

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ISIL İŞLEM
PARAMETRELERİNİN ENDÜSTRİYEL KOŞULLARDA
OPTİMİZASYONU

FUNDA GÜL KOÇ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

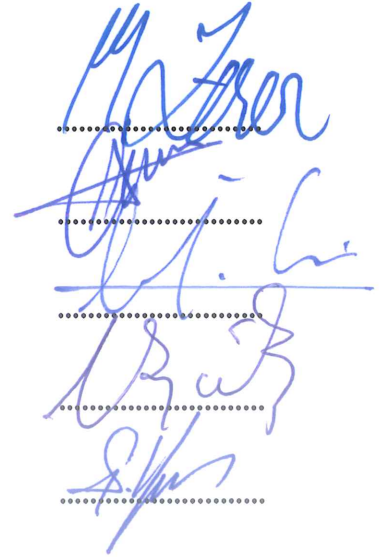
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ISIL İŞLEM
PARAMETRELERİNİN ENDÜSTRİYEL KOŞULLARDA
OPTİMİZASYONU

FUNDA GÜL KOÇ

Prof. Dr. Muzaffer ZEREN
Danışman, Kocaeli Üniv.
Doç. Dr. Aziz Armağan ARICI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Doç. Dr. Enbiya TÜREDİ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Uğur ŞEN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.
Prof. Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 22.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Havacılık ve savunma sanayisindeki gelişmeler daha yüksek özellikli büyük boyutlu ve karmaşık geometrili parçaların üretimini gerektirmektedir. Bu tez çalışması kapsamında 7075 serisi alüminyum alaşımının ısıtma işlem parametreleri optimize edilerek su verme hassasiyeti nedeniyle ortaya çıkan kalıntı gerilme probleminin giderilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların bu konuda yapılacak akademik ve endüstriyel çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Doktora tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyerek beni yönlendiren, yaptığımız tüm çalışmalarda bana olan güvenini her zaman hissettiğim, üzerimdeki emekleri için minnettar olduğum hocam Prof. Dr. Mustafa ÇÖL'ü saygı ve rahmetle anıyorum.

Prof. Dr. Mustafa ÇÖL hocamızın vefatı nedeniyle tez danışmanlığı görevini üstlenerek bu tezin tamamlanmasında emeği geçen, tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, akademik hayatım boyunca her konuda desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Muzaffer ZEREN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez çalışmam süresince desteği ve bilimsel katkılarından dolayı tez izleme jüri üyesi hocam Doç. Dr. Aziz Armağan ARICI'ya teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar süresince alüminyum konusundaki bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan, firma imkanlarını sunan başta Onat Alüminyum San. Tic. A.Ş. Genel Müdürü Dr. Tanju ÇELİKER olmak üzere tüm Onat Alüminyum çalışanlarına teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca emeği geçen tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam süresince modelleme çalışmalarında vermiş olduğu katkılardan dolayı Arş. Gör. Eser YARAR'a teşekkür ederim. Çalışma hayatım boyunca yardımlarından dolayı tüm Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çok severek yaptığım mesleğimi seçmemde önemli katkısı olan malisef zamansız bir şekilde aramızdan ayrılan dayım Murat HAS'ı rahmetle anıyorum. Çalışma hayatım ve doktora tez çalışmam boyunca desteklerini benden esirgemeyen DEMİRCAN ve KOÇ ailelerine çok teşekkür ederim. Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen, bana her zaman güvenen annem Süreyya DEMİRCAN, babam Mehmet DEMİRCAN ve anneannem Serfinaz HAS'a gösterdikleri fedakarlıklardan dolayı minnettarım. Desteğini her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşim Ünal KOÇ ve canım kızım Zeynep KOÇ'a gösterdikleri anlayış ve sabır için sonsuz teşekkür ederim.

Bu alışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2013/74 nolu proje ile desteklenmiştir. Çalışmaya olan katkılarından dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Temmuz - 2019

Funda Gl KOÇ



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
GİRİŞ	1
1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	3
1.1. Döküm Alüminyum Alaşimleri	5
1.2. Dövme Alüminyum Alaşimleri	6
2. Al-Zn-Mg-Cu ALAŞIMLARI	9
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ	13
3.1. Homojenizasyon Tavlaması	14
3.2. Çözeltiye Alma Isıl İşlemi	15
3.3. Su Verme İşlemi	17
3.3.1. Su verme hassasiyeti	21
3.3.1.1. Su verme hassasiyetine etki eden faktörler	23
3.4. Yaşlandırma Isıl İşlemi	26
4. MALZEME VE YÖNTEM	32
4.1. Malzeme	33
4.2. DTA Analizi	34
4.3. Isıl İşlem Deneyleri	35
4.3.1. Alın su verme test düzeneğinin geliştirilmesi	35
4.3.2. Alın su verme deneyleri	38
4.3.3. Sıcaklık ölçümleri	40
4.3.4. Soğumanın modellenmesi	42
4.4. Mikroyapısal İncelemeler	42
4.5. XRD Analizi	43
4.6. Sertlik Ölçümleri	43
4.7. Elektriksel İletkenlik Ölçümleri	44
4.8. Mekanik Testler	44
4.9. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri	45
4.10. Kalıntı Gerilme Ölçümleri	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
5.1. Soğuma Karakteristiğinin Belirlenmesi	47
5.2. Farklı Ortamlar için Soğumanın Modellenmesi	50
5.3. Mikroyapısal Karakterizasyon	60
5.3.1. SEM incelemeleri	60
5.3.2. TEM incelemeleri	65
5.3.3. Görüntü analizi incelemeleri	66
5.4. XRD Analizi İncelemeleri	67
5.5. Sertlik İncelemeleri	68

5.6. Elektriksel İletkenlik İncelemeleri	69
5.7. Mekanik Test İncelemeleri	70
5.8. Kırılma Yüzey İncelemeleri.....	72
5.9. Kalıntı Gerilme İncelemeleri	76
5.10. Endüstriyel Uygulama.....	77
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	85
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	99



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları.....	4
Şekil 1.2.	Alüminyum ve alaşım elementleri kombinasyonu.....	4
Şekil 1.3.	Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve farklı ısıl işlem etkilerinin karşılaştırılması.....	8
Şekil 2.1.	Yaygın olarak kullanılan 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının temel özellikleri.....	9
Şekil 2.2.	7XXX serisi alüminyum alaşımlarında çinkonun mekanik özelliklere etkisi.....	10
Şekil 2.3.	Çekirdeklenme diyagramı.....	11
Şekil 2.4.	Al-6Zn-2Cu-2Mg alaşımında alaşım elementlerinin intermetalik fazların oluşumuna etkileri a) Zn, b) Cu, c) Mg.....	12
Şekil 3.1.	7020 alüminyum alaşımının döküm sonrası faz miktarına homojenizasyon ısıl işlem parametrelerinin etkisi.....	14
Şekil 3.2.	Al-Cu faz diyagramı ve ısıl işlem sıcaklık aralıkları.....	15
Şekil 3.3.	Çözeltiye alma ısıl işlem sıcaklığının 7A04 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi.....	16
Şekil 3.4.	Çözeltiye alma ısıl işlemi esnasında a) ötektik Al ₂ Cu ve b) blok-vari Al ₂ Cu fazlarının çözünme prosesi.....	17
Şekil 3.5.	Al-Cu alaşımında su verme hızının mikroyapıya etkisi.....	18
Şekil 3.6.	7055 alüminyum alaşımında tane sınırı etrafında çökeltisiz bölge oluşumu.....	19
Şekil 3.7.	Farklı hızlarda soğutulmuş 7A09 alüminyum alaşımının a) DSC eğrisi, b) soğuma hızına bağlı olarak dönüşüm entalpisi değişimi.....	19
Şekil 3.8.	Çözeltiye alma sonrası su verme işlemi esnasında soğuma kademeleri ve mekanizması.....	20
Şekil 3.9.	7010 ve 7075 alüminyum alaşımlarının Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramları.....	22
Şekil 3.10.	Su verme ortamının ve levha kalınlığının soğuma hızına etkisi.....	22
Şekil 3.11.	Farklı alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetine soğuma hızının etkisi.....	23
Şekil 3.12.	Farklı alüminyum alaşımlarının izotermal Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) eğrileri.....	24
Şekil 3.13.	Al-9Si-3.5Cu alaşımının doğal yaşlanma davranışına magnezyumun etkisi.....	26
Şekil 3.14.	Al-Cu alaşımının Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı.....	27
Şekil 3.15.	Al-Cu alaşımlarında yaşlandırma işlemi esnasında oluşan ara fazların şematik gösterimi a) aşırı doymuş α -Al katı çözeltisi, b) θ'' geçiş fazı, c) θ kararlı fazı.....	28

Şekil 3.16.	Al-Cu alaşımlarında yaşlandırma süresinin bir fonksiyonu olarak oluşan yaşlandırma mekanizmaları ve mukavemet değişimi	29
Şekil 3.17.	Dislokasyon-çökelti etkileşimi a) kesme, b) halkalanma	30
Şekil 4.1.	AA7075 alaşımı ekstrüze profilin endüstriyel koşullarda uygulanan su verme işlemi sonrası görüntüsü	32
Şekil 4.2.	AA7075 serisi alüminyum alaşımının dökümü için kullanılan indüksiyon ocağı	33
Şekil 4.3.	7075 alaşımı biyetlerin homojenizasyon işleminin yapıldığı ısı işlem fırını	34
Şekil 4.4.	7075 serisi alüminyum alaşımı profillerin üretildiği ekstrüzyon hattı	34
Şekil 4.5.	Deneysel çalışmada kullanılan AA7075 alaşımının DTA analizi	35
Şekil 4.6.	Çalışma kapsamında kullanılan soğutma düzeneğinin bakım onarım işlemleri öncesindeki görünümü	36
Şekil 4.7.	Çalışma kapsamında kullanılan alın su verme test düzeneğinin bakım onarım işlemleri sonrasındaki görünümü	36
Şekil 4.8.	Alın su verme test düzeneğinin a) ön kesit, b) üst kesit model görüntüsü	37
Şekil 4.9.	Alın su verme test düzeneğinin a) sol kesit, b) sağ kesit model görüntüsü	37
Şekil 4.10.	Alın su verme testlerinde kullanılan numunenin a) üç boyutlu izometrik görünümü, b) teknik resmi	38
Şekil 4.11.	Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinde kullanılan ısı işlem fırını	39
Şekil 4.12.	Çözeltiye alma sonrası numunelere farklı ortamlar kullanılarak uygulanan bir uçtan soğutma işleminin görüntüsü	40
Şekil 4.13.	Çalışmada farklı soğutma ortamları için uygulanan soğuma hızı ölçümlerinin şematik görünümü	41
Şekil 4.14.	Çok kanallı veri toplayıcı ile alın su verme işlemi esnasında numune üzerinde eş zamanlı soğuma hızı ölçümünün görüntüsü	41
Şekil 4.15.	Çekme test numunelerinin teknik resmi	45
Şekil 4.16.	Deneysel çalışmada kullanılan ESPI delik delme ile kalıntı gerilme analiz sistemi	46
Şekil 5.1.	Farklı soğutma ortamları ile alın su verme işlemi esnasında numunenin profili boyunca zamana bağlı soğuma karakteristiği a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi	48
Şekil 5.2.	Su verilen yüzeyden uzaklığın bir fonksiyonu olarak numune profili boyunca soğuma hızı değişimi	49
Şekil 5.3.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 5. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer	

	çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	51
Şekil 5.4.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 15. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	52
Şekil 5.5.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 30. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	53
Şekil 5.6.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 45. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	54
Şekil 5.7.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 60. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	55
Şekil 5.8.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 90. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	56
Şekil 5.9.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 120. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	57
Şekil 5.10.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 180. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	58
Şekil 5.11.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 250. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	59
Şekil 5.12.	Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 500. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözültisi, e) %15'lik polimer çözültisi, f) %25'lik polimer çözültisi.....	60
Şekil 5.13.	Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25	

	mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) 20 °C su, e-h) 50 °C su, i-l) 75 °C su.....	61
Şekil 5.14.	Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) 20 °C su, e-h) 50 °C su, i-l) 75 °C su.....	62
Şekil 5.15.	50 C su ile alın su verilmiş ve yaşlandırılmış konumdaki numunede su verilen uçtan 25 mm mesafedeki çökteltelerin yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü	62
Şekil 5.16.	Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) %5'lik polimer, e-h) %15'lik polimer, i-l) %25'lik polimer.....	63
Şekil 5.17.	Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) %5'lik polimer, e-h) %15'lik polimer, i-l) %25'lik polimer.....	64
Şekil 5.18.	20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin yaşlanmış konumda alın yüzeyinden 75 mm mesafedeki a) SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDX analizi	65
Şekil 5.19.	20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin yaşlanmış konumda alın yüzeyinden 75 mm mesafedeki a) SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDX analizi, c) 2 nolu noktanın EDX analizi	65
Şekil 5.20.	20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin su verilen yüzeyden farklı mesafelerinin yaşlanmış konumdaki TEM görüntüleri a-c) 5 mm, b-d) 25 mm	66
Şekil 5.21.	Soğutma koşullarının numune profili boyunca tane boyutu dağılımına etkisi	67
Şekil 5.22.	Farklı ortamlarda su verilmiş ve 120 °C'de 24 saat süre ile yaşlandırılmış numunelerin XRD analizleri	67
Şekil 5.23.	Alın su verme işlemi uygulanmış numunelerde yaşlandırılmış konumda profil boyunca sertlik değişimi	69
Şekil 5.24.	Alın su verme işlemi uygulanmış numunelerde yaşlandırılmış konumda profil boyunca elektriksel iletkenlik değişimi.....	70
Şekil 5.25.	Çözeltiye alma sonrası soğutma ortamının malzemenin çekme mukavemetine etkisi.....	71
Şekil 5.26.	Numunelerde soğutma ortamına bağlı olarak %uzamanın değişimi.....	72
Şekil 5.27.	Çözeltiye alma işlemi sonrası farklı ortamlarda soğutulmuş numunelerin yaşlandırılmış konumdaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) % 25'lik polimer çözeltisi	73
Şekil 5.28.	Çözeltiye alma işlemi sonrası farklı ortamlarda soğutulmuş numunelerin yaşlandırılmış konumdaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) 20 °C su, b) 50	

	°C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) % 15'lik polimer çözeltisi, f) % 25'lik polimer çözeltisi	74
Şekil 5.29.	Sünek kırılma yüzeyinde çukurcuklar içerine yerleşmiş bulunan farklı morfolojilerdeki çökeltilerin SEM görüntüsü	74
Şekil 5.30.	Kırılma yüzeyinde peteksi yapının içerisine yerleşmiş partiküllerin a) SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDX analizi, c) 2 nolu noktanın EDX analizi	75
Şekil 5.31.	Kalıntı gerilme oluşumuna soğuma hızının etkisi a) -x yönünde b) -y yönünde	77
Şekil 5.32.	Ekstrüze 7XXX serisi alüminyum alaşımları	78
Şekil 5.33.	Talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmiş alüminyum profil.....	78
Şekil 5.34.	Isıl işlem için hazırlanmış ekstrüze profiller.....	79
Şekil 5.35.	Çözeltiye alma ısıl işlemi.....	79
Şekil 5.36.	Polimer çözeltisi ile su verme işlemi.....	80
Şekil 5.37.	Su verme işlemi sonrası temizleme aşaması.....	80

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması	5
Tablo 1.2.	Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması.....	6
Tablo 3.1.	Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler ve kodları.....	13
Tablo 3.2.	2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ile oluşan çökeltiler.....	28
Tablo 4.1.	Deneyisel çalışmada kullanılan AA7075 serisi alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (ağ.%).....	33
Tablo 4.2.	Deneyisel çalışmada soğutma amaçlı kullanılan polimer sıvısının fiziksel ve kimyasal özellikleri	39
Tablo 4.3.	Farklı konsantrasyonlardaki polimer çözeltilerinin oda sıcaklığında viskozite değerleri.....	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

η	: MgZn ₂ çökeltisi
$\acute{\eta}$: MgZn ₂ çökeltisi
S	: Al ₂ CuMg çökeltisi
T	: Al ₂ Mg ₃ Zn ₃ çökeltisi
θ	: Al ₂ Cu çökeltisi
β	: Mg ₂ Si çökeltisi
λ	: X-Işın dalga boyu
s	: Saniye

Kısaltmalar

AA	: Aluminum Association (Alüminyum Derneği)
GP	: Guinier Preston
ZSD	: Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
IM	: Işık Mikroskobu
SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
EDX	: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işın Spektrometresi)
TEM	: Transmission Electron Microscope (Geçirimli Elektron Mikroskobu)
PIPS	: Precision Ion Polishing System (Hassas İyon Parlatma Sistemi)
XRD	: X-Ray Diffraction Spectrometer (X-Işın Difraksiyon Spektrometresi)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
PFZ	: Precipitation Free Zone (Çökeltisiz Bölge)
IACS	: International Annealed Copper Standart (Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardı)
DIN	: Deutsche Institut für Normung (Alman Standartları Enstitüsü)
ESPI	: Electronic Speckle Pattern Interferometry

AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ISIL İŞLEM PARAMETRELERİNİN ENDÜSTRİYEL KOŞULLARDA OPTİMİZASYONU

ÖZET

Al-Zn-Mg-Cu alaşımları; sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı havacılık, savunma ve otomotiv sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Endüstride ekstrüzyon ve dövme gibi plastik şekil verme yöntemleri ile üretilen parçaların ısıtılmasında karşılaşılan en önemli sorun su verme hassasiyeti nedeniyle ortaya çıkan kalıntı gerilme problemidir. Bu çalışmada; havacılık ve savunma sanayisinde önemli bir kullanım alanına sahip AA7075 serisi alüminyum alaşımlarının ısıtılmasında önemli bir problem olan su verme hassasiyeti Jominy alın su verme test yönetimi ile farklı soğutma ortamları kullanılarak incelenmiştir. Bu problemin giderilmesi amacıyla T6 ısıtılmasında soğutma koşulları optimize edilerek en düşük kalıntı gerilme oluşumlarına yol açan ve malzemenin endüstriyel kullanım koşullarına uygun mekanik özellikleri de sağlayabilen ısıtılma parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA7075 Alüminyum Alaşımı, Isıl İşlem, Kalıntı Gerilme, Mekanik Özellikler, Su Verme Hassasiyeti.

OPTIMIZATION OF HEAT TREATMENT PARAMETERS IN AA7075 ALUMINUM ALLOY UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

ABSTRACT

Al-Zn-Mg-Cu Aluminum alloys are extensively used in aviation, defense and automotive industries due to their low density, high strength, hardness, toughness and corrosion resistance. The significant problem in heat treatment of parts produced by the methods of plastic forming like extrusion and forging is residual stress that occurs because of quenching sensitivity in the industry. In this study, quench sensitivity problem of AA7075 series aluminum alloys which have a wide usage in aviation and defense industries was investigated by using Jominy end quench test with different quenching mediums. Heat treatment parameters which lead to minimum residual stress and provide mechanical specifications available for industrial usage conditions were determined by optimizing quenching conditions in T6 heat treatment to solve this problem.

Keywords: AA7075 Aluminum Alloy, Heat Treatment, Residual Stress, Mechanical Properties, Quench Sensitivity.

GİRİŞ

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı endüstride birçok alanda geniş kullanıma sahiptirler [1].

Ülkemizde farklı kompozisyonlarda alüminyum alaşımları parçaların üretiminde yüksek mekanik özellik ve boyutsal çeşitlilik konusunda otomotiv, havacılık ve savunma sanayi sektörlerinin kalite ve sertifika gerekliliklerini ve standardın gerektirdiği mukavemet değerlerini karşılamakta güçlükler yaşanabilmektedir. Bu durum alüminyum alaşımlarının üretim proseslerini modifiye etme ve yeni prosesler geliştirmeyi zorunlu hale getirmektedir. Üretimde ürünlere istenilen nihai mekanik özelliklerin kazandırıldığı adım ısıl işlem prosesidir. Bu yüzden istenilen mekanik özelliklerin sağlanması, üretim proseslerinin iyileştirilmesinin yanında üretim sonrasında yapılan ısıl işlem prosesinde de gelişimi önemli hale getirmektedir.

Endüstriyel çalışmalarda üreticileri zorlayan ve sıkıntıya düşürebilecek konulardan birisi ısıl işlemle sertleştirilen malzemelerin nihai mekanik özelliklerinin tüm proseslerin son aşamasında tespit edilebilmesidir. Bu aşamada alınacak uygun olmayan mekanik özellikler bazı proses adımlarının tekrarlanmasına, üretim maliyetlerinin ve zaman kayıplarının artmasına neden olmaktadır.

Endüstride ekstrüzyon ve dövme gibi plastik şekil verme yöntemleri ile üretilen karmaşık şekilli profillerin ve parçaların ısıl işleminde karşılaşılan bir diğer önemli problem ise su verme hassasiyeti nedeniyle ortaya çıkan kalıntı gerilme problemidir. Bu problem ısıl işlem sonrasında parçanın boyutsal hassasiyetini koruyamayarak çarpılma, burulma gibi olumsuz durumların oluşmasına neden olabilmektedir.

Isıl işlem proseslerinde arzu edilen mekanik özellikleri ve minimum kalıntı gerilme oluşumunu sağlamada en etkin rol çözeltiye alma işlemi sonrası su verme işlemine aittir. Her alüminyum alaşımının farklı ısıl hassasiyet ve davranışlar göstermesinden ve bunun yanında ürün değişkenliğinden kaynaklanan proses farklılıkları mevcuttur. Bu sebeple ısıl işlem proseslerinde alaşımın su verme hassasiyeti göz önünde bulundurularak uygun soğutma koşullarının uygulanması gerekmektedir. Ancak endüstriyel koşullarda üretim, bu ihtiyacı karşılayacak esnekliği kazanamamıştır.

Genellikle alışlagelmiş ya da tesisin el verdiği şartlarda soğutma işlemi uygulanmaktadır. Endüstriyel uygulanabilirlik açısından kullanım şartlarına uygun mekanik özellik ve boyutsal hassasiyeti sağlayan ekonomik ve en uygun proses şartlarının belirlenmesi önemlidir.

