğini göstermektedir [11,27,28]. Önceden yapılan bir çalışmada T6 ısıl işlemi sonrasında 7075 alüminyum alaşımlarının sertliği 183 Hv dir. Optimum şartlarda gerçekleştirilen RRA işlemi ile sertlik değerlerinde artma görülmüş ve 195 Hv olarak tespit edilmiştir [25]. Li vd [29] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise T6 ısıl işleminden sonra 7000 serisi alaşımlarının mikrosertlik değeri 237 Hv dir.



Şekil 3. Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiliye alınan ve daha sonra 120°C'de 24 saat yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik değerlerinin değişimi (Hardness values variations of 7075 aluminium alloys retrogressed at various retrogression times and temperatures and re-aged at 120°C for 24 hours)

Yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiliye alınan alaşımların sertlik değerlerinde düşme görülmüştür. Yeniden çözeltiliye alma sürelerine bağlı olarak sertlik değerlerinde farklılıklar olmaktadır. Yeniden çözeltiliye alma süresi artışa bağlı olarak önceleri sertlik değerlerinde düşme olmakta, daha sonra bir süre sabit kalmakta ve sürenin uzamasına bağlı olarak artış göstermekte belirli bir değere ulaştıktan sonra yeniden çözeltiliye alma süresindeki artışa paralel olarak sürekli düşüş göstermektedir [29]. Bu yeniden çözeltiliye alma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak alaşımların mikroyapısında bazı farklılıkların oluştuğunu

göstermektedir.

Bu çalışmada 220°C'de 15 dakika ve daha yüksek sürelerde yeniden çözeltiliye alınan ve RRA işlemi uygulanan alaşımların 215 Hv değerlerinden daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla önceki çalışma ile karşılaştırıldığında daha yüksek değerlerin elde edildiği anlaşılmaktadır [11,25].

Yeniden çözeltiliye alma aşamasında bekleme süresi artmasına bağlı olarak sertlik değerlerinin düşmesi, mikroyapı içerisindeki GP bölgeleri veya η' fazı gibi yarı uyumlu mikroyapı bileşenlerinin çözünmesi ile açıklanabilir. GP bölgeleri yarı dengelidir ve Zn, Mg ve Cu çözeltili grubu ile uyumludur. η' fazı da yarı dengelidir ve $MgZn_2$ ya da daha doğrusu $Mg(ZnCuAl)_2$ şeklinde görülmektedir [12,30,31]. Bahsedilen faz yarı uyumludur. Tane içerisinde olduğu gibi tane sınırlarında da bulunmaktadır. η fazı ise dengeli olmayan faz olup, bağdaşık değildir [30]. Bu aşamada elde edilen minimum sertlik değerleri, maksimum yeniden çözeltiliye alma sürelerine karşılık gelmektedir [10,11,19,27,28]. 7050 ve 7075 alüminyum alaşımlarında ana sertleştirici bileşenler GP bölgeleri ve η' fazı olup, bu fazların ana yapı içerisinde çözünmeleri sertlik değerlerini düşürmektedir. Yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarında bekleme sürelerindeki artışa paralel olarak sertlik değerlerindeki artış, matris içerisindeki yeni oluşan η' fazının oluşması ve miktarlarının artışına bağlanabilmektedir [11,19,28,30,32]. Yeniden yaşlandırma aşamasında oluşan η' miktarı maksimuma çıkmakta ve alaşımların sertlik değerleri T6 ısıl işlemi gören alaşımların sertliğinin üzerine çıkmaktadır. Sertlik maksimuma ulaşmasından sonra sıcaklık ve süreye bağlı olarak η' fazının aşırı kabalaşması ve η fazına dönüşmeye başlaması nedeniyle sertlik değerleri düşmektedir [11,19,28,30-36]. Yüksek yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarında ise aşırı yaşlanma ile tane içi ve tane sınırlarındaki çökeltilerin kabalaşmasına bağlı olarak sertlik değerleri azalmaktadır [11,19,28,33,34].

