

# RRA İŞLEMİNDE YENİDEN ÇÖZELTİYE ALMA PARAMETRELERİN 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÇEKME DAYANIMINA ETKİSİ

**Dursun ÖZYÜREK<sup>a</sup>, Ramazan YILMAZ<sup>b</sup>, Erkan KİBAR<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

<sup>b</sup>Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>c</sup>Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye

[dozyurek@karabuk.edu.tr](mailto:dozyurek@karabuk.edu.tr), [rvilmaz@sakarya.edu.tr](mailto:rvilmaz@sakarya.edu.tr), [erkan\\_kibaroglu@hotmail.com](mailto:erkan_kibaroglu@hotmail.com)

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

## ÖZET

Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımlarına T6 ısıl işlemi ardından yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlandırma işlemi (RRA) uygulanmıştır. RRA işleminin yeniden çözeltiye alma aşamasında alaşımlar farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiye alınmıştır. Bahsedilen bu parametrelerin alaşımların çekme dayanımına ve % uzama değerlerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, kırılma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek yeniden çözeltiye alma sıcaklığı ve süresinin kırılma mekanizmasına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. En yüksek çekme dayanımı ve en düşük % uzama değerlerine 220°C'de 60 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden sertleştirilen alaşımlar sahiptir. Sertlik değerleri ile çekme dayanımı arasında kuvvetli ilişki görülürken aynı durumun % uzama için geçerli değildir. Yeniden çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi alaşımların mikroyapısını değiştirdiğinden alaşımların sertlik, çekme, % uzama değerlerine ve kırılma mekanizmalarını etkilemektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Alüminyum alaşımları, 7075, yaşlandırma, yeniden çözeltiye alma, yeniden sertleştirme, çekme dayanımı, % uzama.

## THE EFFECTS OF RETROGRESSION PARAMETERS IN RRA TREATMENT ON TENSILE STRENGTH OF 7075 ALUMINIUM ALLOYS

### ABSTRACT

In this study retrogression and re-aging (RRA) treatments has been applied on 7075 aluminium alloys after T6 treatment. The alloys were retrogressed at various temperatures and times in the retrogression stage of RRA treatment. The effects of the parameters mentioned above on tensile strengths and % elongations were investigated. Besides fracture surfaces were examined by scanning electron microscopy (SEM) for determination of the effects of retrogression temperatures and times on fracture mechanism. The alloy retrogressed at 220°C for 60 minutes showed the highest tensile strength values, on the other hand, the lowest elongation values. Strong relationship has been seen between hardness and tensile strength; however, no effective relationship for elongation was available. Retrogression temperatures and times affects on microstructure of the alloys, therefore, it has also great influence on the hardness and tensile strength, elongation and fracture mechanism.

**Keywords:** Aluminium alloys, 7075, aging, retrogression, re-aging, tensile strength, elongation.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum ve alüminyum alaşımları sahip oldukları, korozyon direnci, elektrik iletimi gibi mükemmel özelliklerinden dolayı özellikle uçak endüstrisinin

vazgeçilemez malzemelerindendir [1-6]. İçerisinde % 4-8 Zn ve % 1-3 Mg bulunan 7xxx serisi alüminyum alaşımları mevcut alüminyum alaşımlarının içerisinde sertlik ve dayanım açısından önemli bir yere sahip olduğundan uçak ve uzay endüstrilerinde

kullanılabilecek ideal malzemelerdir [3-7]. Çinko ve magnezyum alüminyum içerisinde yüksek oranda katı çözümlüğe sahip olduğundan çökelti sertleşmesi özelliklerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Kompozisyonun içerisinde ağırlık olarak % 1-2 Cu ilavesi ile uçak endüstrisinde kullanılabilecek özelliklere sahip alüminyum alaşımları üretilmektedir. 7075 alüminyum alaşımlarının içerisinde ağırlık olarak % 5-6 Zn, % 2-3 Mg, yaklaşık olarak % 1,5 Cu ve çok az miktarlarda Cr, Mn, Ti, Zr, ve Ag içerebilmektedir. Az miktarlarda bulunan bu alaşımlar kristalleşme davranışını ve çökeltileri ayarlanması için kullanılmaktadır [3-9].

7075 alüminyum alaşımlarında en yüksek sertlik değerleri T6 ısıl işlemi şartlarında elde edilmektedir. Bu işlem 1950 ve 1960 yılları arasında tasarlanan birçok uçak modellerinin bazı yapısal parçalarında uygulanmıştır ve halende kullanımı sürmektedir. Korozyon hasarları nedeniyle uçakların bazı parçaların imalatında T6 ısıl işlemi gören 7075 alüminyum alaşımlarının kullanılmaktan vazgeçilmektedir. Yüksek korozyon direnci gerektiren uygulamalar için 7075 alüminyum alaşımlarında T73 aşırı yaşlandırma ısıl işlemi kullanılmaktadır. Ancak, T6 ısıl işlemi ile karşılaştırıldığında dayanım değerlerinde % 10-15 oranında bir düşme olmaktadır [10,11]. Bu ısıl işlemlere alternatif olarak T6 şartlarındaki alüminyum alaşımlarına yeniden çözeltiliye alma ve yeniden sertleştirme (RRA) işlemi uygulanmaktadır. 1974 yılında İsrail'de bir uçak şirketinde çalışan Cina [12] tarafından icat edilen proses otuz yılı aşkın süredir yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu işlem ile alüminyum alaşımlarında korozyon direnci T73 şartlarına yaklaşırken dayanım değerleri ise T6 şartları civarında yada bu seviyeden çok az düşük bir değerdedir [12-16]. İki aşama içeren bu proses öncelikle solüsyona alma işleminden sonra ilk aşamasında 115-125°C gibi düşük sıcaklıklarda ön yaşlandırma, 200-260°C gibi daha yüksek sıcaklıklarda kısa sürelerde yeniden çözeltiliye alınmaktadır. Proses sonraki aşamasında ise 115-125 °C gibi düşük sıcaklıklarda yeniden yaşlandırılır [12-18]. Ticari olarak kullanılan uçakların % 65'in ana yapısında alüminyum alaşımlarının kullanılması nedeniyle, RRA ısıl işlemi önemi artmakta ve özellikle 7000 serisi alüminyum alaşımları RRA işlemi için geliştirilmiştir [12-24].

Alüminyum alaşımlarının özelliklerinin artırılması için yapılan ısıl işlemler malzemenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir [13-15,17-23]. Çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi özellikler bu

alaşımlarından üretilen parçaların tasarımında önemli faktörlerdendir. Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımı çözeltiliye alma ve sonrası T6 ısıl işlemi takiben 180-260°C sıcaklıkları arasında 15 ile 75 dakika sürelerde yeniden çözeltiliye alınmış daha sonra 120°C'de 24 saat sürede yeniden yaşlandırılmıştır. Yeniden çözeltiliye alma sıcaklıkları ve sürelerinin alaşımlarının çekme özelliklerine etkisi incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Çalışmada ACA METAL firmasından temin edilmiş ve kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilen 7075 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımlarına RRA işlemi uygulanmıştır. T6 işleminin yapıpı yapılmadığından emin olmak için alaşım öncelikle 480°C civarında yüksek sıcaklıklarda çözeltiliye alındıktan sonra T6 ısıl işlemi ve hemen ardından T6 işleminden daha yüksek sıcaklıklarda (180-260°C) sıcaklıkları arasında 15 ile 75 dakika sürelerde yeniden çözeltiliye alınmıştır. Daha sonra 120°C'de 24 saat sürede yeniden yaşlandırılarak ve RRA ısıl işlemi tamamlanmıştır. Çalışmada uygulanan RRA ısıl işlemi ile ilgili detaylı bilgi önceki çalışmada verilmiştir [17, 18].