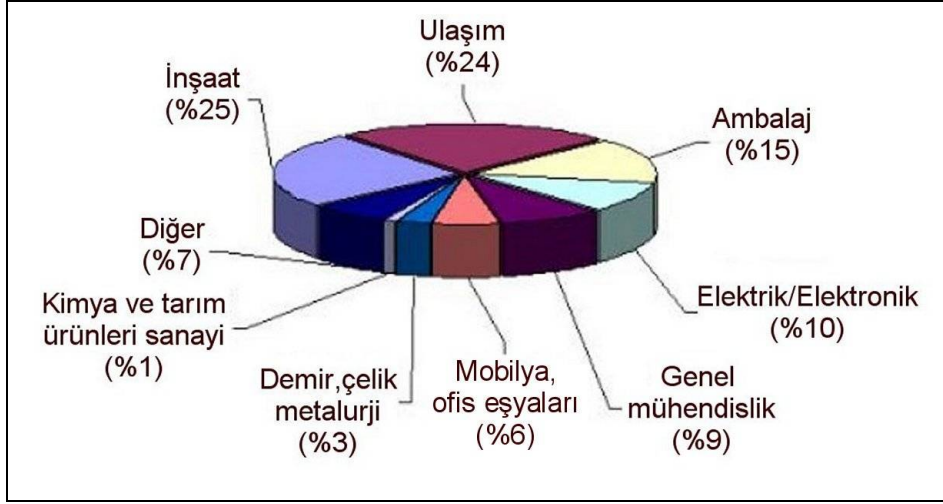
1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum yeryüzünde silisyum ve oksijenden sonra en çok bulunan elementtir. Alüminyum elementinin kimyasal sembolü “Al” atom numarası 13’tür. Alüminyum ilk kez 1825 yılında Danimarka’da Hans Cristian Oersted tarafından susuz alüminyum klorürün sodyum amalgam ile indirgenmesi ile saf alüminyum partikülleri olarak elde edilmiştir. 1845 yılında Alman bilim adamı Wöhler’in amalgamı potasyum ile değiştirmesi ve alüminyum klorürün potasyum ile indirgenmesi reaksiyonu sonucunda daha yüksek miktarlarda alüminyum eldesi sağlanmıştır. Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çoğu 1827 ile 1847 yılları arasında keşfedilmiştir [2,3].

1886 yılında Fransa’da Paul Louis Toussaint Heroult’un Amerika’da ise Charles Martin Hall’un birbirlerinden bağımsız olarak geliştirdikleri ergiyik kriyolitte çözüldürülmüş alüminanın elektrolitik olarak indirgenmesi ile üretimi prosesi alüminyumun endüstriyel olarak üretilmesine olanak sağlamıştır [3]. Alüminyumun üretimi Hall-Heroult prosesine dayanmaktadır [3,4]. 1888 yılında Karl Josef Bayer’in geliştirerek patentini almış olduğu boksitten alümina üretimi ise dünya çapında alüminyum üretim enüdstisinin temel taşı olmuştur [5].

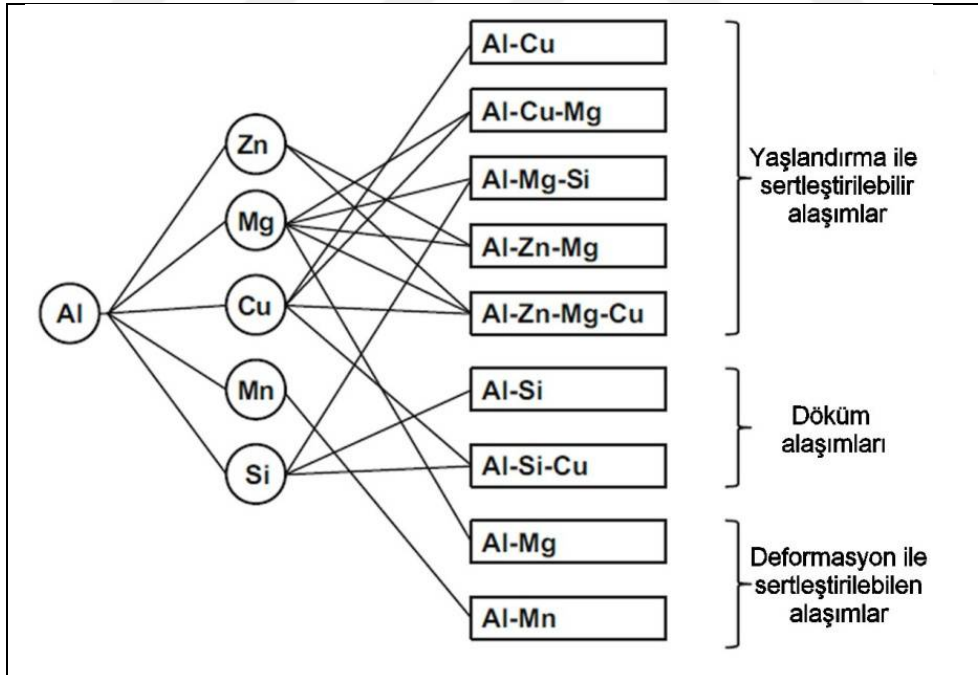
Alüminyum, yıllık 24 milyon tonluk tüketim miktarı ile dünyada en çok tüketilen demir dışı metalidir. Bu miktarın %75’i cevherden üretilen birincil alüminyum ile kalan kısmı ise hurdadan geri dönüşüm yolu ile üretilen ikincil alüminyum ile karşılanmaktadır [6].

Alüminyum $2,7 \text{ g/cm}^3$ değerindeki düşük yoğunluğu, uygun alaşımlama ve ısıl işlemler ile elde edilen yüksek mekanik özellikleri, korozyon dayanımı, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, yansıtıcılık gibi özellikleri nedeniyle otomotiv, savunma sanayi, kimya ve gıda sanayisi gibi birçok endüstriyel alanda geniş bir kullanıma sahiptir [7-9]. Şekil 1.1’de alüminyum alaşımlarının kullanım alanları verilmiştir [10].



Şekil 1.1. Alüminyum alaşımlarının kullanım alanları [10]

Alüminyumun mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla silisyum, magnezyum, bakır, mangan, çinko gibi elementler ile alaşımlandırma işlemi yapılır [11]. Şekil 1.2'de alaşımlama ile elde edilen başlıca alüminyum alaşımları verilmiştir [12].



Şekil 1.2. Alüminyum ve alaşım elementleri kombinasyonu [12]

Alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine göre kum kalıba döküm, basınçlı döküm gibi yöntemler ile üretilen döküm alaşımları ve ekstrüzyon, dövme, haddeleme gibi yöntemler ile üretilen dövme alaşımları olmak üzere iki ana

gruba ayrılmaktadır [2,12]. Döküm ve dövme alüminyum alaşımları da içerdikleri alaşım elementlerine bağlı olarak sertleştirilebilme özelliğine göre ısıtıl işlem uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [12,13].

1.1. Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımlarının alaşım dizaynı ve ısıtıl işlem durumuna göre sınıflandırılmaları Tablo 1.1’de verilmiştir. Döküm alaşımlarının sınıflandırılmasında Alüminyum Derneği (Aluminum Association, AA) tarafından belirlenen 4 rakamdan oluşan tanımlama sistemi kullanılmaktadır . Döküm alaşım tanımlamalarında ilk rakam ana alaşım elementini, 2. ve 3. rakamlar alaşımın saflığını, 4. rakam ise döküm parçanın durumunu (ingot, vs.) ifade etmektedir [13,14].

Tablo 1.1. Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması

Seri	Alaşım	Isıl İşlem
1XX.X	Saf Alüminyum (≥ 99.00 Al)	Isıl işlem uygulanamaz
2XX.X	Al-Cu Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir
3XX.X	Al-Si-Cu ve/veya Mg Alaşımı	Isıl işlem kısmen uygulanabilir
4XX.X	Al-Si Alaşımı	Isıl işlem uygulanamaz
5XX.X	Al-Mg Alaşımı	Isıl işlem uygulanamaz
6XX.X	Kullanılmayan Seri	-
7XX.X	Al-Zn Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir
8XX.X	Al-Sn Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir
9XX.X	Al-Diğer Elementlerin Alaşımı	-

1.2. Dövme Alüminyum Alaşımları

Alüminyum dövme alaşımlarının alaşım dizaynı ve ısı işlem durumuna göre sınıflandırılmaları Tablo 1.2’de verilmiştir. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında da döküm alaşımlarında olduğu gibi Alüminyum Derneği (Aluminum Association, AA) tarafından belirlenen 4 rakamdan oluşan tanımlama sistemi kullanılmaktadır [13,14].

Tablo 1.2. Alüminyum dövme alaşımlarının sınıflandırılması

Seri	Alaşım	Isıl İşlem
1XXX	Saf Alüminyum (≥ 99.00 Al)	Isıl işlem uygulanamaz
2XXX	Al-Cu Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir
3XXX	Al-Mn Alaşımı	Isıl işlem uygulanamaz
4XXX	Al-Si Alaşımı	Isıl işlem uygulanamaz
5XXX	Al-Mg Alaşımı	Isıl işlem uygulanamaz
6XXX	Al-Mg-Si Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir
7XXX	Al-Zn Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir
8XXX	Al-Diğer Elementlerin Alaşımı	-
9XXX	Al-Li Alaşımı	Isıl işlem uygulanabilir

Alüminyumun içerdiği alaşım elementi ve miktarı alaşımın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Alüminyum alaşımlarının temel özellikleri aşağıda verilmiştir [12,15]:

1XXX serisi alüminyum alaşımları %99 ve daha yüksek saflık derecesine sahip alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşımlar yüksek korozyon dayanımı, termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerinden dolayı elektrik, gıda ve kimya sanayisinde kullanım alanına sahiptir.

2XXX serisi alüminyum alaşımları temel alaşım elementi bakırdır. Bakırın yanısıra magnezyum ve silisyum ile de alaşımlandırılarak mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Çökelme sertleşmesi ile yüksek mekanik özelliklere sahip olabilen bu alaşımlar havacılık ve savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi mangandır ve yüksek mukavemet değerleri için Mg ile alaşımlandırılabilir. Alaşım elementi içeriği sınırlı olan bu alaşım serisi yüksek korozyon dayanımı ve şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptir.

4XXX serisi alüminyum alaşımları silisyum içermektedir. Bu alaşımlar kaynak teli üretiminde ve lehimleme işlemlerinde kullanılabilir.

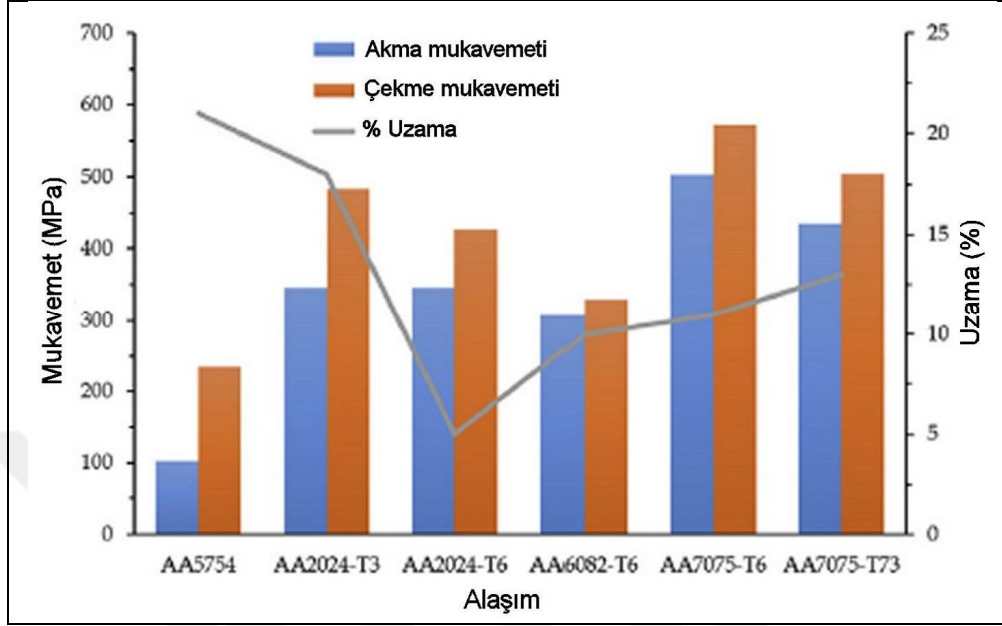
5XXX serisi alüminyum alaşımlarının temel alaşım elementi magnezyumdur. İyi şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüksek korozyon dayanımı özelliklerine sahip bu alaşımlar gıda, kimya, inşaat ve denizcilik sektörlerinde kullanım alanlarına sahiptir.