3.2. RRA İşleminde Yeniden Çözeltiliye Alma Sıcaklık ve Sürelerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi (Effects of Temperature and Times of Retrogressions in RRA on Wear Behaviours)

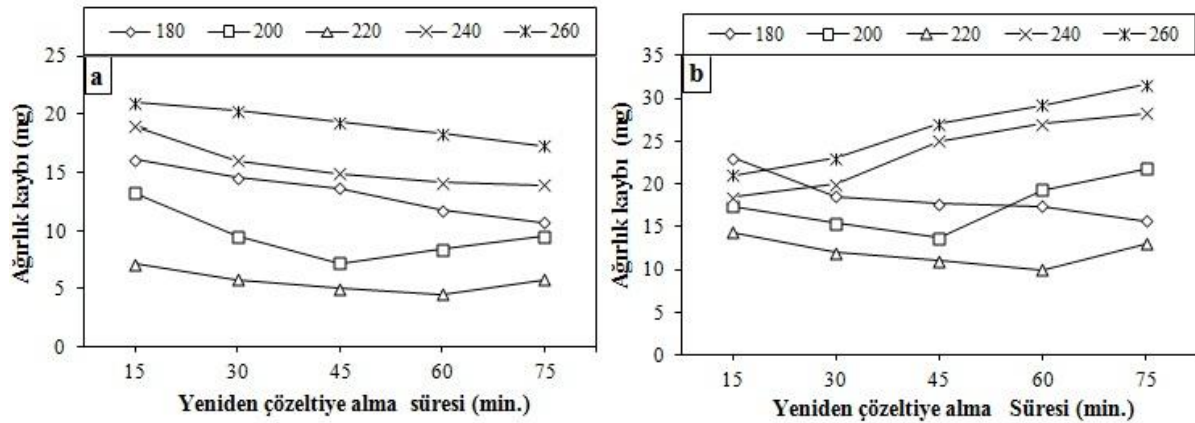
7075 alüminyum alaşımlarının sertlik değerleri belirlendikten sonra aşınma davranışları araştırılmış ve farklı yükler altında gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası malzemede meydana gelen ağırlık kaybı değişimleri Şekil 4'de verilmiştir. Şekil 4(a)'da görüldüğü gibi 15 N yük altında yapılan aşınma deneyleri sonucunda ağırlık kaybı genel olarak bütün yeniden çözeltiliye alma sıcaklığındaki bekleme süresinin artışı ile azalmıştır. Çözeltiliye alma sıcaklıkları ile aşınma kayıpları mukayese edildiğinde; aşınma kaybının en az olduğu değerden en çoğa doğru 220°C < 200°C < 180°C < 240°C < 260°C şeklinde sıralanmaktadır. Farklı yeniden çözeltiliye

alma sürelerinde malzeme aşırı yaşlanma devresine girmediği için sertlik ve dayanım değerlerinin artmakta ve buna bağlı olarak ağırlık kaybı miktarında da azalma gözlenmektedir. 240 ve 260°C sıcaklıklarında yeniden çözeltiliye alma işlemine tabi tutulan numunelerin aşınma deneylerinde ağırlık kaybı artmaktadır. 200°C'de yeniden çözeltiliye alma işlemi uygulanan numunelerin ağırlık kaybı miktarı 45 dakika bekleme süresine kadar azalırken 45 dakikadan sonra ağırlık kaybı miktarı artmaktadır. Şekil 3'de verilen sertlik değerlerinde görüldüğü gibi 200°C 45 dakika yeniden çözeltiliye alma süresinden sonra malzemenin aşırı yaşlanma periyoduna girerek sertlik ve dayanım değerleri azalmakta ve buna bağlı olarak ağırlık kaybı artmaktadır. En düşük ağırlık kaybı miktarının 220°C yeniden çözeltiliye alma sıcaklığında bekletilen numunelerde elde edildiği görülmektedir. Bekleme süreleri dikkate alındığında 60 dakika bekletilen numunelerin aşınma testlerinde ağırlık kaybının azaldığı 75 dakika bekletilen numunelerde ise ağırlık kaybının bir miktar arttığı görülmektedir. Bu değerlere göre 220°C'de 60 dakika bekleme süresinin yeniden çözeltiliye alma işlemi için en optimum değer olduğu anlaşılmaktadır. 240°C'de yeniden çözeltiliye alma ve yeniden yaşlandırma işleminden sonra uygulanan aşınma deneylerinde ise ağırlık kaybının bekleme süresine bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Şekil 2'de verilen sertlik ölçümlerinde ise tam tersi olarak, bekleme süresi arttıkça sertlik azalmaktadır. Bu durum numunelerin sertlikteki azalma sonucu temas yüzeyinde ısı etkisi ile sıvanma meydana gelmesi sonucu ağırlık kaybının azalması olarak yorumlanabilir. 260°C'de yeniden çözeltiliye alınan numuneler incelendiğinde 240°C sıcaklığında karşılaşılan durumun aynen gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Ağırlık kaybının 240°C'ye göre yüksek olması, yeniden çözeltiliye alma sıcaklığı yüksek olması ve buna paralel olarak bekleme