Metalografik inceleme için numuneler SiC aşındırıcı zımparalarla su altında zımparalanmış ve 0,3µ elmas pasta ile parlatılmıştır. Yüzeyi parlatılmış numuneler, 2 ml HF, 3 ml HCl, 20 ml HNO<sub>3</sub>, 175 ml H<sub>2</sub>O solüsyonu ile 1-2 dakika dağlanan numuneler NIKON LP 1200 ELİPSE mikroskop ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Malzemenin SEM mikroyapıları ve çekme deneyinden sonra elde edilen kırılma 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 için numuneler, 1200# SiC aşındırıcı ile zımparalandırdıktan sonra beş farklı noktadan alınan sertlik ölçümleri ile ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Çekme deneyleri SHIMADZU marka çekme deney cihazında oda sıcaklığında 2 mmm<sup>-1</sup> çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

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

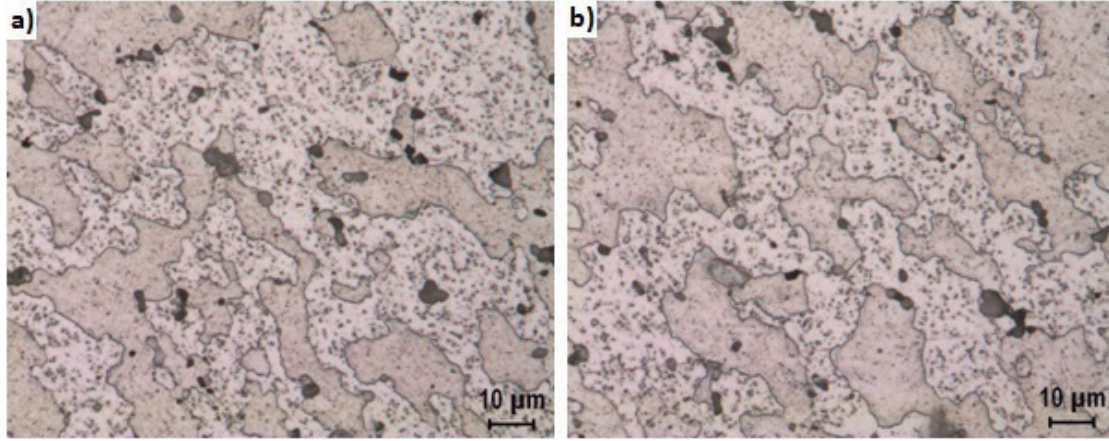
Elementler	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Zr
Ortalama % Ağırlık	89,6	0,403	0,549	0,014	1,568	2,596	5,480	0,0125	0,0305

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

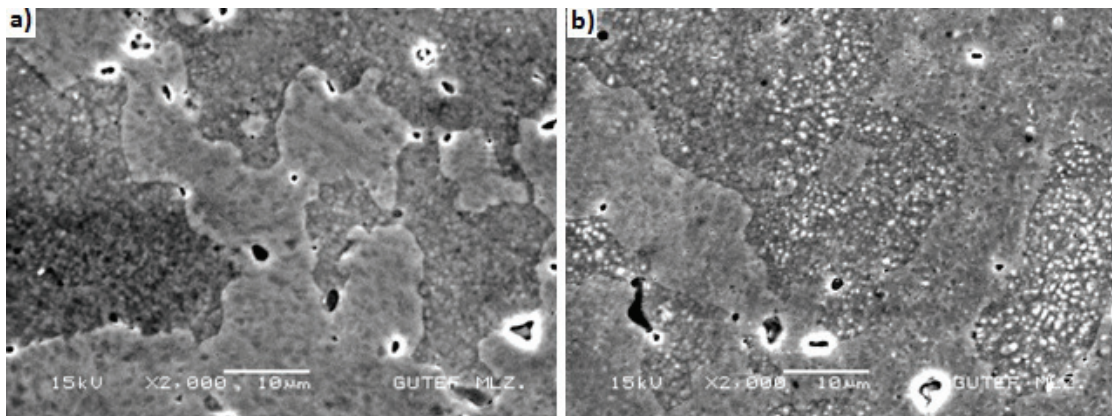
#### 3.1 Optik ve Tarama Elektron Mikroskopu İncelemeleri (Examination of Optical and Scanning Electron Microscopy)

200 ve 260°C'de sıcaklıklarda 60 dakika yeniden çözeltiye alınan 7075 alüminyum alaşımların optik mikroskop görüntüleri Şekil 1 (a ve b)'de verilmiştir. Şekiller arasında genel olarak farklılıklar bulunmakla beraber yapılan ısı işlemlerde mikroyapıda meydana gelen değişimlerin daha çok nano boyutlarda olduğundan dolayı belirlenememiştir. Bu alaşımların optik mikroyapısı hakkında fikir sahibi olunması amacıyla verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yeniden çözeltiye alınarak RRA ısı işlemleri uygulanan 7075 alüminyum alaşımlarında optik mikroskopta düşük büyütmelerde gerçekleştirilen görüntüler önceden yapılan çalışmalardaki elde edilen görüntülere benzemektedir [17,18]. 7XXX alaşımlarının,

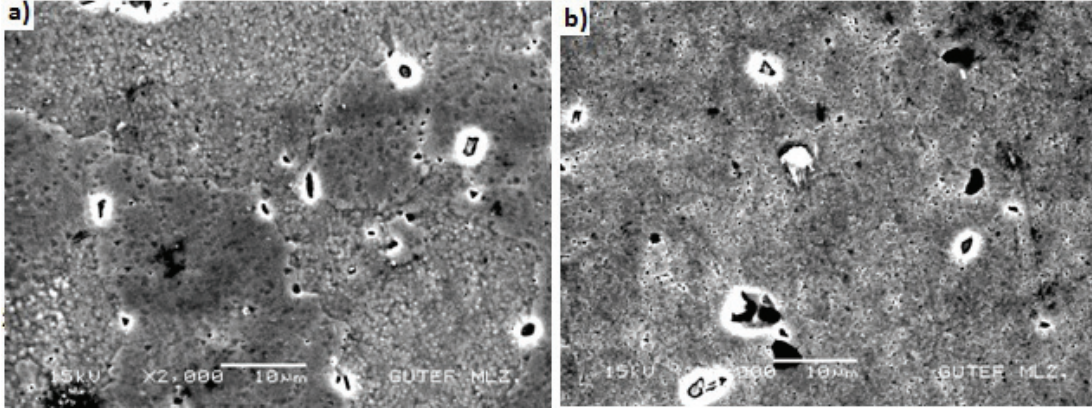
$Al_7Cu_2Fe$ ,  $Al_2CuMg$  ve  $Mg_2Si$  gibi optik mikroskopta görülebilen mikrometre boyutunda bazı bileşikler içerdiği belirtilmektedir [19,25,26]. Abolhasani farklı sıcaklıklarda merdaneden geçirilen numunelerin farklı bileşikler içerdiğini ve bu çöktülerin hem tane içersisinde hem de tane sınırlarında oluşabildiğini belirtmektedir [26]. Aynı şekilde SEM mikroyapılarında düşük büyütmelerde olduğu için nanometre boyutlarında meydana gelen değişimler belirlenememektedir. Ancak, Şekil 2 ve 3 (a ve b)'de verilen 200°C ve 260°C'de sırasıyla 15 ve 75 dakika sürelerde yeniden çözeltiye alınarak RRA ısı işleme tabi tutulan malzemelerin SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntüler içerisinde birbirinden farklı olsa esas malzemenin özelliklerine etki eden değişimler nanometre boyutlarda olmaktadır. Mikrometre düzeyinde meydana gelen değişimler az miktarda olsa da malzemelerin özelliklerine etki ettiği düşünülmektedir. Önceki bir çalışma da bu durum desteklemektedir [26].