6XXX serisi alüminyum alaşımları magnezyum ve silisyum içermektedir. Çökelme sertleşmesi uygulanabilen bu alaşımlar yüksek mukavemet, korozyon, kaynaklanabilirlik ve şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

7XXX serisi alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementi çinkodur. Magnezyum ve bakır ile alaşımlandırılarak üstün mekanik özelliklere sahip olan bu alaşımlar havacılık, savunma ve otomotiv sanayisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları grubunda bulunan Al-Zn-Mg-Cu alaşımları, alaşım elementi içeriği ve ısıl işlem koşullarına bağlı olarak 500 MPa'ın üzerinde akma mukavemetine sahip olabilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve farklı ısıl işlem koşullarının alaşım özelliklerine etkileri Şekil 1.3'te verilmiştir [16]. T6 ısıl işlemi uygulanmış AA7075 serisi

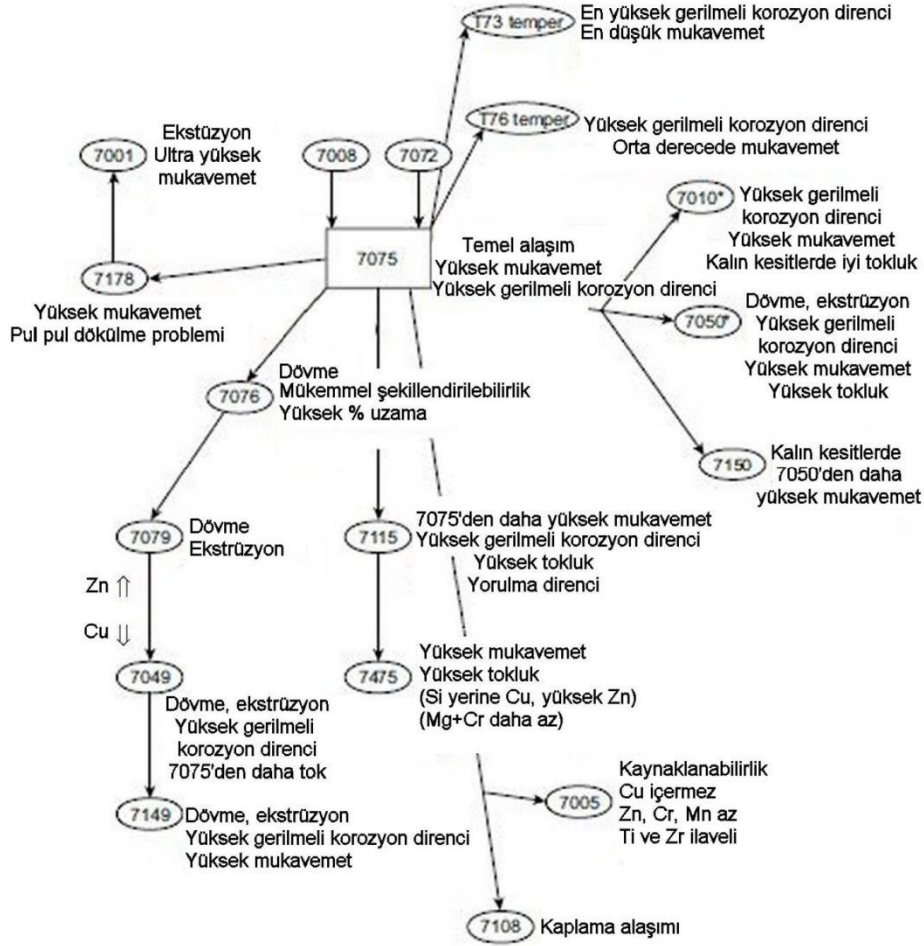
alüminyum alaşımlarının en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 1.3. Yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin ve farklı ısıl işlemlerin etkilerinin karşılaştırılması [16]

2. Al-Zn-Mg-Cu ALAŞIMLARI

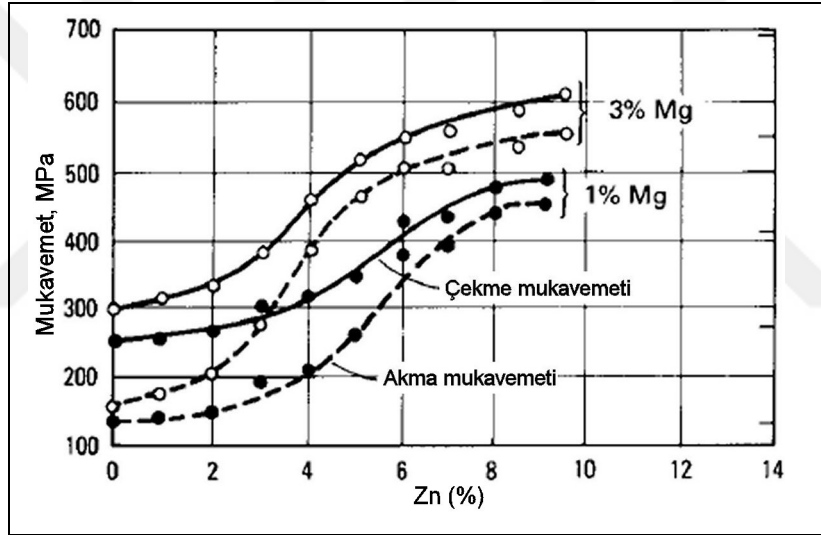
Al-Zn-Mg-Cu alaşımları sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, sertlik, tokluk ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı havacılık, savunma ve otomotiv sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [17-20]. Al-Zn-Mg-Cu alaşımları içerisinde ilk olarak 1940 yılında AA7075 alaşımı geliştirilmiştir [11]. Günümüzde farklı alanlarda yaygın olarak kullanılan 7XXX serisi alüminyum alaşımları ve temel özellikleri Şekil 2.1’de verilmiştir [12].



Şekil 2.1. Yaygın olarak kullanılan 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının temel özellikleri [12]

Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında mukavemet ve tokluğun optimizasyonu alaşım elementleri içeriği ve ısıtılma koşullarının kontrolü ile

mümkündür [21,22]. Çinko 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında ağırlıkça % 1 ile % 8 aralığında bulunan ana alaşım elementidir. Alaşımın içerdiği çinko miktarı arttıkça akma ve çekme mukavemeti yükselirken kırılma tokluğu düşer. Magnezyum çinko ile $MgZn_2$ çökeltileri oluşturarak alaşımın mukavemetinin artmasını sağlar. Şekil 2.2’de çinkonun %1 ve %3 oranında magnezyum ve %1,5 oranında Cu içeren 7XXX serisi alaşımın mekanik özelliklerine etkisi verilmiştir. Bakır ise ısıtılma esnasında katı çözeltinin aşırı doygunluğunu arttırarak alaşımın yaşlanma davranışını arttırır. Bakır oranı arttıkça bu alaşımlar için önemli bir problem olan su verme hassasiyeti artar. Bakırın 7XXX serisi alaşımların korozyon dayanımı üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır [4,12,23].



Şekil 2.2. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında çinkonun mekanik özelliklere etkisi [4]

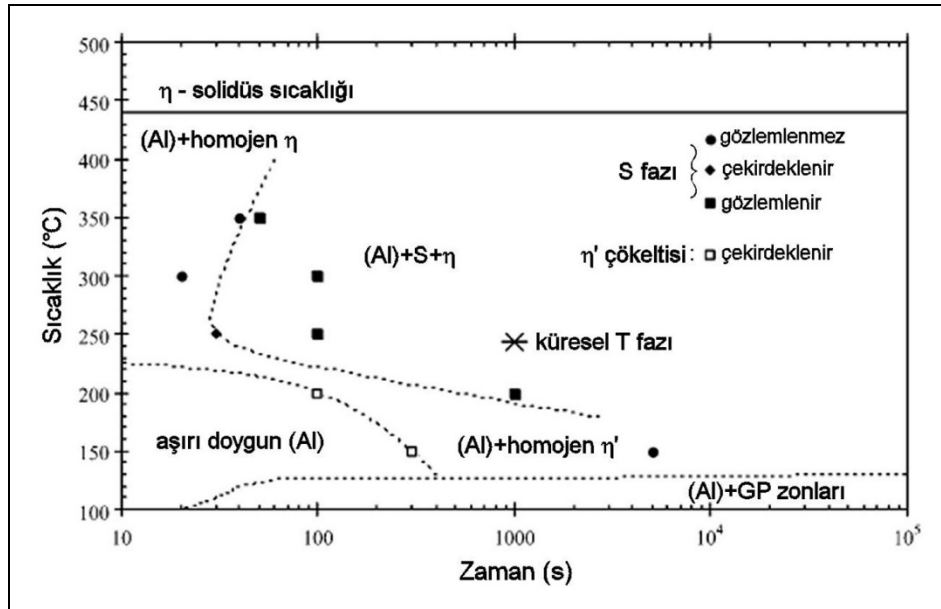
7XXX serisi alüminyum alaşımlarında çinko ve magnezyum alüminyum içerisinde yüksek miktarda katı çözünlüğe sahip olduğundan bu alaşım elementleri alaşımın çökeltme sertleşmesi özelliklerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Al-Zn-Mg-Cu alüminyum alaşımlarında yaşlandırma işlemi ile oluşan çökelti sırası genellikle aşağıda verildiği şekildedir [24,25]:

Aşırı Doymuş Katı Çözelti → GP Zonu → Yarı Kararlı η → Kararlı η ($MgZn_2$)

7XXX serisi alüminyum alaşımlarında yaşlanma sırasında oluşan GP zonu matrisle uyumlu bir fazdır. η fazının oluşması için bir tür başlangıç yapısı

olarak görev yapmakta ve oluşumu ani soğutma sırasında meydana gelen boşlukça zengin kümelerden kaynaklanmaktadır. Yaşlandırma ile sertleştirmede en önemli etkiyi yarı kararlı η fazı oluşturmaktadır. Bu nedenle çökeltme sertleşmesinin en önemli aşaması GP zonundan yarı kararlı η fazının oluşmasıdır. η fazı hegzagonal kristal yapıya sahip olur, kafes parametreleri $a=0,496$ nm ve $c=1,402$ nm'dir. Bu faz matriste, çökelti-matris arası uyumlu bir ara yüzey ile çekirdeklenir. Artan sıcaklıkla birlikte yarı kararlı η fazı yerini kararlı η ($MgZn_2$) fazına bırakır. Kararlı η fazı matrisle uyumsuzdur. Hegzagonal kristal yapıya sahiptir ve kafes parametreleri $a=1.521$ nm, $c=0,806$ nm'dir [26-29].