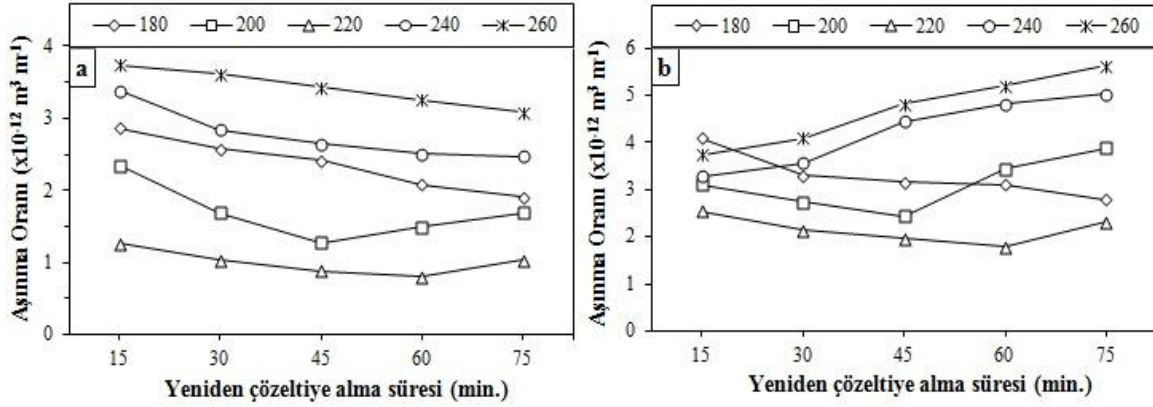
sürelerindeki artışın aşırı yaşlanmayı ve aşamayı hızlandırdığı, bu nedenle sertlik ve dayanımın düşük olmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4(b)'de 50 N aşınma yükü uygulanan alaşımların aşınma deneylerinde elde edilen ağırlık kayıpları incelendiğinde, 15 N yük uygulanan numunelerde elde edilen sonuçların 180, 200 ve 220°C sıcaklıkları için benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. 240 ve 260°C'de elde edilen ağırlık kayıplarının bekleme süresine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Uygulanan farklı yükler altındaki aşınma deneylerinde en düşük ağırlık kaybının 220°C'de yeniden çözeltiliye alma ve yeniden yaşlandırma uygulanan numunelerin sahip olduğu görülmektedir. Daha önceden 7075 alüminyum alaşımlarının aşınma davranışları üzerine yeniden çözeltiliye alma sürelerine bağlı olarak aşınma hızı değerlerinde düşüş olduğu belirtilmektedir [11,13, 19,37]. Ancak, çok yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiliye alınan numunelerde bu değer daha düşük olmaktadır. Bu bakımdan elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur. Venkataraman [37]'in yaptığı çalışmada da yüke bağlı olarak aşınma oranlarında artış görülmüştür. RRA ısı işlemi uygulanan 7075 alüminyum alaşımının aşınma testleri sırasında numune yüzeylerinde oksit bir film tabakası oluşmaktadır ve oluşan oksit filmi katı yağlayıcı etkisi göstererek aşınma miktarını azaltmaktadır. Bu durum diğer çalışmalarla da uyumludur [13-18,25,35, 38].

Aşınma direncinin daha net olarak belirlenmesi amacıyla aşınma deneylerinde elde edilen veriler kullanılarak aşınma oranı değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Şekil 5'de verilmiştir. Ağırlık kaybı miktarları ile aşınma oranları arasında yakın ilişki olduğundan sonuçlar arasında paralellik bulunmaktadır.