**Şekil 1.** a) 200°C'de b) 260°C sıcaklığında 60 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden sertleştirilen 7075 alüminyum alaşımların optik mikroskop görüntüleri (Views of optical microscopy of 7075 aluminium alloys retrogressed at a) 200°C and b) 260°C 60 minutes and re-aged)



**Şekil 2.** 200°C sıcaklığında a) 15 dakika b) 75 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden sertleştirilen 7075 alüminyum alaşımların SEM mikroskop görüntüleri (Views of SEM microscopy of 7075 aluminium alloys retrogressed at 200°C for a period of a) 15 b) 75 minutes and re-aged).

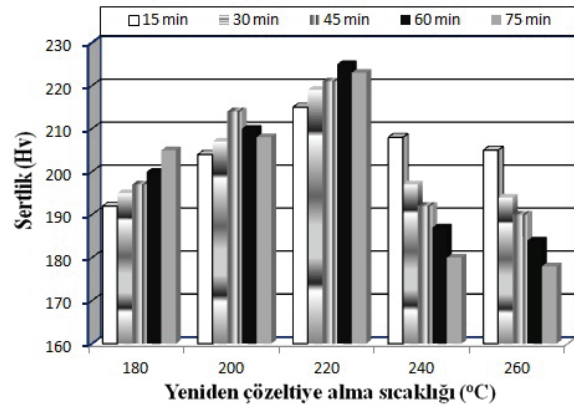


**Şekil 3.** 260°C sıcaklığında a) 15 dakika b) 75 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden sertleştirilen 7075 alüminyum alaşımların SEM mikroskop görüntüleri (Views of SEM microscopy of 7075 aluminium alloys retrogressed at 260°C for a period of a) 15 b) 75 minutes and re-aged).

### 3.2 Sertlik ve Çekme Test Sonuçları (Hardness Measurements and Tensile Strength Tests)

Farklı sıcaklıklarda (180-260°C) ve farklı sürelerde (15-75 dakika) yeniden çözeltiye alınan ve daha sonra yeniden sertleştirilerek RRA ısıtma işlemi uygulanan 7075 alüminyum alaşımların sertlik değerleri Şekil 4'de verilmiştir. 180°C'de yeniden çözeltiye alınan alaşımların sertlik değerleri çözeltiye alma sıcaklığının artışına bağlı olarak sürekli artmaktadır. En yüksek sertlik değeri 75 dakika yeniden çözeltiye alınan alaşımda sağlanmıştır. Esasında bu çalışmada bu sıcaklıkta 75 dakikadan daha uzun süreli yeniden çözeltiye alınmadığından bu sürenin sertlik için en yüksek değeri olup olmadığı bilinmemektedir. Yeniden çözeltiye alma sıcaklığı artışına bağlı olarak alaşımın sahip olduğu en yüksek sertlik değerlerine daha kısa sürelerde ulaşılmaktadır. Örneğin 200°C'de yeniden çözeltiye alınan alaşımların en yüksek sertlik değerlerine 45 dakika yeniden çözeltiye alma sonrasında ulaşılmaktadır. Bu sıcaklıktan sonraki yeniden yaşlandırma ve sertleştirme işlemleri sonrasında sertlik değerlerinde sürekli düşme görülmektedir. Ancak, 220°C'de yeniden çözeltiye alınan alaşımların en yüksek değerine 60 dakika yeniden çözeltiye alınarak gerçekleştirilen RRA işlemi sonrası ulaşılmaktadır. Bu durum biraz farklı olsa da bahsedilen yeniden çözeltiye alma sıcaklık aralığında tüm yeniden çözeltiye alma sürelerinde sertlik değerleri oldukça yüksek değerlerdedir ve aralarındaki fark 15 dakika yeniden çözeltiye alma süresi haricinde çok yüksek değildir. Bu sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiye alınan alaşımların sertlik değerleri yeniden çözeltiye alma sıcaklığına paralel olarak sürekli düşme görülmektedir. Yeniden çözeltiye alma sıcaklığı yükseldikçe sertlik değerlerinde düşme miktarı artmaktadır. Bahsedilen sıcaklıklarda en yüksek sertlik değerleri en düşük yeniden çözeltiye alma süreleri sonrasında elde edilmektedir. Bu nedenle çok yüksek sıcaklıklarda yapılan RRA ısıtma işlemi sonucu en yüksek sertlik değerlerinin elde

edilmesi için büyük ihtimalle birkaç dakikalık yeniden çözeltiye alma süreleri yeterli olacaktır. Yeniden yaşlandırma işlemlerinin kinetiği çözünen atomların difüzyonu ile kontrol edilmektedir. Çökeltilerin miktarı ve boyutları yaşlandırma zamanına paralel olarak artmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda çökeltilerin kinetiği daha hızlı artmakta ve daha kısa sürelerde alaşımlar en yüksek sertlik değerlerine ulaşmaktadır [27]. Daha önceki çalışmada belirtildiği gibi elde edilen sertlik değerlerinde bazı farklılıklar bulunmakla birlikte genel olarak uyumludur [19,21,28].



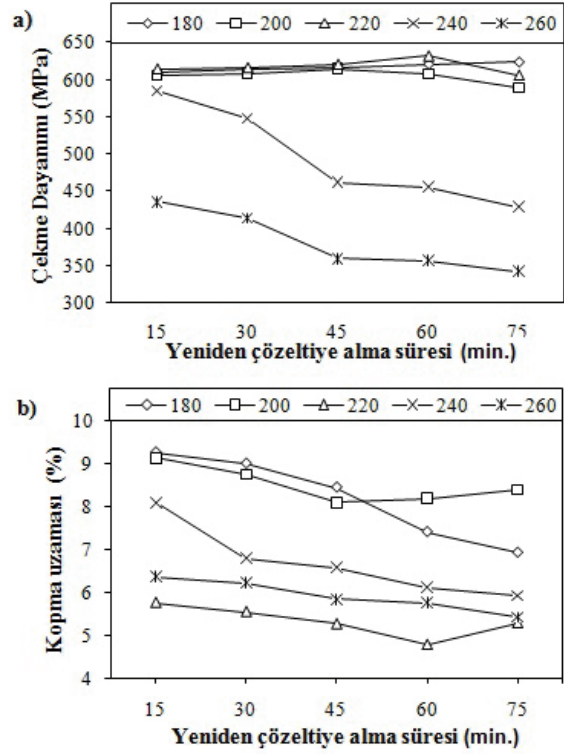
**Şekil 4.** Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan numunelerin sertlik değerlerinin değişimi (Hardness values variations of 7075 aluminium alloys retrogressed at various retrogression times and temperatures and re-aged)

7075 alüminyum alaşımlarına farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan RRA işlemleri sonrasında yapılan çekme deneylerinde alaşımların sahip olduğu çekme dayanımları ve % kopma uzamaları Şekil 5'de verilmiştir. Yeniden çözeltiye alma sıcaklıkları ve bekleme süreleri incelendiğinde en optimum çekme dayanımı 632 MPa değeri ile 220°C sıcaklığında 60 dakika yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların sahip olduğu görülmektedir.