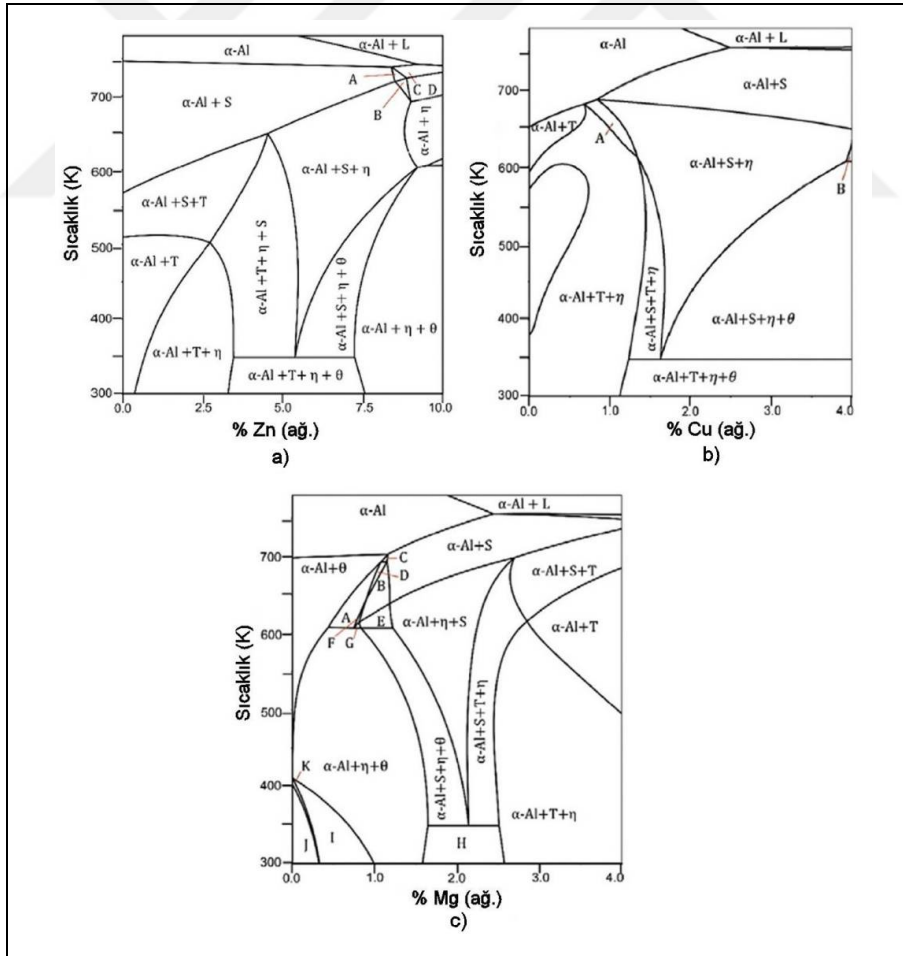
Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında kimyasal kompozisyon ve ısıl işlem koşullarına bağlı olarak matrisle uyumsuz T ($Al_2Mg_3Zn_3$), S (Al_2CuMg), θ (Al_2Cu), Al_7Cu_2Fe intermetalik fazları oluşabilmektedir [30-32]. S (Al_2CuMg) ve Al_7Cu_2Fe intermetalikleri kırılman ve çok yüksek ergime sıcaklığına sahip fazlar olup çözeltilmeye ısıl işlemi ile çözündürülemez [32]. Şekil 2.3'te 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında gözlemlenen çökeltilerin zaman-sıcaklık diyagramına göre çekirdeklenme bölgeleri verilmiştir [33].



Şekil 2.3. Çekirdeklenme diyagramı [33]

Şekil 2.4'te 7XXX serisi alüminyum alaşımında Zn, Cu ve Mg içeriğinin çökeltilerin ve intermetalik fazların oluşumları üzerine etkisi verilmiştir [34].

Düşük Zn miktarlarında, düşük Zn/Mg oranlarında magnezyumca zengin, düşük ergime sıcaklığına sahip T ($Al_2Mg_3Zn_3$) fazının kararlılığı artar. Zn miktarı arttıkça çinko içeriği zengin η ($MgZn_2$) çökeltilerinin oluşumu ve kararlılığı artar. Düşük Cu içeriğine sahip alaşımlarda T ($Al_2Mg_3Zn_3$) fazından daha yüksek Cu çözünürlüğüne sahip η ($MgZn_2$) fazı yerine yüksek magnezyum ve çinko içeriğine sahip T ($Al_2Mg_3Zn_3$) fazının oluşumu artar. Alaşımın bakır içeriğinin %1'in üzerinde olması durumunda düşük sıcaklıklarda θ (Al_2Cu) çökeltileri oluşabilir. Cu içeriği arttıkça soğuma hızına bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda S (Al_2CuMg) fazı oluşur. Ayrıca magnezyum η ($MgZn_2$) ve T ($Al_2Mg_3Zn_3$) fazlarını kararlı hale getirir. Alaşımın Mg ve Zn içeriği azaldıkça katı çözeltilerin aşırı doygunluğu azalır. Bu durum 7XXX serisi alaşımlara esas sertlik katkısı veren η ($MgZn_2$) çökeltilerinin oluşumunun azalmasına neden olur [34].



Şekil 2.4. Al-6Zn-2Cu-2Mg alaşımında alaşım elementlerinin intermetalik fazların oluşumuna etkileri a) Zn, b) Cu, c) Mg [34]

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ

Isıl işlem uygulanabilir 2XXX, 6XXX, 7XXX ve 9XXX serisi alüminyum alaşımlarında yüksek sertlik ve mukavemet değerleri sırasıyla çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma işlemlerinden oluşan çökelti sertleşmesi ısıl işlemi ile elde edilmektedir [35-37]. Tablo 3.1’de alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler ve kodları verilmiştir [13,38].

Tablo 3.1. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler ve kodları

Isıl İşlem Kodu	Isıl İşlem Tanımı
F	İmal edildiği şekilde
0	Yeniden kristallenme tavlaması uygulanmış
W	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış
T	Yaşlandırma işlemi uygulanmış
T1	Sıcak şekillendirme işlemi sonrası su verilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T2	Sıcak şekillendirme işlemi sonrası su verilmiş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T4	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış
T5	Sıcak şekillendirme işlemi sonrası su verilmiş ve suni yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve suni yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve suni yaşlandırma ile aşırı yaşlandırılmış
T8	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, suni yaşlanmış, soğuk şekillendirilmiş
T10	Sıcak şekillendirme işlemi sonrası su verilmiş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırılmış

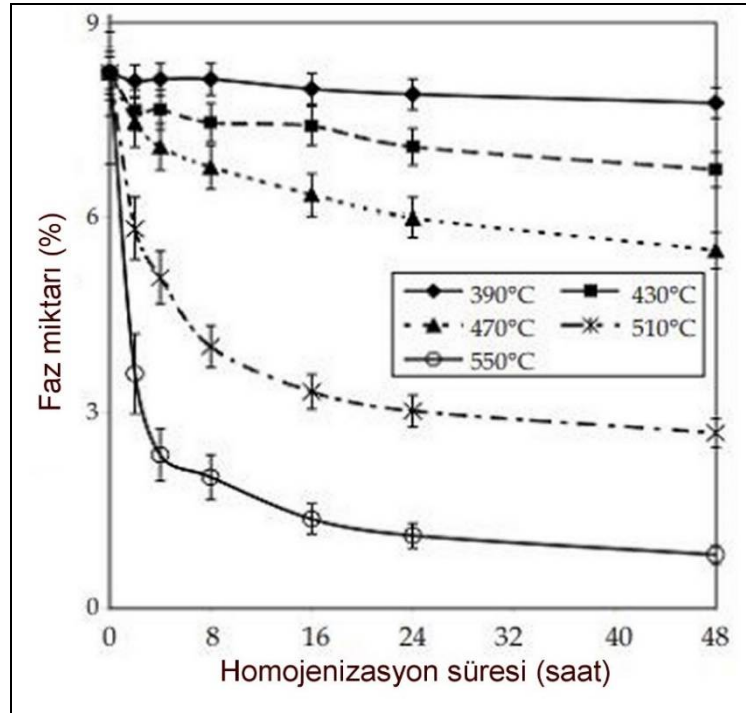
3.1. Homojenizasyon Tavlaması

Homojenizasyon tavlaması; alaşımın şekillendirilebilme kabiliyetini arttırmak için döküm sonrası mikroyapıda oluşan segregasyonların giderilmesi ve denge dışı oluşan kaba intermetalik fazların çözündürülmesi amacıyla uygulanan bir ısıtma işlemidir [39,40].

Alüminyum alaşımlarında homojenizasyon tavlaması alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak ekstrüzyon, haddeleme gibi şekillendirme işlemleri öncesinde genellikle 450-500 °C sıcaklık aralığında uygulanmaktadır [41].

Alaşım elementleri döküm işlemi esnasında sıvı metal içerisinde segrege olarak homojen olmayan bir dağılım sergileyebilmektedir. Bu durum katılaşıma sonrasında segregasyon oluşumlarına neden olabilir [42].

Homojenizasyon işleminde en önemli ısıtma işlem parametreleri sıcaklık ve zamandır. Şekil 3.1'de homojenizasyon sıcaklığı ve süresinin döküm yapısındaki fazların miktarına etkisi verilmiştir. Artan sıcaklık ve zamana bağlı olarak çözünen faz miktarının arttığı görülmektedir [43].

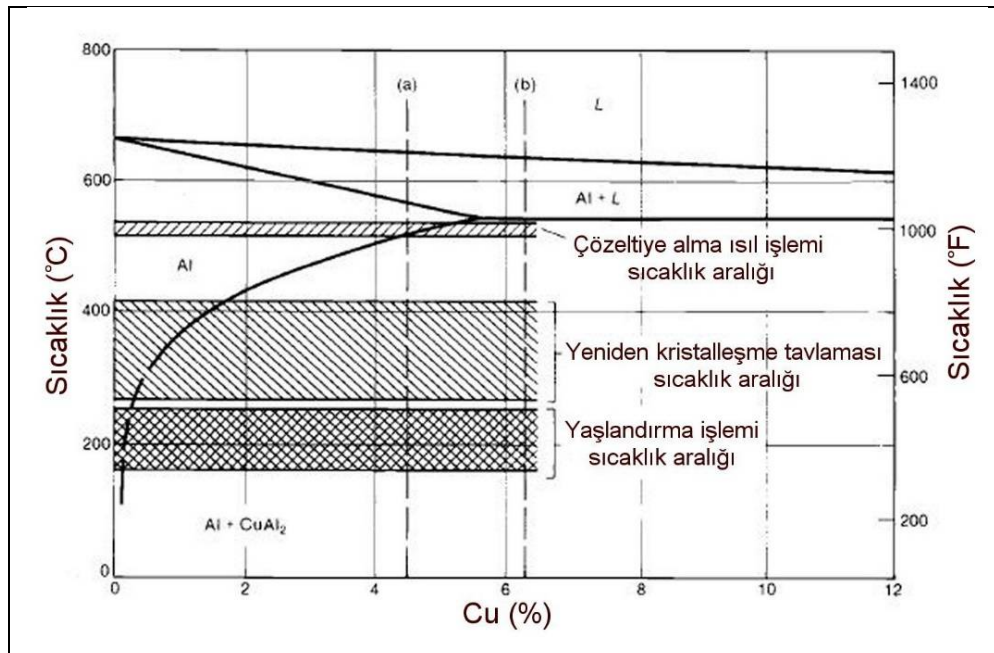


Şekil 3.1. 7020 alüminyum alaşımının döküm sonrası faz miktarına homojenizasyon ısıtma işlem parametrelerinin etkisi [43]

Düşük ergime sıcaklığına sahip fazlar sıcak deformasyon sırasında alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilme davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. Döküm işleminde katılaşma sırasında alaşımın kimyasal bileşimine ve içerdiği safsızlıklara bağlı olarak Fe, Mn ve Si içeren keskin köşeli, sert ve kırılğan yapıya sahip intermetalikler oluşabilir. Bu intermetalik fazlar alaşımın sıcak işlenebilirliğini azaltmaktadır ve ekstrüzyon sırasında uygulanan işlem parametreleri aralığını sınırlamaktadır. Bu nedenle, yüksek mekanik özellikler ve şekillendirilebilme kabiliyeti elde etmek için bu intermetalik fazların da homojenizasyon ısıl işlemi ile çözündürülmesi gerekmektedir [42,43].