Şekil 4. Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiliye alınan ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının a) 15N, b) 50N yük altındaki aşınma deneyindeki ağırlık kaybı değişimi (Wear lose variation of 7075 aluminium alloys retrogressed at various retrogression temperatures and times and re-aged under loads of a) 15N, b) 50N)



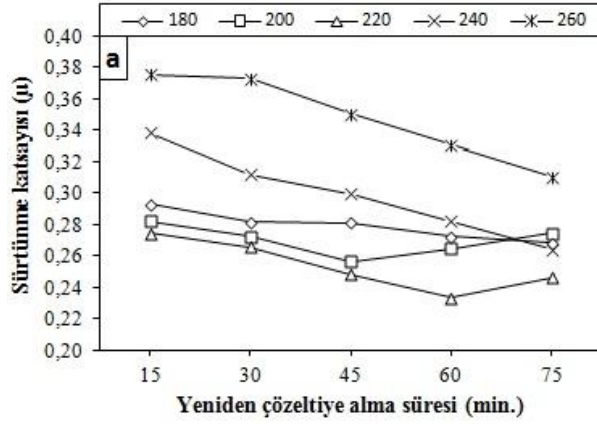
Şekil 5. Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltilmiş ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının a) 15N, b) 50N yük altındaki aşınma deneyindeki aşınma oranı değişimi (Wear rate variation of 7075 aluminium alloys retrogressed at various retrogression temperatures and times and re-aged under loads of a) 15N, b) 50N)

Aşınma deneyi sırasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Şekil 6'da verilmiştir. 2000 metre kayma mesafesinde 15 N yük altında aşınma deneyleri esnasında sürtünme katsayısı değerlerinin 260°C yeniden çözeltilme sıcaklığında ısıl işlem uygulanan alaşımın tüm bekleme sürelerinde sürtünme katsayısının en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Yeniden çözeltilme süreleri arttırıldığında 15 N yük altında sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir.

Aşınma esnasında numuneden ayrılan parçaların aşındırılan alaşımın yüzeyine yapışması ve sıcaklığın etkisi ile oksitlenmekte ve yağlayıcı etkisi olan oksit bir film tabakasının yüzeyde oluşması sonucu sürtünme katsayısını azalttığı düşünülmektedir. Aynı durumun 240°C yeniden çözeltilme sıcaklığında meydana geldiği görülmektedir. 240°C'de yeniden çözeltilme alınan numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin 260°C yeniden çözeltilme alınan numunelerden düşük olmasının nedeni sertliğin daha yüksek olması ve aşınmaya karşı gösterdiği direncin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. 180°C'de yeniden çözeltilme alınan numunelerin sürtünme katsayıları incelendiğinde bekleme süresindeki artışla azaldığı görülmektedir. Bunun nedeninin bekleme sürelerinden artması ile yapıda oluşan çökelti miktarının artması ve yaşlandırma işlemi sonrasında sertliğin artmasıdır. Numunelerin belirlenen süreler içerisinde aşırı yaşlanma periyoduna girmediği ve buna bağlı olarak da sürtünme katsayılarının, bekleme süreleri arttırıldığında azaldığı görülmektedir. 200°C yeniden çözeltilme alınan alaşımların 45 dakika bekleme süresine kadar sürtünme katsayısının azaldığı 45 dakikadan sonra ise arttığı görülmektedir. Sürtünme katsayısının artması alaşımın sertliğinin azalması sonucunda aşınmaya karşı direncin azaldığını ve buna bağlı olarak aşınma miktarının arttığını göstermektedir. 220°C yeniden çözeltilme alınan numunelerin, en düşük sürtünme katsayısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. 220°C yeniden çözeltilme

alma sıcaklığında 60 dakika bekletildikten sonra yeniden yaşlandırılan alaşımların aşınma esnasında sürtünme katsayısının azalmakta, 75 dakika yeniden çözeltilme alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımın ise sürtünme katsayısı artmaktadır.

50 N yük altındaki aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde 260°C'de yeniden çözeltilme alınan numunelerin sürtünme katsayılarının bekleme süresinin artışına paralel olarak arttığı görülmektedir. Sertliğin bekleme süresindeki artışla azaldığı ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. 15 N yük altındaki aşınma deneylerinde karşılaşılan durumun olmadığı görülmektedir. Uygulanan yükün artması ile numunelerin aşınmaya karşı gösterdiği direncin azalmakta ve yüzeyde oluşan oksit film tabakalarının da kırılarak sürtünme katsayısını ve aşınma miktarını arttırdığı düşünülmektedir. 240°C'de farklı sürelerde yeniden çözeltilme alınan numunelerin sürtünme katsayıları 260°C'de yeniden çözeltilme alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların sürtünme katsayıları ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu, bekleme süresinin artması ile sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. 180°C'de yeniden çözeltilme alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımın sürtünme katsayısı incelendiğinde 50 N yük altındaki sürtünme katsayısının bekleme süresi arttıkça diğer yüklerdeki gibi azaldığı görülmektedir. 200°C'de yeniden çözeltilme alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımın 50 N yük altındaki sürtünme katsayıları incelendiğinde diğer yükler altında karşılaşılan aşınma mekanizmalarının aynı meydana gelmektedir. Yeniden çözeltilme alma sıcaklığında bekleme süresi 45 dakikaya kadar olan numunelerin sürtünme katsayısının azaldığı, bekleme süresindeki artışla beraber sürtünme katsayısının da arttığı görülmektedir. 220°C'de farklı sürelerde yeniden çözeltilme alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımın 50 N yük altındaki sürtünme katsayısı alaşımın sertliğinin artışına paralel olarak sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. 60 dakikaya