Çekme dayanımlarını gösteren grafik incelendiğinde 180-200°C sıcaklıklar arasında yeniden çözeltiliye alınan alaşımlarda genelde tüm bekleme sürelerinde yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ancak, 180°C'de yeniden çözeltiliye alınan alaşımlarda çekme dayanımı değerlerinde sürekli artış gözlenirken yeniden çözeltiliye alma sıcaklığının artışına bağlı olarak belirli bir süreden sonra çekme dayanımı değerlerinde düşme gözlenmektedir. Bahsedilen sıcaklıklar arasında 30-60 dakika sürelerde gerçekleştirilen yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarının çekme dayanımı değerleri için kabul edilebilir olduğu söylenebilir. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen dayanım değerlerinin sertlik değerleri ile ilişkili olduğu ve paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. 220°C'den daha yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların çekme dayanımları yeniden çözeltiliye alma süresine bağlı olarak sürekli düşme göstermiştir. Özellikle 260°C'de yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların çekme dayanımı değerlerindeki düşme oldukça düşüktür. RRA işleminde yeniden çözeltiliye alma süresi arttıkça alaşımların sahip olduğu çekme dayanım değerlerinde düşme olmaktadır. RRA işleminde Bu çalışmada çekme deneyleri sonrasında en düşük çekme dayanımı değerleri 342 MPa ile 260°C'de 75 dakikada yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlar sahiptir. Çekme deneyleri sonunda elde edilen % kopma uzama değerlerinde ise en yüksek değer 9,3 ile 180°C'de 15 dakika yeniden çözeltiliye alınan numunelerden elde edilmiştir (Şekil 5b). 180°C'de yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların % uzama değerleri çözeltiliye alma sıcaklığına paralel olarak sürekli düşüş göstermektedir. Genelde çözeltiliye alma süresine bağlı olarak çalışmada kullanılan sıcaklıklarda yeniden çözeltiliye alınan alaşımların % uzama değerleri düşmektedir. Ancak, 200°C'de yeniden çözeltiliye alınan alaşımların % uzama değerleri 45 dakika yeniden çözeltiliye alma süresine kadar düşerken bu süreden daha uzun sürelerde yeniden çözeltiliye alındığında çok az da olsa % uzama değerlerinde bir miktar artış sağlanmaktadır. En düşük % uzama değerleri ise % 4,8 ile 220°C'de 60 dakika yeniden çözeltiliye alınan alaşımların sahiptir. En yüksek çekme değerine sahip olan alaşımlar en düşük % uzama değeri gösterirken en düşük çekme dayanımına sahip olan 260°C'de 75 dakika yeniden çözeltiliye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların % uzama değerleri % 5,5 ile en düşük değildir. Bu çalışmada elde edilen sertlik, çekme dayanımı ve % kopma uzama değerleri önemli ölçüde yeniden çözeltiliye alma sıcaklıkları ve sürelerine bağlı olarak mikroyapıda meydana gelen değişikliklerle ilgili olduğu düşünülmektedir.

Delasi vd.'nin [29] belirttiğine göre, T6 işlemi gören alaşımlarda 113-217°C sıcaklıklar arasında GP bölgeleri çözülmekte olduğu 217-250°C'de  $\eta'$  fazının oluşumu,  $\eta$  fazının çözünmesi ve  $\eta$  fazının oluşması

bir arada gerçekleşmektedir. 250-271°C sıcaklıklar arasında ise  $\eta$  fazı partiküllerinin büyüdüğü belirtilmektedir. Delasi tarafından yapılan açıklama bu çalışmadaki mikroyapının nasıl oluştuğunu elde edilen sertlik değerleri ile çekme dayanımını değerlerinin neden kaynaklandığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5. Farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiliye alınan ve daha sonra 120°C'da 24 saat yeniden yaşlandırılan numunelerin a) Çekme dayanımı b) Kopma uzaması değerlerinin değişimi ( a) Tensile Strength b) elongations values variations of 7075 aluminium alloys retrogressed at various retrogression times and temperatures and re-aged at 120°C for 24 hours)

Düşük sıcaklıklarda (180-220°C) gerçekleştirilen yeniden çözeltiliye alma işleminde süreye bağlı olarak hem sertlik değerlerinde hem de çekme dayanımı değerlerinde artma görülmektedir. Yeniden çözeltiliye alma sıcaklıklarında bekleme sürelerindeki artışa paralel olarak sertlik değerlerindeki artış, ana yapı içerisindeki yeni oluşan  $\eta'$  fazının oluşması ve ana yapı içerisindeki miktarlarının artışına bağlanabilmektedir [21,30,31]. Yeniden yaşlandırma aşamasında oluşan  $\eta'$  miktarı maksimuma çıkmakta ve alaşımların sertlik değerleri T6 ısıtma işlemi gören alaşımların sertlik değerlerine bile üzerine çıkabilmektedir. Bu aşamada bekleme süresinin artışına bağlı olarak mikroyapı içerisinde bulunan GP bölgeleri ile  $\eta'$  fazı gibi yarı uyumlu bileşenlerinin çözünmesi ile açıklanabilir. GP bölgeleri yarı dengeli ve ana yapı ile uyumludur. Diğer taraftan  $\eta'$  fazı da yarı dengeli,  $MgZn_2$  ya da  $Mg(ZnCuAl)_2$  şeklindedir [13,30,32]. Bu faz, ise yarı uyumludur ve tane içerisinde olduğu gibi tane sınırlarında da bulunmaktadır.  $\eta$  fazı ise

dengeli olmayan fazdır ve uyumlu değildir [30]. 7050 ve 7075 alüminyum alaşımlarında esas mukavemet arttıran bileşenler GP bölgeleri ve  $\eta'$  fazıdır. Düşük yeniden çözeltiye alma sıcaklıklarında yeni GP bölgeleri oluşmakta ve aynı zamanda  $\eta'$  fazı miktarında artış olmaktadır. Böylece, hem sertlik hem de çekme dayanım değerlerinde artış kaydedilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen yeniden çözeltiye alma sıcaklıklarında ise GP bölgeleri ile  $\eta'$  fazının ana yapı içerisinde çözünmeleri sonucu alaşımın sertlik ve çekme dayanımı değerlerini düşürmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiye alma işleminde süre artışına paralel olarak sertlik ve çekme dayanımı değerleri düşüktür. Bu durum önceden yapılan benzer çalışmalarla uyumludur [19,21,22].

RRA işleminde belirli bir sürede yeniden çözeltiye alma ve yeniden sertleştirme işlemi ile sertlik değerleri doruk noktasına ulaşmasından sonra sıcaklık ve süreye bağlı olarak  $\eta'$  fazı aşırı kabalaşmakta ve  $\eta$  fazına dönüşmektedir.  $\eta$  fazı bağdaşık olmayan ayrı bir faz olduğundan kafes parametrelerindeki gerilme azalarak sertlik değerlerinin düşmesine neden olmaktadır [21,30-34]. Dolayısıyla çekme dayanım değerlerinde de düşme olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda yeniden çözeltiye alma işleminde ise aşırı yaşlanma sonucu tane içi ve tane sınırlarındaki çökeltilerin kabalaşmasına bağlı olarak sertlik değerlerinde ve çekme dayanımı değerlerinde düşme olmaktadır [21,30-34]. Ayrıca tane sınırlarında oluşan çökeltilerin zamanla aralıklı olması ve genişlemesinde alaşımın % kopma uzamasına katkı sağladığı düşünülmektedir. 240°C gibi sıcaklık seviyelerinde yeniden çözeltiye alındığında uzun bekleme sürelerinde, alaşım aşırı yaşlanmaya devam ettiğinden çekme dayanımı değerleri azalmaktadır. Ancak kopma uzaması incelendiğinde ters orantı bir şekilde bekleme süresine bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu durum aşırı yaşlanma periyoduna girdiğinde atomik kafes sistemi içerisinde bulunan çökeltilerin boyutunun artması ile bağımsız olarak ikinci bir faz oluşturmakta ve çekme deneyi esnasında süneklik azalarak kopma uzaması değerleri düşmektedir. Bekleme süresini artırdığımızda malzemenin çekme dayanım değerlerinde düşme görülmektedir.