3.2. Çözeltiye Alma Isıl İşlemi

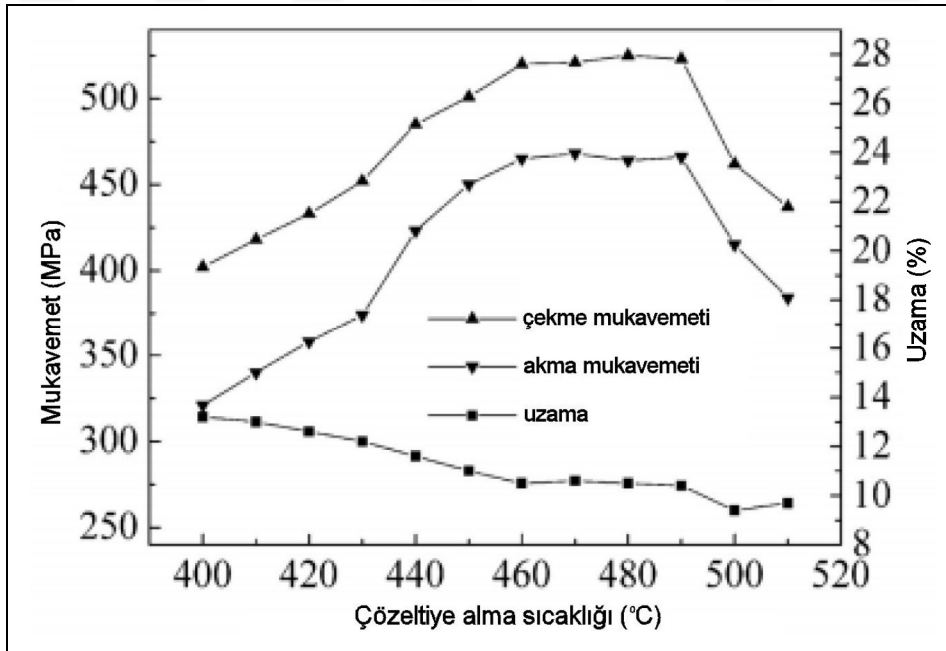
Çözeltiye alma ısıl işlemi; yüksek sıcaklıkta çözünürlüğün artmasına bağlı olarak yapıdaki bileşenleri tek faz alanında çözündürüp, aşırı doymuş katı çözelti elde etmektir. Çözeltiye alma işleminde alaşımın kompozisyonu, ısıtma hızı ve parça boyutuna bağlı olarak ısıtma süresi oldukça önemlidir. Çözeltiye alma işlemi sırasında aşırı ısıtma alaşımın çekme dayanımı, süneklik ve kırılma tokluğu özelliklerini olumsuz yönde etkiler [44,45]. Şekil 3.2'deki Al-Cu denge diyagramında Al-Cu alaşımları için en uygun çözeltiye alma ısıl işlem sıcaklık aralığı 521 °C - 575 °C olarak verilmektedir [45].



Şekil 3.2. Al-Cu faz diyagramı ve ısıl işlem sıcaklık aralıkları [45]

Çözeltiyeye alma ısı işlem sıcaklığı tane sınırı segregasyonu oluşumu üzerinde en önemli etkiye sahiptir. Tane sınırı çökeltileri genellikle büyük oranlarda Mg, Si, Al, düşük oranlarda Zn ve Cu alaşım elementleri içerirler. Ara yüzey enerjileri yüksek olan çökeltiler, tane sınırlarında çökeltme eğilimindedir ve kırılabilirliğe neden olmaktadır [46].

Çözeltiyeye alma sıcaklığı alaşımın mekanik özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Şekil 3.3'te çözeltiyeye alma ısı işlem sıcaklığının 7A04 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi verilmiştir. Alaşımın çözeltiyeye alma sıcaklığı arttıkça çekme ve akma mukavemetinin 460 °C ye kadar belirgin bir şekilde artış gösterdiği, % uzama değerinin azaldığı ve bu değişimin 460-490 °C aralığında daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte yapıda bulunan bileşenlerin çözünme miktarı artar. Bu durum yaşlandırma işlemi sonrasında sertlik katkısı veren çökeltilerin miktarının artmasına imkan sağlar. 490 °C'nin üzerindeki çözeltiyeye alma sıcaklıklarında ise tane kabalaşması nedeniyle alaşımın çekme ve akma mukavemetinin azaldığı görülmektedir [20].

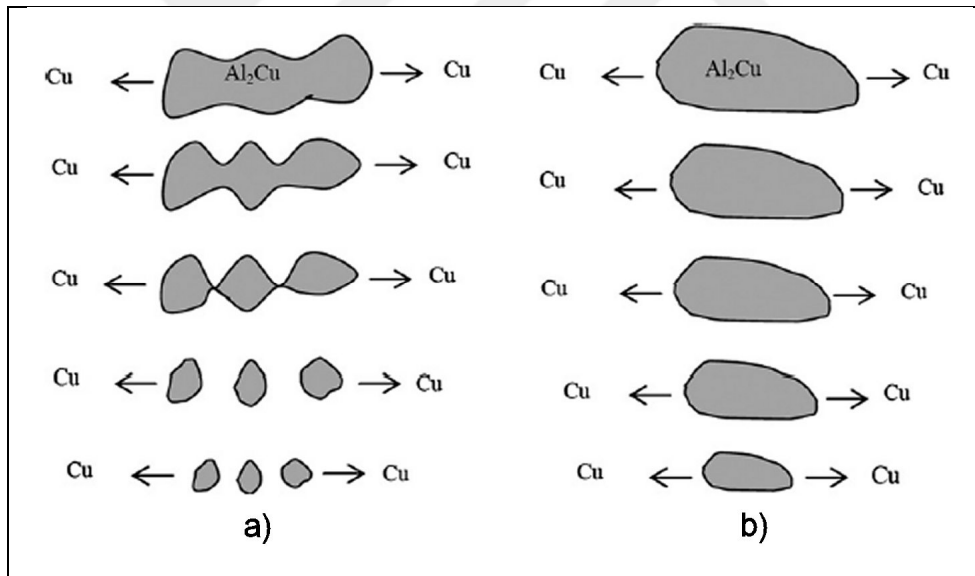


Şekil 3.3. Çözeltiyeye alma ısı işlem sıcaklığının 7A04 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi [20]

Kompleks yapıdaki üçlü ve dördümlü sistemlerde çözeltiyeye alma ısı işlem sıcaklığı diğer elementlerin katı çözünürlüğe ve ergime sıcaklığına etkisi göz

önünde bulundurularak belirlenmelidir. Alüminyum-lityum alaşımlarında magnezyum lityumun alüminyum içerisindeki çözünürlüğünü azaltır. Al-Cu alaşımlarında ise magnezyum alaşımın ergime sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır [47].

Çözeltiye alma işleminde çözünme için gerekli olan zaman alaşımın kompozisyonu ve döküm işleminde katılma sırasında oluşan fazların morfolojisi ve dağılımına bağlıdır. Şekil 3.4'te alaşımın içerdiği intermetaliklerin morfolojisinin çözeltiye alma ısıl işlemi esnasında çözünme davranışlarına etkisi verilmiştir. Çözeltiye alma işlemi esnasında ötektik yapıdaki Al_2Cu fazı bakırın difüzyonu ile daha küçük boyutlara parçalanarak ve küresel yapıya sahip olarak çözünmektedir. Blok-vari ve kaba yapıya sahip Al_2Cu fazı ise ötektik yapıdaki Al_2Cu fazına göre parçalanmadan sadece difüzyon yolu ile küreselleşerek daha uzun sürede çözünmektedir [48].

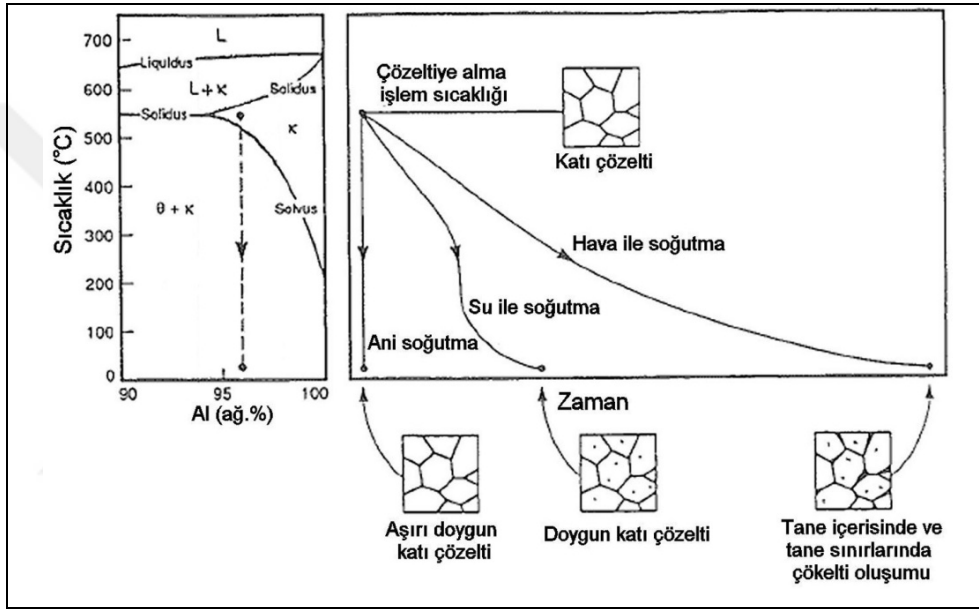


Şekil 3.4. Çözeltiye alma ısıl işlemi esnasında a) ötektik Al_2Cu ve b) blok-vari Al_2Cu fazlarının çözünme prosesi [48]

3.3. Su Verme İşlemi

Çözeltiye alma işleminden sonra uygulanan su verme işleminde soğutma hızı istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesinde önemli bir aşamadır [49]. Aşırı doymuş katı çözeltinin durumu, içerdiği boşyer, dislokasyon, tane sınırları gibi kafes hatalarının sayısı ve dağılımı yaşlandırma işlemi sonrası oluşan çökelti oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [50-52].