Şekil 6. Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının a) 15N, b) 50N yük altındaki aşınma deneyindeki sürtünme katsayısının değişimi. (Friction coefficients values variation of 7075 aluminium alloys retrogressed at various retrogression temperatures and times and re-aged under loads of a) 15N, b) 50N)

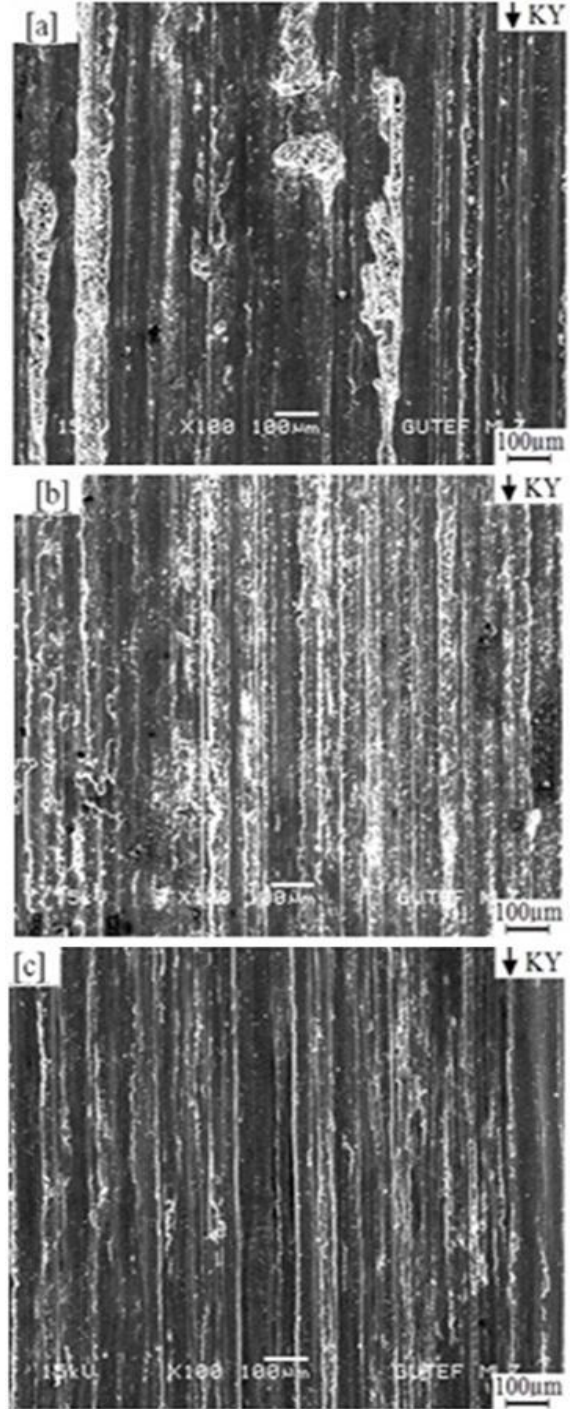
kadar olan bekleme süresinde alaşımın sertliğin artışına paralel olarak sürtünme katsayısı değerinin azaldığı ancak, 75 dakika yeniden çözeltiye alma süresinde ise arttığı görülmektedir. 50 N yük altında yüzeyden kopmalar meydana gelmesi aşınma katsayısının artmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada yapılan aşınma deneylerinde 0,2-0,4 arasında sürtünme katsayısı değerleri bulunmuştur. Yaşlandırılan numunenin içerisinde η' faz miktarı arttığından malzemenin sertlik değerleri artmakta ve aşınma deneylerinde daha düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edildiği ve yüksek sıcaklıklarda yapılan yeniden çözeltiye alma işlemlerinde malzemenin aşırı yaşlanma sonucu iri taneli η kararlı fazı oranının artarak sertlik değerlerini düşürdüğü düşünülmektedir. Aşınma deneyi esnasında aşınma çiftinin temas yüzeyinde artan sıcaklığa bağlı olarak oksit tabakası oluşmaktadır. Oluşan oksit filmi aşınma çifti arasında katı yağlayıcı etkisi yaparak uygulanan yük miktarının artışına bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerini azaltmaktadır [13,37]. Şimdiki çalışmada RRA ısıl işlemi sonucunda sertlik değerleri arttığından ve içerisinde sert ve aşırı yaşlanmış fazlar bir arada olduğundan aşınma esnasında mekanizmalar farklılaşmaktadır.