$\eta$  fazı tane sınırlarında özellikle 45 dakika daha uzun yeniden çözeltiye alma sürelerinde partiküllerinin ölçüsünde önemli miktarda artış olduğu görülmüştür [21,27].  $\eta$  fazları tane sınırlarında dengeli görüntü halinde toplanmakta ve zamanla kabalaşmaktadır. Böylece, çökelti olmayan alanlar genişlemektedir. T73 ısıtma işleminde buna benzer tane sınırı yapıları oluşmaktadır. Bu işlemde de tane sınırlarında olduğu gibi tane içerisinde de zamanla artan bir şekilde yeniden çözeltiye alma süresine bağlı olarak kabalaşmak olmaktadır [35].

Danh vd. [21]'ne göre T6 işlemi görmüş 7075 alüminyum alaşımların korozyon direnci ve mekanik özelliklerinin artırılması için mikroyapıda GP bölgelerinin kısmi çözünmesi,  $\eta'$  partiküllerinin oluşması, büyümesi ve tane sınırlarında özellikle kaba partiküllerin çökmesi gerekmektedir. RRA işleminden sonra mikroyapıda yüksek oranda  $\eta'$  fazı ve az miktarda  $\eta$  fazının çökeltileri bulunmaktadır [36]. Esasında alaşımın sahip olduğu yüksek dayanım  $\eta'$  sayesinde.  $\eta$  partikülleri ise öncelikle tane sınırlarına yerleşerek alaşımların korozyon dirençlerinin artmasını sağlamaktadır [36]. Tane sınırlarındaki çökelti miktarının hacimsel oranının artması 7000 serisi alaşımların gerilimli korozyon kırılma direncini artırmaktadır [14]. Boldantoni [36]'nin çalışmasında RRA işlemi GP bölgeleri çözümlerinin tamamlandığını ve  $\eta'$  partiküllerin hacimsel oranı ilk en yüksek noktası sıcaklığındaki artışa paralel olarak artmaktadır. 200°C civarında yapılan yeniden çözeltiye alınarak gerçekleştirilen ve RRA işleminde alaşımın mikroyapısında  $\eta'$  partiküllerinin hacimsel oranının artması ile hem sertlik hem de çekme dayanım değerlerini artmasını sağlamaktadır. Elde edilen bu sonuçlar önceden yapılan çalışmalarının sonuçları ile uyumludur [15,30,35]. Önceden yapılan çalışmada [37], 200°C civarında 40 dakika yeniden çözeltiye alma ile şimdiki çalışmada elde edilen değerlere yakın çekme dayanımı ve % uzama değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak şimdiki çalışmada elde edilen çekme değerleri literatürde bulunan sonuçlarla uyumlu olmasına karşın bazılarında göre biraz yüksektir. Diğer taraftan daha düşük % uzama değerleri elde edilmiştir. Sonuçlar arasındaki farkın yeniden çözeltiye alma sıcaklığı ve süreleri arasındaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. RRA işlemi gören alaşımların sünekliği T6 işlemi görenlere göre daha yüksektir. RRA işleminde mikroyapıda dislokasyon yoğunluğu daha azdır [38]. Aynı zamanda tane sınırı çökeltilerinin boyutu ve aralıkları artmaktadır [16]. T6 işleminde çökeleklerin 3-6 nm boyutlarında olup, ince ve homojen bir dağılım göstermektedir [37]. Diğer taraftan RRA işleminde ana yapının T6 işlemi gören yapıya benzediği ve çökeleklerin 5-10 nm boyutlarında ve homojen dağılım gösterdiği belirtilmektedir. Bu nedenle T6 ısıtma işlemi gören alaşımlarda RRA işlem sonrasında elde edilen çekme dayanım değerleri birbirine yakındır. RRA işleminde mikroyapıda öncelikle  $\eta'$  ve  $\eta$  fazları daha yoğun bulunmaktadır Bu iki fazın mikroyapıda bulunması alaşımın dayanımının artmasını sağlamaktadır. Reda vd [30] göre RRA işleminin başlangıcında GP bölgeleri çözüldükçe 7075 alaşımlarında hem sertlik hem de akma dayanımları hızla düşmektedir. Hemen sonraki süreçte  $\eta'$  partiküllerinin optimum boyut ve dağılıma ulaşması ile sertlikte en yüksek değerleri maksimuma ulaşmaktadır. Devam eden süreçte  $\eta'$  fazlarının kabalaşması ve  $\eta$  fazına dönüşmesi ile

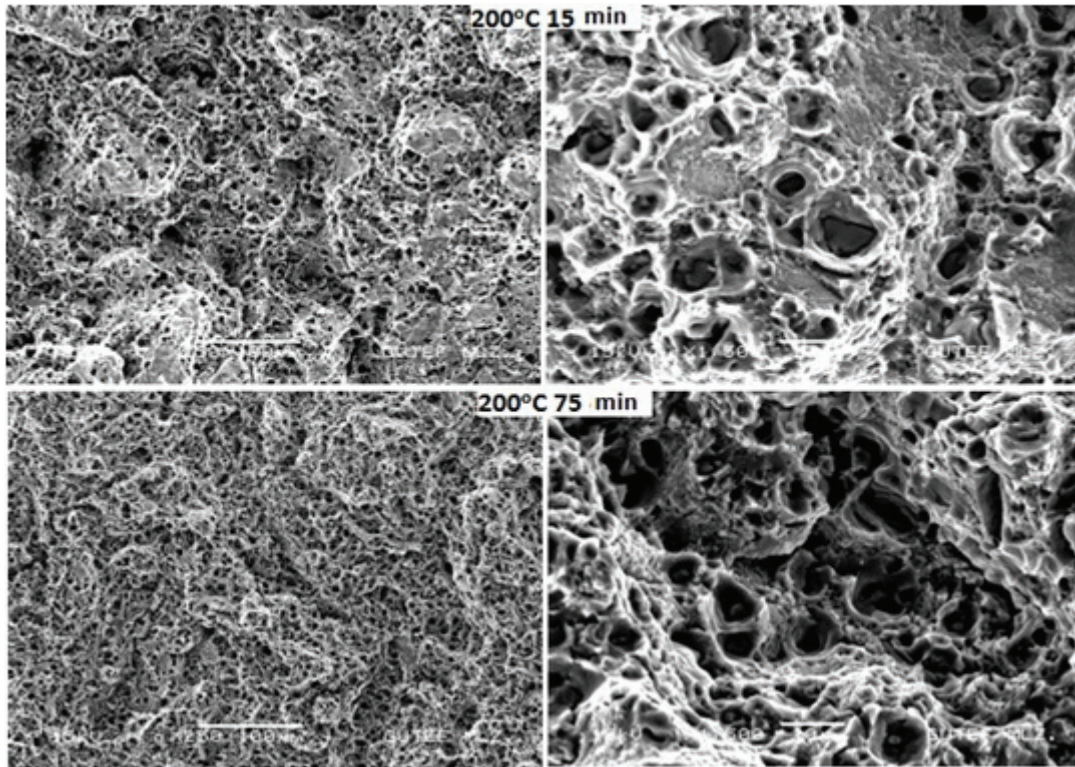
sertlik değerlerinde düşme görülmektedir [33]. Reda vd. [30] çalışmasında maksimum sertlik ve çekme dayanımı değerlerini 200°C'de yapılan yeniden çözeltiye alınan alaşımlarda elde etmiştir. Bu sıcaklıkta yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan alaşımların hem tane içerisinde hem de tane sınırlarında yoğun intermetalik partiküllerin oluşmasından kaynaklanmaktadır.