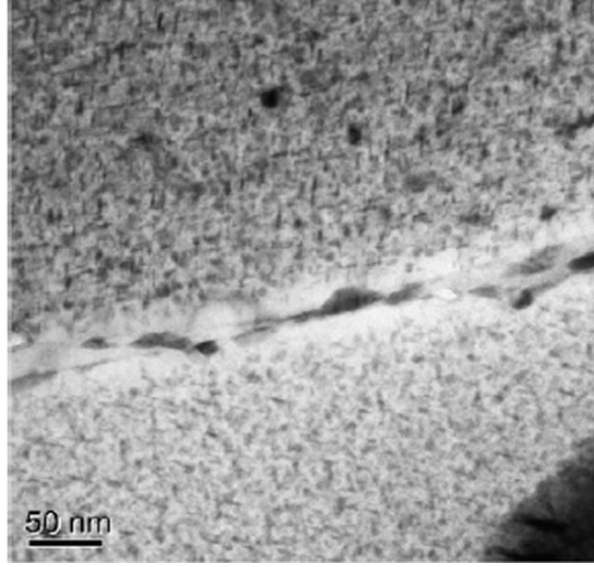
Su verme işleminde soğuma hızı ikincil çökeltilerin oluşmasına imkan vermeyecek kadar hızlı olmalıdır. Düşük su verme hızları yapıda ikincil fazların çökmesine neden olur. Oluşan bu ikincil çökeltiler katı çözeltinin aşırı doygunluğunu azaltır ve yaşlandırma sonrası oluşacak çökeltiler için heterojen çekirdeklenme yöreleri oluşturur. Bu durum malzemenin sertliğinin ve mukavemetinin beklenilenden daha düşük olmasına neden olur [53-55]. Şekil 3.5'te Al-Cu alaşımında çözeltiliye alma işlemi sonrası soğutma hızına bağlı olarak yapıda meydana gelen değişimler görülmektedir [56].



Şekil 3.5. Al-Cu alaşımında su verme hızının mikroyapıya etkisi [56]

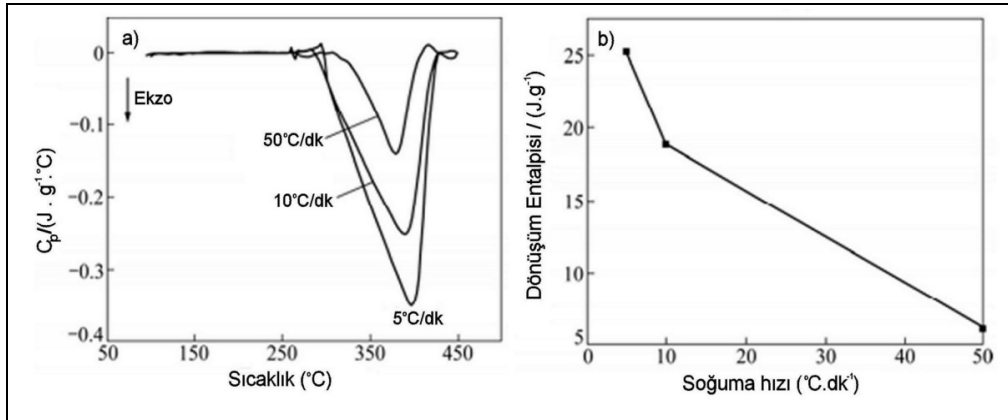
Soğuma hızındaki azalmaya bağlı olarak katı çözeltinin aşırı doygunluğundaki azalma tane sınırlarında çökeltilerin çekirdeklenmesine ve içerdiği boşyer konsantrasyonunun azalmasına yol açar. Bu durum mikroyapıda Şekil 3.6'da verilen SEM görüntüsünde görüldüğü gibi tane sınırları boyunca ortaya çıkan ve dolayısıyla malzemenin mukavemetinin düşmesine neden olan çökeltilisiz bölgelerin (PFZ) oluşumuna neden olur [52].

Tane sınırlarındaki çökeltilisiz bölgelerin oluşumu ve genişliği katı çözeltinin içerdiği alaşım elementlerinin difüzyonu ve boşyer konsantrasyonuna bağlıdır. Yüksek çözeltiliye alma sıcaklıkları ve su verme hızı ile katı çözeltinin aşırı doymuşluğu ve boşyer içeriği artırılarak bu bölgelerin oluşumunu engellemek mümkündür [56,57].



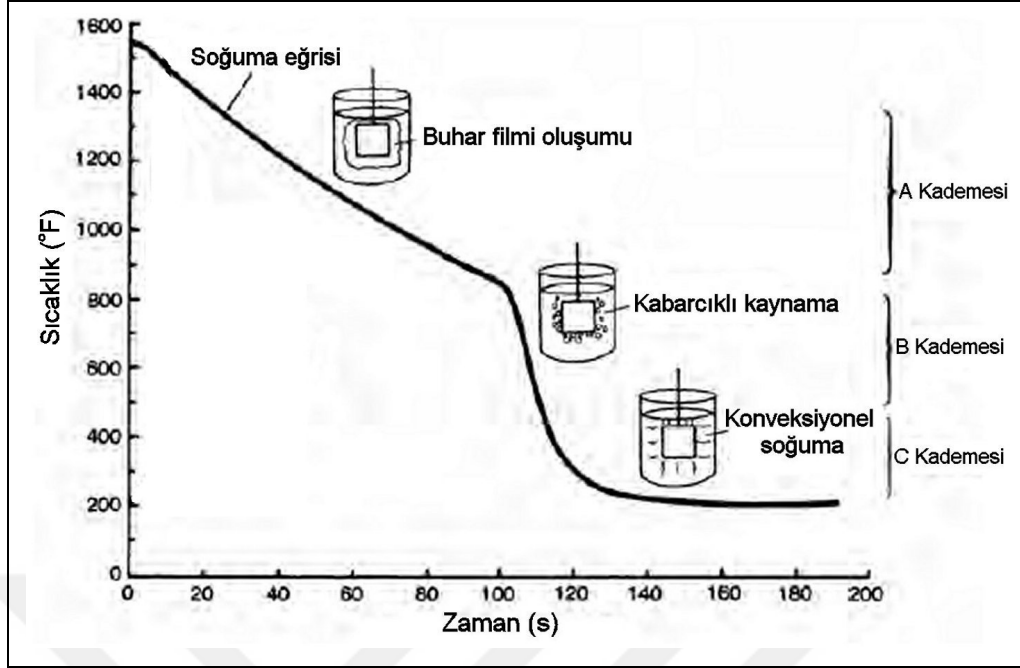
Şekil 3.6. 7055 alüminyum alaşımında tane sınırı etrafında çökeltisiz bölge oluşumu [52]

Şekil 3.7’de su verme hızının çökelti kinetiğine etkisi verilmiştir. Ekzotermik piklerin alanları soğuma hızına bağlı olarak oluşan η fazının oluşum hacimleri ile doğrudan ilişkilidir. Soğuma hızı azaldıkça soğuma işlemi esnasında daha yüksek miktarda çökelti oluşumu meydana gelmektedir [50].



Şekil 3.7. Farklı hızlarda soğutulmuş 7A09 alüminyum alaşımının a) DSC eğrisi, b) soğuma hızına bağlı olarak dönüşüm entalpisi değişimi [50]

Malzemenin çözeltiye alma işlemi sonrasında su verme ortamında daldırma yöntemi ile soğutulması esnasında Şekil 3.8’de gösterilen, 3 farklı aşamadan oluşan su verme mekanizmaları gerçekleşir. Malzemenin soğuma hızı üzerinde oldukça önemli etkiye sahip bu aşamalar sırasıyla; buhar filmi oluşumu, kabarcıklı kaynama ve konveksiyonel soğumadır [58,59].



Şekil 3.8. Çözeltiye alma sonrası su verme işlemi esnasında soğuma kademeleri ve mekanizması [59]

Su verme işleminin birinci aşaması ısıtılan malzemenin sıcak yüzeylerinin soğutma sıvısı ile temas ettiği anda oluşan buhar aşamasıdır. Malzemenin soğutma sıvısı ile temas eden sıcak yüzeyleri buhar örtüsü ile kaplanır. Oluşan buhar filmi kararlı bir yapıya sahiptir ve ısı bu film vasıtasıyla iletilir. Bu aşamada soğuma hızı yavaştır. Yüksek basınçlı spreylere soğutma yöntemleri veya soğumayı hızlandırıcı katkı maddeleri ile bu aşamayı ortadan kaldırmak mümkündür [59].

Su verme işleminin ikinci aşaması kaynama aşamasıdır. Bu aşamada su verme işleminde zamana bağlı olarak sıcaklığın düşmesi ile birlikte buhar filminin ortadan kalkması ile malzeme yüzeylerinin soğutma sıvısı ile temas etmesi sonucu kabarcıklı kaynama gerçekleşir. Bu aşama su vermenin en hızlı aşamasıdır. Kabarcıklı kaynama aşaması, malzeme yüzeyinin sıcaklığı soğutma sıvısının kaynama noktasının altındaki bir sıcaklığa ulaştığı anda durur [59].

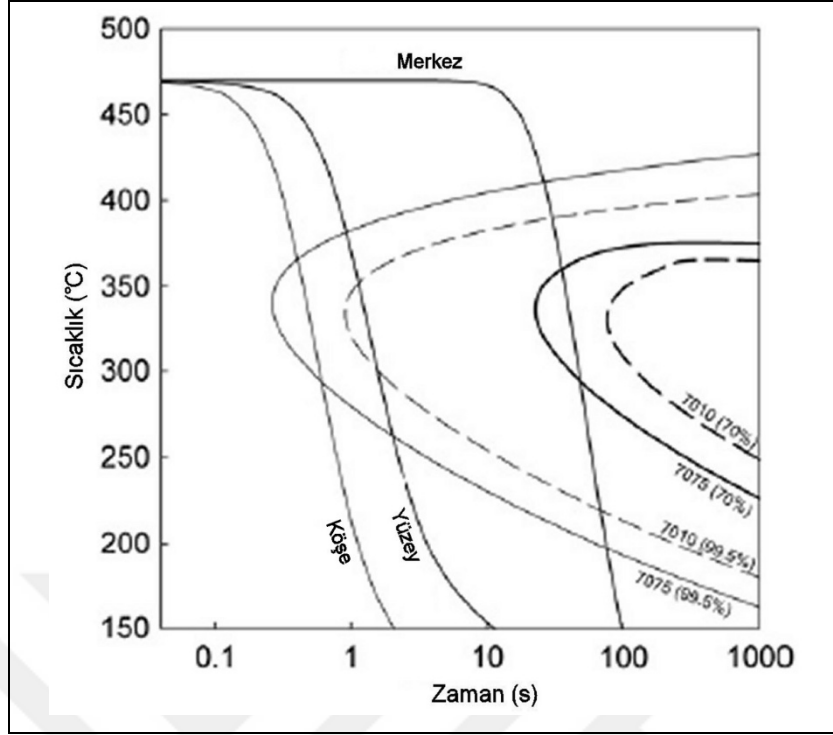
Su verme işleminin son aşaması konveksiyon aşamasıdır. Bu aşama malzeme yüzeylerinin sıcaklığı soğutma sıvısının kaynama noktasının altına düşmesi ile birlikte oluşur. Isı konveksiyon yolu ile uzaklaştırılır. Konveksiyon aşamasında soğuma hızı diğer aşamalara göre daha düşüktür [59].