3.3. Aşınan Yüzeylerin SEM Mikroyapı İncelemeleri (SEM Microstructure Examinations of worn surfaces)

50N yük altında aşınma deneyi yapılmış numunelerin aşınmış yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 7(a)'da 200°C'de yeniden çözeltiye alma sıcaklığı ve 60 dakika bekleme süresi ve daha sonra yeniden yaşlandırılan alaşımın aşınma yüzeylerin SEM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde meydana

gelen yırtılma ve kopmaların daha da arttığı görülmektedir.



Şekil 7. a) 200°C, b) 220°C, c) 260°C sıcaklıklarda ve 60 dakika sürede yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntüleri. (KY: Kayma yönü) (SEM images of worn surfaces of 7075 aluminium alloys RRA heat treated and retrogressed at a) 200°C, b) 220°C, c) 260°C for 60 minutes and re-aged (KY: Sliding direction))

Bunun muhtemel nedeni sürtünen yüzeyde yorulma olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, aşınan yüzeydeki aşınma izlerinin genişliği plastik

deformasyon miktarının fazla olması sonucu aşınma yüzeylerinde derin aşınma izleri görülmektedir. Şekil 7(b)'de 220°C'de yeniden çözeltiliye alma sıcaklığında 60 dakika bekleme süresi ve daha sonra yeniden yaşlandırılan alaşımın aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü incelendiğinde aşınma izlerinin çok ince olduğu ve aşınma yüzeyinde çok küçük kırılmaların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Aşınma yüzeyinde ince kırıkların meydana gelmesi malzemenin aşınan parçaların sertliğinin yüksek olduğunu gösterdiği düşünülmektedir. Aşınan yüzeydeki ince kırılma ve yapılmalar aşınma esnasında alaşımın aşınmaya karşı direncin yüksek olduğunun bir göstergesi olduğu düşünülmektedir. Şekil 7(c)'de 260°C sıcaklığında 60 dakika yeniden çözeltiliye alınarak RRA ısıl işlemi gören 7075 alüminyum alaşımının aşınma deneyi sonrasında yüzeyin SEM görüntüsü incelendiğinde yüzeyde kırılmaların daha az olduğu derin aşınma yolları meydana geldiği görülmektedir. Kırılmaların az olması malzemenin sertliğinin düşük olması nedeniyle devamlı plastik deformasyona maruz kalarak aşınmanın sürdüğü anlaşılmaktadır.

Yeniden çözeltiliye alma sıcaklık ve süreleri incelendiğinde aşınma direnci en yüksek numunelerin 220°C yeniden çözeltiliye alma sıcaklığında 60 dakika bekleme süresinden sonra yeniden yaşlandırılan numunelerin olduğu belirlenmiştir. En düşük aşınma direncinin ise 260°C'de yeniden çözeltiliye alma ve 75 dakika bekleme süresinden sonra yeniden yaşlandırılan numunelerde olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımlarına farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiliye alarak RRA ısıl işlemleri uygulanmıştır. Optimum özellikleri veren sıcaklık ve sürelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada yeniden çözeltiliye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımının mikroyapı ve sertlik ve aşınma davranışları gibi özelliklere etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- 1) Yeniden çözeltiliye alma sıcaklığı arttıkça sertlik değerleri artmakta, 220°C sıcaklıkta yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlar genel olarak yüksek sertlik değerlerine sahiptir. 220°C 'den daha yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların sahip olduğu sertlik değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.
- 2) Alaşımların sertlik değerleri yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarında (180-220°C) bekleme sürelerine bağlı olarak belirli bir süreye kadar artmakta daha sonra düşüş göstermektedir. 240 ve 260°C'de yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarında süredeki artışa paralel olarak sertlik değerlerinde düşme görülmektedir. En yüksek sertlik değeri 220°C'de 60 dakika sürede

yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlarda elde edilmiştir.