Sertlik değerlerindeki düşüş GP zonlarının ve  $\eta^1$  fazının kısmi çözünmesinden kaynaklanmaktadır.  $\eta$  ve  $\eta^1$  fazlarındaki artış sertlik değerlerinin artmasını sağlamaktadır. Uzun süreli yeniden çözeltiye alma sürelerinde sertlik değerlerindeki düşme aşırı yaşanmadan kaynaklanmaktadır. % uzamanın uzun süreli yeniden çözeltiye alma sonrasındaki artışının nedeni gerilim yoğunluğunun azalması, çözünen atomların çökelti olmayan alanlarda tükenmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer taraftan  $\eta$  ve  $\eta^1$  fazlarının RRA işleminde artması ve dislokasyonlarında GP bölgeleri etrafında kesme mekanizması ile değil de Orowan mekanizması ile  $\eta$  ve  $\eta^1$  fazlarının etrafında kayma olmaktadır. Böylece ana yapı içerisindeki şekil değişimi homojen bir şekilde olmaktadır. Tane sınırlarında ise yeniden çözeltiye alma süresinin uzaması ile  $\eta$  fazı çökeltilerinin toparlanmakta ve aynı zamanda çökelti olmayan alanlar genişlemektedir. Bu durumda tane sınırlarındaki gerilim yığılmalarını azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı % uzama değerleri artmaktadır. RRA işlemi yapılan alaşımların içerisinde küçük boyutlu GP bölgeleri ve  $\eta^1$  fazı,

büyük boyutlu  $\eta^1$  fazı devam eden aşamalarında  $\eta^1$  fazı oranının artması ve farklı boyutlara sahip çökeltilerin olması alaşımların dayanımının artmasını sağlamaktadır. Mikroyapı içerisindeki  $\eta^1$  fazının oranının azalması ve  $\eta$  fazı miktarının artması dayanım değerini düşürmektedir [35].

### 3.3 Kopma Yüzeyleri (Fracture Surfaces)

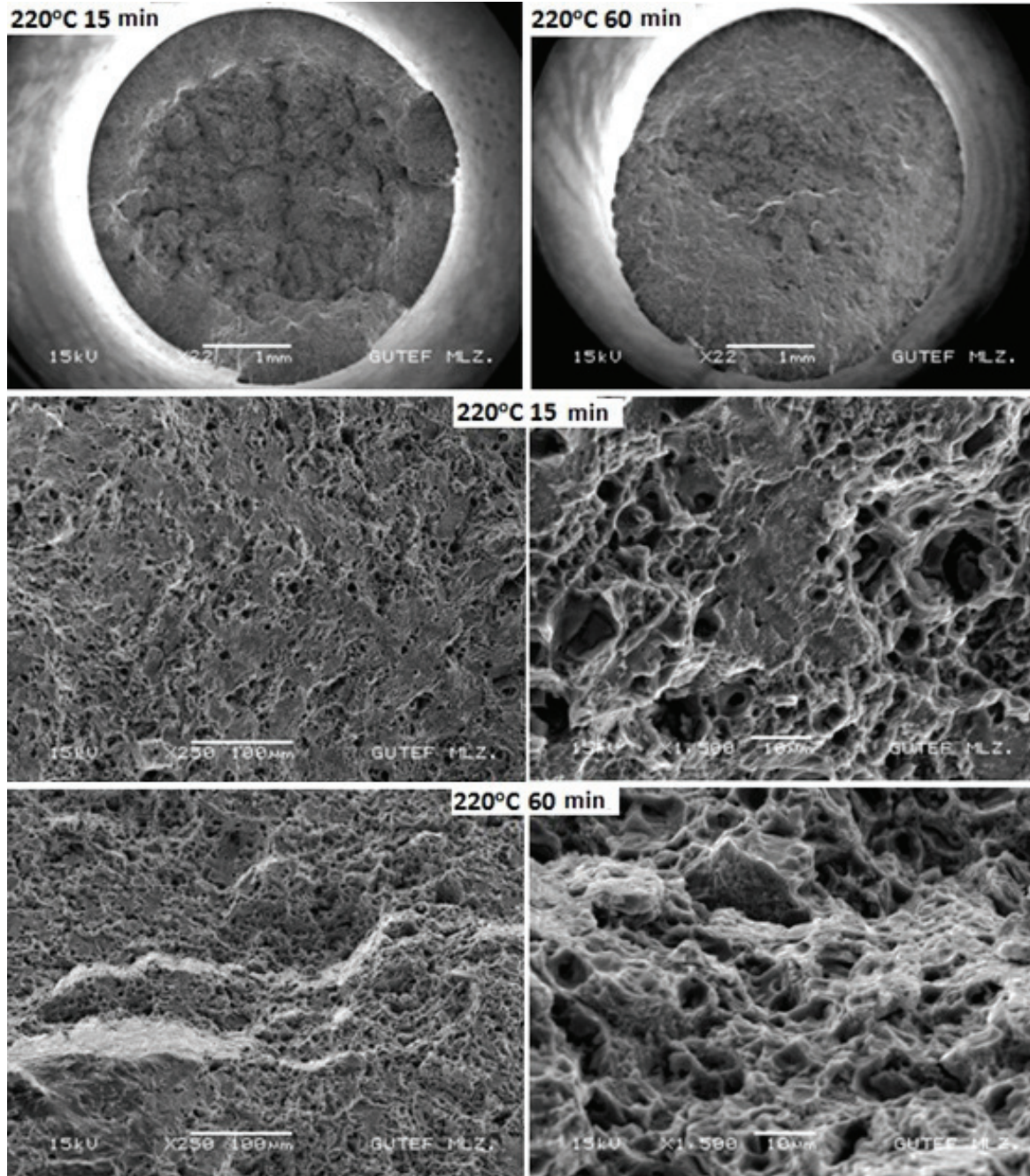
RRA işlemi yapılan alaşımların çekme deneyleri sonrası incelenen SEM kırık yüzey görüntüleri 200°C'de yeniden çözeltiye alma sıcaklığı için Şekil 6'da, 220°C'de yeniden çözeltiye alma sıcaklığı için Şekil 7'de ve 260°C'de yeniden çözeltiye alma sıcaklığı için Şekil 8'de verilmiştir. 220°C'de 15 dakika yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi yapılan alaşımların çekme deneyi sonrası kırılma yüzeyi incelendiğinde genelde sünek ancak bazı bölgelerinde gevrek kırılma ve sünek kırılmanın beraberce meydana geldiği görülmektedir. Çekme dayanımı grafiğinde de dayanımın yüksek olmasına paralel bir görüntü meydana geldiği düşünülmektedir. Yeniden çözeltiye alma sıcaklığı arttıkça kırılma yüzeyi daha sünek bir kırılmanın meydana geldiğini göstermektedir (Şekil 6). 220°C sıcaklığında yeniden çözeltiye alınan alaşımın kopma yüzeyde ise sünek ve kırılgan kırılma mekanizması ile gerçekleştiği görülmektedir. 220°C sıcaklığında yeniden çözeltiye alınan alaşımın gevrek ve sünek kırılmaların meydana geldiğini ancak gevrek kırılmanın daha yoğun olduğu görülmektedir.



**Şekil 6.** 200°C'de 15 ve 75 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının farklı büyütme ölçeklerinde çekilmiş kırılma yüzeyleri (Fracture surfaces of retrogressed at 220°C for 15 and 75 minutes and re-aged with various magnifications)

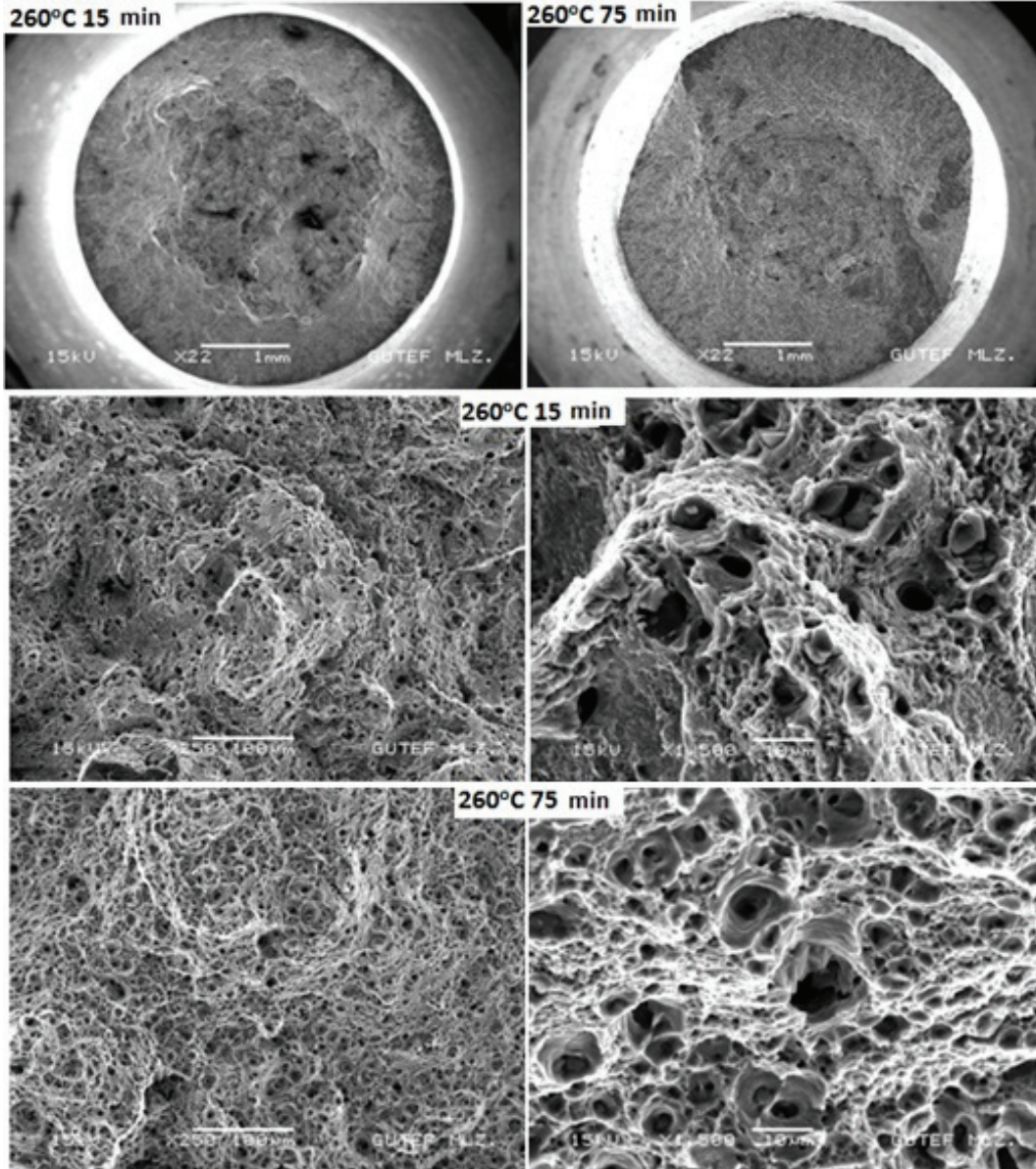
Bu durum dayanımın değerlerinin yüksek olmasının bir göstergesidir. 260°C sıcaklıklarında özellikle uzun sürelerde yeniden çözeltiye alınan alaşımların kırılma yüzeyi görüntülerinde sünek kırılmaların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Daha önceki bir çalışmada [39], RRA ısıtıl işlemi görmüş alaşımların kırılma yüzeyi incelendiğinde bu çalışmada elde edilen kırılma yüzeylerine benzemekte ve kırılmaların sünek tane içerisinde kesme kırılması şeklinde olduğu geniş düzlem yüzeylerin yoğun kayma çizgileri ile kesiştiği görülmektedir. Partiküllerin kırılması malzemelerin genel tokluğuna önemli katkı

sağlamaktadır. RRA işlemi yapılan alaşımların kırılma yüzeylerinde hem tane içerisinde hem de taneler arası kırılmalar beraber görülmektedir. Kırılma yüzeyleri fiberimsi sünek bir görüntüye sahiptir. Çünkü çok sayıda dimple (gamze şeklinde çukurcuk kopma tipi) vardır. Bu alışımda kırılmanın sünek gerçekleştiğini göstermektedir. İkinci fazın sebep olduğu daha çok kalivaj kırılma daha az taneler arası kırılma görülmektedir. Önceden yapılan bir çalışmaya göre kırılma davranışları azalan çözülmemiş kaba fazın ve çökelen fazın artmasına bağlı olarak değişmektedir [35].



**Şekil 7.** 220°C’de 15 ve 60 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının farklı büyültmelerde çekilmiş kırılma yüzeyleri (Fracture surfaces of retrogressed at 220°C for 15 and 75 minutes and re-aged with various magnifications)





**Şekil 8.** 260°C'de 15 ve 75 dakika yeniden çözeltiye alınan ve yeniden yaşlandırılan 7075 alüminyum alaşımının farklı büyültmelerde çekilmiş kırılma yüzeyleri (Fracture surfaces of retrogressed at 260°C for 15 and 75 minutes and re-aged with various magnifications)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımlarına farklı sıcaklık ve sürelerde yeniden çözeltiye alınarak RRA ısıl işlemleri uygulanmıştır. Yeniden çözeltiye alma sıcaklıklarının ve sürelerin alaşımların çekme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- 1) RRA işleminde yeniden çözeltiye alma sıcaklıkları ve süreleri çekme dayanımı ve % kopma uzama değerlerini etkilemiştir.
- 2) Düşük sıcaklıklarda (180°C) yeniden çözeltiye alınan alaşımlarda sertlik değeri RRA işleminde çözeltiye alma sürelerinin artışına paralel olarak

sertlik değerleri, çekme dayanımı ve % kopma uzama değerleri sürekli artmaktadır.

- 3) 180-220°C arasındaki sıcaklıklarda yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlarda bütün yeniden çözeltiye alma sürelerinde genel olarak yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı değerleri 220°C sıcaklıkta 60 dakika yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlar sahiptir. En düşük çekme dayanımı değerleri ise 260°C sıcaklıkta 75 dakika yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların sahip olduğu görülmüştür.
- 4) Düşük sıcaklıklarda yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımların çekme

dayanımı değerleri yeniden çözeltiye alma süresinin artışına paralel olarak artmaktadır. 220°C'den daha yüksek yeniden çözeltiye alma sıcaklıklarında ise çekme dayanımı değerleri yeniden çözeltiye alma sıcaklığının artışına paralel olarak azalmaktadır. Sertlik değerleri ile çekme dayanımı değerlerine benzer eğilim göstermektedir.