- 3) Aşınma deneylerinde aşınma kaybı ve aşınma oranları, uygulanan yüke ve mesafeye bağlı olarak artmaktadır. En yüksek aşınma kaybı ve aşınma oranı 260°C'de yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlar sahip olurken, en düşük aşınma kaybı ve oranı ise 220°C'de yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlarda elde edilmiştir.
- 4) Yeniden çözeltiliye alma sürelerindeki değişim aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerlerini de etkilemektedir. Aşınma deneyi esnasında sürtünme katsayısı değerleri 0,2-0,4 arasında değişmektedir. En düşük sürtünme katsayısı değeri 220°C'de 60 dakika sürede yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların aşınması esnasında, en yüksek sürtünme katsayısı değeri 260°C'de 75 dakika sürede yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların aşınması esnasında elde edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

SEM mikroyapı çalışmalarında sağladığı imkânlardan dolayı Prof. Dr. Süleyman TEKELİ'ye ve Alper AYTAÇ'a teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A.J., Smet, P. De, Harsler, A., Viergege, A., "Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry", **Mater. Sci. Eng. A** 280, 37-49, 2000.
2. Smith, W.E., **Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri**, Demir Dışı Alaşımlar, Cilt 2, çeviri M. Erdoğan, Nobel Dağıtım, 2001.
3. Yurdakul, M., Özbay, O., İç, Y. T., "Selection of Aerospace Aluminium Alloys, **Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University**, Vol. 17, No 2, 1-23, 2002.
4. Wu, YL., Froes F.H, Alvarez A., Li CG., Liu J., Microstructure and Properties of a New Super-High-Strength Al-Zn-Mg-Cu alloy C912, **Mater. Design**, 18, 211-215. 1997.
5. Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., Miller, W S., "Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications", **Mater. Sci. Eng. A - Structural Materials Properties**, 280, 102-107, 2000.
6. Ferrer, C.P., "Optimizing the Strength and SCC Resistance of Aluminium Alloys Used for Refurbishing Aging Aircraft", **U.S.N.A Trident Scholar project report**, 2001.
7. Rendigs K H. "Aluminium Structures Used in Aerospace-Status and Prospects", **J. Mater. Sci. Forum**, 242: 11-24, 1997.

8. **ASM Handbook**, Heat Treating, ASM. International Materials Park, Ohio, vol. 4, 1990.
9. Cina, B.M., Reducing the Susceptibility of alloys, alloys Particularly Aluminium to Stress Corrosion Cracking, **U.S. Patent, No: 3, 856, 584, Dec. 24, 1974.**
10. Ay, N., **7075 Alüminyum Alaşımında RRA Isıl İşleminin Mikroyapıya Etkisi ve Kinetik Analiz**, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 1989.
11. Baydoğan, M., **Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma Uygulanmış 2014 ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımının Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi**, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 2003.
12. Parker, J.K., Ardell, A.J., "Effect of Retrogression and Reaging Treatments on the Microstructure of Al-7075-T651". **Mater. Trans. A**, 15, 1531–1543. 1984.
13. Kibar, E., Yılmaz, R., Özyürek, D., "Wear Properties of 7075 Aluminium Alloys Produced By Powder Metallurgy", **5. International Powder Metallurgy**, Ankara-Turkey, 69-76, 08–12 October 2008.
14. Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellup, J.M., "Dry Sliding Wear of Aluminium Composites-A Review", **Comp. Sci. Tech.** 57, 415-435, 1997.
15. Vencl, A., Bobic, I., Mikovic, Z., "Effect of Thixocasting and Heat Treatment on the Tribological Properties of Hypoeutectic Al-Si alloy", **Wear**, 264, 616–623, 2008.
16. Chen, R., Iwabuchi A., Shimuzu T., "The Effect of a T6 Heat Treatment on the Fretting Wear of a SiC Particle-Reinforced A356 Aluminum Alloy Matrix Composite", **Wear**, 238, 110–119, 2000.
17. Sudarshan, Surappa M.K., "Dry Sliding Wear of Fly Ash Particle Reinforced A356 Al Composites", **Wear**, 205, 249-360, 2008.
18. How, H.C., Baker, T.N., "Dry Sliding Wear Behaviour of Saffil- Reinforced AA6061 composites", **Wear**, 210, 263–272, 1997.
19. Baydogan, M., Cimenoglu, H., Kayali, E.S., "A Study on Sliding Wear of a 7075 Aluminum Alloy", **Wear**, 257, 852–861, 2004.
20. Ceschini, L., Bosi, C., Casagrande, A., Garagnani, G.L., "Effect of Thermal Treatment and Recycling on the Tribological Behaviour of an AlSiMg-SiC_p Composite", **Wear**, 251, 1377–1388, 2001.
21. Mindivan H., Kayali, E.S., Cimenoglu, H., "Tribological Behavior of Squeeze Cast Aluminum Matrix Composites", **Wear**, 265, 645–654, 2008.
22. Kibar, E., **7075 Alüminyum Alaşımına Uygulanan RRA Isıl İşlemlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi**, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2010.
23. Yılmaz, R., Özyürek, D., Kibar, E., "Yeniden Çözeltiliye Alma Sıcaklığının 7075 Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışına Etkisi", **15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, IMMC 2010, İstanbul-Turkey.** 1935-1944, 11–13 Kasım 2010.
24. Özyürek, D., Yılmaz, R., Kibar, E., "The Effects of Retrogression Parameters in RRA Treatment on Tensile Strength of 7075 Aluminium Alloys", **Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University**, Vol. 27, No 1, 193-203, 2012.
25. Baydoğan, M., Çimenoglu, H., Kayali, E.S., "RRA İşleminin 7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisi", **İTÜ Dergisi/d, Mühendislik**, Cilt: 3, Sayı: 6, 108-116, 2004.
26. Islam M.U., Wallace W., "Stress Corrosion Crack Growth Behaviour of 7475 T6 Retrogressed and Reaged Aluminium Alloy", **Metals Technology**, 11, 320-322., 1984.
27. Rajan, J.K., Wallace, W., Beddoes, J.C., "Microstructural Study of A High-Strength Stress-Corrosion Resistant 7075 Aluminum Alloy", **J. Mater. Sci.** 17, 10, 2817-2824, 1982.
28. Dahn, N.C., Rajan, K., and Wallace, W., "A TEM Study of Microstructural Changes During Retrogression and Reaging in 7075 Aluminum", **Mater. Trans. A**, 14, 9, 1843-1850., 1983.
29. Li, G. F., Zhang, X. M., Li, P. H., You J. H., "Effects of Retrogression Heating Rate on Microstructures and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 7050", **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 20, 735-941, 2010.
30. Reda, Y. Abdel-Karim, R., Elmahallawi, I., "Improvements in Mechanical and Stress Corrosion Cracking Properties in Al-Alloy 7075 via Retrogression and Reaging", **Mater. Sci. Eng. A** 485, 468–475, 2008.
31. Meng, C, Long H, Zheng Y. "Study of the Mechanism of Hardness Change of Al-Zn-Mg Alloy during Retrogression Reaging Treatments by Small Angle X-Ray scattering (SAXS)", **Mater. Trans. A**, 28: 2067–2071, 1997.
32. Buha J, Lumley RN, Crosky AG. "Secondary Ageing in an Aluminum Alloy 7050", **Mater. Sci. Eng. A** 492 1–10, 2008.
33. Marlaud T, Deschamps A, Bley F, Lefebvre W, Baroux B. "Evolution of Precipitate Microstructures During the Retrogression, Re-Aging Heat Treatment of an Al- Zn-Mg-Cu. Alloy", **Acta Mater.** 58, 4814–4826, 2010.
34. Viana F, Pinto AMP, Santos HMC, Lopes AB. "Retrogression, Re-Aging of 7075 Aluminum Alloy: Microstructural Characterization". **J. Mater. Process. Tech.** 92–93, 54–59, 1999.
35. Papazian, J.M., "Differential Scanning Calorimetry Evaluation of Retrogressed and Re-

- Aged Microstructures in Aluminum Alloy 7075”, **Mater. Sci. Eng. A** 79, 97–104, 1986.
36. Ning, A., Liu, Z., Peng, B., Zeng, S., “Redistribution and Re-Precipitation of solute Atom during Retrogression and Reaging of Al-Zn-Mg-Cu Alloys”, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 17, 1005-1011, 2007.
 37. Venkataraman, B., Sundararajan, G., “Correlation between the Characteristics of the Mechanically Mixed layer and Wear Behaviour of Aluminium, Al-7075 Alloy and Al-MMCs”, **Wear**, 245 22–38, 2000.
 38. Wang, J., Danninger, H., “Dry Sliding Behaviour of Molybdenum Alloyed Sintered Steels”, **Wear**, 222, 49-56, 1998.