- 5) % kopma uzama değerleri genel olarak bütün yeniden çözeltiye alma sıcaklıklarında yeniden çözeltiye alma süresinin artışına paralel olarak azalmaktadır. En yüksek % uzama değerleri 180°C'de 15 dakika süre yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşım sahiptir. En düşük % uzama değerleri ise 220°C'de 60 dakika sürede yeniden çözeltiye alınarak RRA işlemi uygulanan alaşımlarda elde edilmiştir.
- 6) Sertlik değerleri ile çekme dayanımı değerleri arasında ilişki bulunmaktadır. Sertlik ve çekme dayanımı değerleri yeniden çözeltiye alma sıcaklığına paralel olarak artmakta ve daha sonra düşmektedir.
- 7) Kırılma yüzeyleri incelenmiş çekme deneyinde oluşan kırılma mekanizmaları sunulmuştur. Genelde sünek kırılma karışımı kırılma davranışı göstermektedir. Kırılma davranışları yeniden çözeltiye alma sıcaklığına bağlı olarak oluşan mikroyapıya göre değişmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

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

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Miller, W.S., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A.J., Smet, P. De, Harsler, A., Vierregge, A., "Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry", **Mater. Sci. Eng. A** 280, 37–49, 2000.
2. Mondolfo L.F., **Aluminum Alloys: Structure and Properties**, Boston 7 Butterworths; 1976.
3. Smith, W.E., **Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri**, Demir Dışı Alaşımlar, Cilt 2, çeviri M. Erdoğan, Nobel Dağıtım, 2001.
4. Rendigs K H. "Aluminium Structures Used in Aerospace-Status and Prospects", **J. Mater. Sci. Forum**, 242: 11-24, 1997.
5. Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., Miller, W S., "Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications", **Mat. Sci. Eng. A.**, 280, 102-107, 2000.
6. Yurdakul, M., Özbay, O., İç, Y. T., "Selection of Aerospace Aluminum Alloys, **Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University**, Vol. 17, No 2, 1-23, 2002.
7. Wu, Y.L., Froes, F. H., Alvarez A., Li C.G., Liu J., Microstructure and Properties of a New Super-High-Strength Al–Zn–Mg–Cu alloy C912, **Mater. Design**, 18, 211–215. 1997.
8. Dumont, D., Deschamps, A., Brechet, Y., 2003. "On the Relationship between Microstructure, Strength and Toughness in AA7050 Aluminum Alloy". **Mater. Sci. Eng. A**, 356, 326–336.
9. 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.
10. **ASM Handbook**, Heat Treating, ASM. International Materials Park, Ohio" vol. 4, 1990.
11. Ferrer, C.P., Koul, M.G., Connolly, B.J., Moran, A.L., "Improvements in Strength and Stress Corrosion Cracking Properties in Aluminum Alloy 7075 via Low-Temperature Retrogression and Re-Ageing Heat Treatments", **Corrosion** 6, 520–528, 2003.
12. 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.
13. Park, 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.
14. Park J K. "Influence of Retrogression and Re-Ageing on the Strength and Stress Corrosion Resistance of Aluminium Alloy 7075-T6", **Mater. Sci. Eng. A** 103 (2): 223-231, 1988
15. Viana F, Pinto AMP, Santos HMC, Lopes AB., "Retrogression, Re-Aging of 7075 Aluminium Alloy: Microstructural Characterization", **J. Mater. Process. Tech.** 92–93, 54–59, 1999.
16. Holt, R.T., Raizenne, M. D., and Wallace, W., "RRA Heat Treatment of Large Al 7075-T6 Components", **Technical Report No: ADP010412**, 1999.
17. Kibar, E., **7075 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan RRA Isıl İşlemlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi**, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2010.
18. Yılmaz, R., Özyürek, D., Kibar, E., "The Effects of Retrogression Parameters on Hardness and Wear Behaviours of 7075 Aluminium Alloys", **Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University** in press 2012.
19. Baydogan, M., Cimenoglu, H., Kayalı, E.S., RRA İşleminin 7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisi, **İTÜ Dergisi/d, Mühendislik**, Cilt: 3, Sayı: 6, 108-116, 2004.
20. Islam M.U., Wallace W., "Stress Corrosion-Crack Growth Behaviour of 7475 T6 Retrogressed and Re-aged Aluminium Alloy", **Metals Technology**, 11, 320-322., 1984

21. Danh, N.C., Rajan, K., and Wallace, W., "A TEM Study of Microstructural Changes During Retrogression and Reaging in 7075 Aluminum", **Metall.Mater.Trans. A**14, 9, 1843-1850., 1983.
22. 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.
23. Li, G. F., Zhang, X. M., Li, P. H., You J. H., "Effects of Retrogression Heating Rate on Microstructures and Mechanical Properties of Aluminium Alloy 7050", **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 20, 935-941, 2010.
24. 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.
25. Kamp, N., Sinclair, I., Starink, M.J., Toughness-Strength Relations in the Overaged 7449 Al-Based Alloy, **Metall. Mater. Trans. A**, 33, 4, 1125-1136, 2002.
26. Abolhasani, A., Zarei-Hanzaki, H.R., Abedi, M.R. Rokni, The room temperature mechanical properties of hot rolled 7075 aluminum alloy, **Mater. Design**, 34, 631-636, 2012.
27. Fang, S.F., Wang, M.P., Song, M., "An Approach for the Aging Process Optimization of Al-Zn-Mg-Cu Series Alloys", **Mater. Design**, 30, 2460-2467, 2009.
28. Oliveira A.F., Barros M.C., Cardoso K.R., Travessa D.N., "The Effect of RRA on the Strength and SCC Resistance on AA7050 and AA7150 Aluminium Alloys", **Mater. Sci. Eng. A** 379, 321-326, 2004.
29. Delasi R., Adler, P.N., "Calorimetric Studies of 7000 Series Aluminum Alloys: I. Matrix Precipitation Characterization of 7075", **Metall. Trans. A**, vol. 8A, 1177-1183, 1977.
30. Reda, Y. Abdel-Karim, R., Elmahallawi, I., "Improvements in Mechanical and Stress Corrosion Cracking Properties in Al-Alloy 7075 via Retrogression and Re-aging", **Mater. Sci. Eng. A** 485, 468-475, 2008.
31. Buha J, Lumley RN, Crosky AG. "Secondary Ageing in an Aluminum Alloy 7050", **Mater. Sci. Eng. A**, 492 1-10, 2008.
32. Meng, C, Long H, Zheng Y. "Study of the Mechanism of Hardness Change of Al-Zn-Mg Alloy during Retrogression Re-Aging Treatments by Small Angle X-Ray Scattering (SAXS)", **Metall. Mater. Trans. A** 28:2067-2071, 1997.
33. Papazian, J.M., "Differential Scanning Calorimetry Evaluation of Retrogressed and Re-Aged Microstructures in Aluminum Alloy 7075", **Mater. Sci. Eng. A** 79, 1, 97-104, 1986.
34. 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.
35. Feng, C., Lui, Z.Y., Ning, A.L., Lui, Y. B., Zeng, S.M., "Retrogression and Re-Aging Treatment of A1-9.99YoZn- 1.72% Cu-2.5% Mg-O. 13% Zr aluminum Alloy", **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 16, 1163-1170, 2006.
36. Baldantoni, A., "On the Microstructural Changes during the Retrogression and Re-aging of 7075 Type Aluminum Alloys", **Mater. Sci. Eng.** 72, L5-L8, 1985.
37. Li, Z. H , Xiong, B., Zhang, Y., Zhu, B.H., Wang, F., Liu, H., "Ageing Behavior of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Pre-Stretched Thick Plate", **J. Uni. Sci. and Techn. Beijing**, 14, 3, 246-250, 2007.
38. Talianker, M., Cina B., "Retrogression and Re-Aging and the Role of Dislocations in the Stress Corrosion of 7000-Type Aluminum Alloys", **Metall. Mater. Trans. A**, 20, 2087-2092, 1989.
39. Li, Z., Xiong, B., Zhang, Y., Zhu, B., Wang, F., Liu, H., "Investigation on Strength, Toughness and Microstructure of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Pre-Stretched Thick Plates in Various Ageing Tempers", **J. Mater. Process. Tech.**, 209, 2021-2027, 2009.