Alüminyum alaşımlarının ısıtılmasında su verme ortamı olarak oda sıcaklığında su kullanımı oldukça yaygındır. Su ile soğutmanın sağladığı yüksek soğutma hızı malzemeye yüksek mekanik özellik ve korozyon dayanımı gibi özellikleri kazandırabilmesine rağmen malzeme kalıntı gerilme oluşumuna ve malzemenin boyutsal hassasiyetini koruyamamasına neden olmaktadır [56]. Yağ gibi daha düşük soğuma hızlarına sahip ortamların kullanılması durumunda ise yeterli mekanik özellik ve korozyon dayanımı özelliklerinin sağlanabilmesi mümkün olamayabilmektedir. Su ile soğutma işlemine alternatif olarak çözünürlük özelliğine sahip polimerlerin sulu çözeltileri de kullanılabilir. Su ile kıyaslandığında polimer çözeltisi ile soğutma işlemi esnasında malzeme yüzeyinde ince bir polimer film tabakası oluşarak malzeme geometrisinde daha farklı bir soğuma karakteristiğinin oluşmasına neden olmaktadır. Farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltileri kullanarak soğuma hızını kontrol altına almak mümkündür. Ayrıca polimer yağ gibi yanmayan, koku ve duman salınımı olmayan, soğutma işlemi sonrası malzeme yüzeyinden su ile yıkanarak kolaylıkla uzaklaştırılabilir özelliklerine sahiptir. [45,60,61].

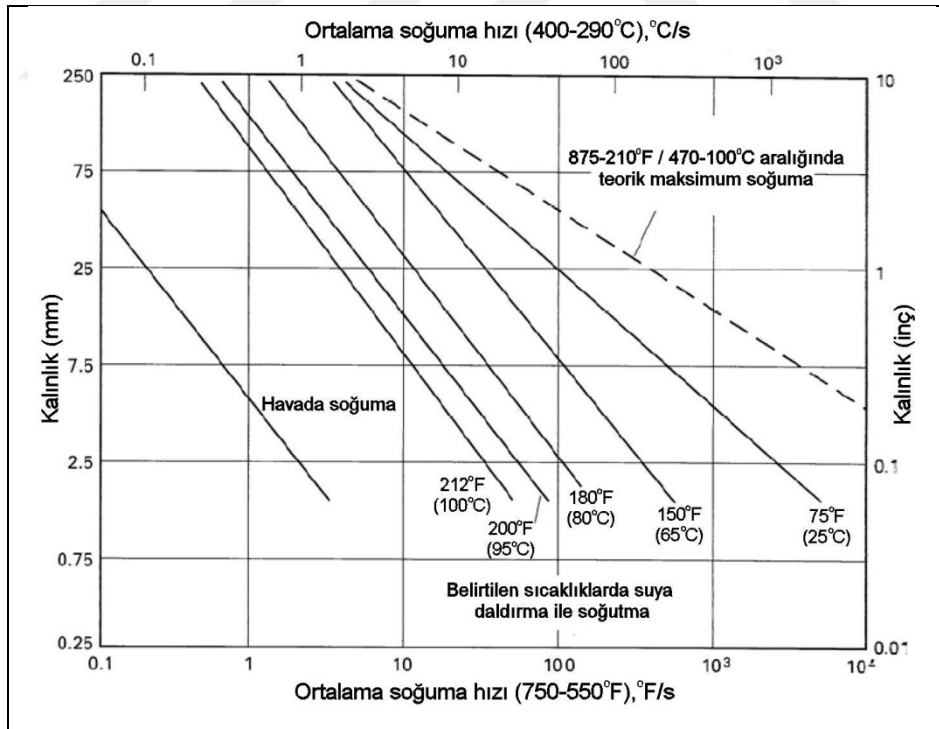
3.3.1. Su verme hassasiyeti

Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının ısıtılmasında en önemli aşama aşırı doymuş katı çözeltinin oluşumu için gerekli yüksek soğuma hızını sağlayacak su verme işlemidir. Kalın kesitli veya karmaşık geometriye sahip parçalarda çözeltiye alma ısıtılma işlemi sonrası su verme esnasında meydana gelen homojen olmayan soğuma davranışı katı çözeltinin aşırı doygunluğunu ve boş yer konsantrasyonu içeriğini düşürerek yaşlandırma sonrası heterojen dağılımlı çökelti oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum malzemenin düşük sertlik ve mukavemet değerlerine sahip olmasına ve kalıntı gerilme oluşumlarına yol açmaktadır (Şekil 3.9) [62-66].

Kalıntı gerilme oluşumları parçanın su verme esnasında kırılmasına veya çarpılmasına, talaşlı imalat sonrasında işlenen kısımların ölçüsel hassasiyetini koruyamamasına, yorulma davranışı ve gerilmeli korozyon dayanımının düşmesine neden olmaktadır [67,68].



Şekil 3.9. 7010 ve 7075 alüminyum alaşımlarının Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramları [66]

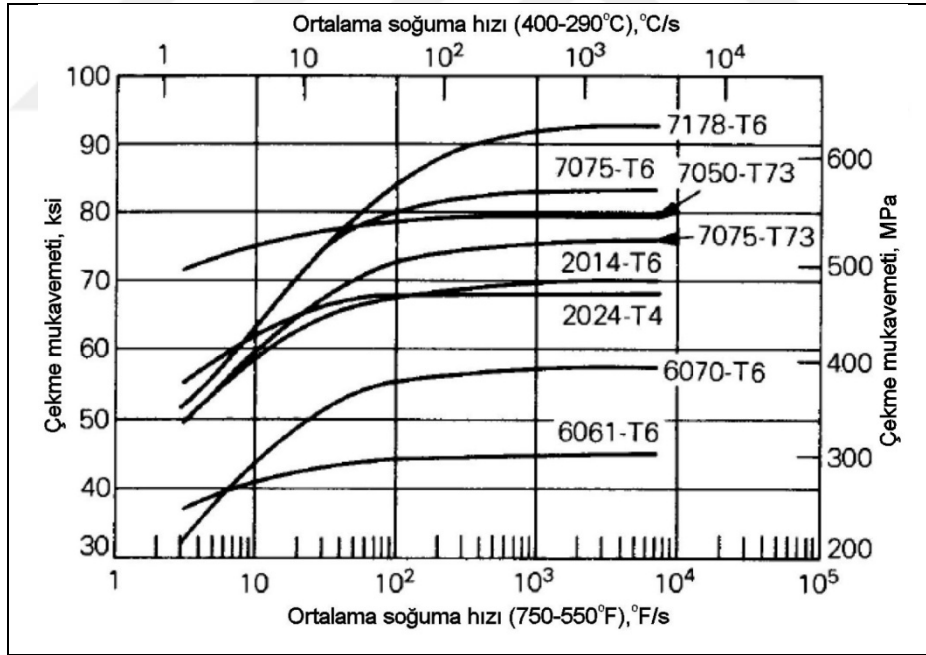


Şekil 3.10. Su verme ortamının ve levha kalınlığının soğuma hızına etkisi [45]

Şekil 3.10'da 1,6 mm - 200 mm aralığında çeşitli kalınlıklardaki alüminyum levhaların durgun hava ve farklı sıcaklıklardaki suya daldırılarak soğutulması

ile elde edilen ortalama soğuma hızları verilmiştir. Su verme ortamının ve levha kalınlığının levhanın soğuma hızı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Kesikli çizgi, farklı kalınlıktaki levhaların merkez hattında elde edilebilecek teorik maksimum soğuma hızını göstermektedir. 75 mm kalınlıktaki bir alüminyum levhanın merkez hattındaki soğuma hızının 25 °C suya daldırılarak soğutulması esnasında yaklaşık 10 °C/s (290-400 °C arasında) iken 80 °C suya daldırılarak soğutulması esnasında ise yaklaşık 3 °C/s (290-400 °C arasında) olduğu görülmektedir [45].

Şekil 3.11’de kritik sıcaklık aralıkları arasında kalınlık ve soğutma ortamının bir fonksiyonu olarak elde edilen ortalama soğuma hızlarındaki değişimin farklı alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti üzerindeki etkisi verilmiştir. Soğuma hızındaki değişime bağlı olarak çekme mukavemetindeki en fazla değişimin T6 ısıl işlemi uygulanmış yüksek su verme hassasiyetine sahip 7075 ve 7178 alüminyum alaşımlarında elde edildiği görülmektedir.



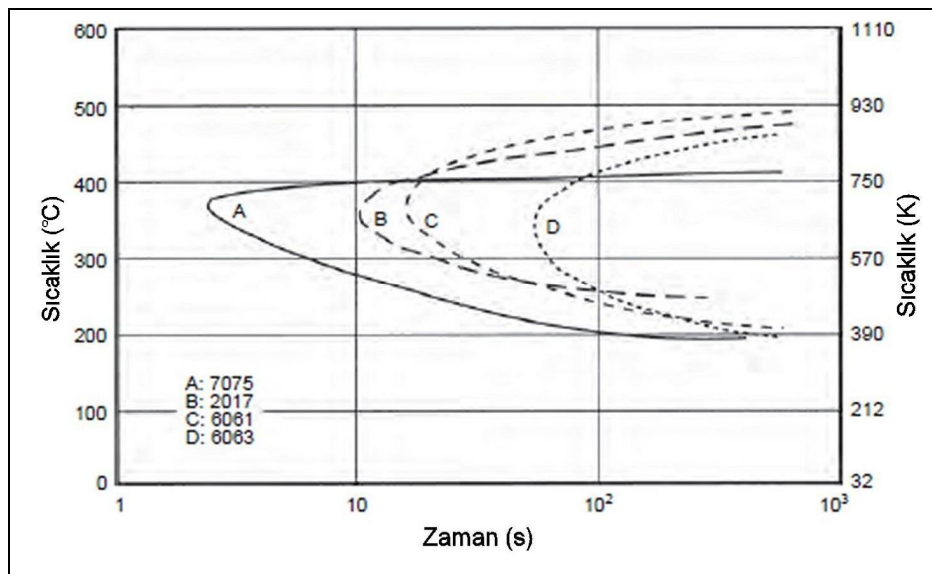
Şekil 3.11. Farklı alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetine soğuma hızının etkisi [45]

3.3.1.1. Su verme hassasiyetine etki eden faktörler

Su verme işleminin ilk aşamalarında, parçanın yüzeyi merkezine göre daha hızlı bir şekilde soğumaktadır. Bu durum yüzeyde çekme merkezde ise basma

gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu gerilme farklılığı yüzey ve merkez kısım arasındaki sıcaklık farkı arttıkça artar. Sıcaklık farkı maksimum değere ulaştığında merkez kısımdaki soğuma hızı yüzeyden daha yüksek olmaya başlamaktadır. Bu durumda ise merkezde çekme yüzeyde ise basma gerilmeleri oluşmaktadır. Kalıntı gerilme oluşumunun azaltılması soğuma işlemi esnasında uygun bir soğutma ortamı kullanılarak yüzey ve merkez arasındaki soğuma hızı farklılıklarını düşürmek ile mümkündür. Su verme ortamının sıcaklığı, buharlaşma ısı, iletkenlik, yoğunluk, viskozite ve ıslatma karakteristiği gibi özellikleri malzemenin soğuma hızı üzerinde önemli etkiye sahiptir [68,69]. Su verme hassasiyeti probleminin giderilmesi için malzemenin mekanik özelliklerinde belirgin bir düşüşe neden olmadan kalıntı gerilme oluşumlarını en az seviyeye indirgeyecek ideal soğutma ortamının seçilmesi gerekmektedir [70-72].

Isıl işlem parametrelerinin yanı sıra alaşımın kimyasal bileşimi, tane yapısı gibi özellikleri de su verme hassasiyeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yüksek alaşım elementi içeriği su verme hassasiyetini arttırmaktadır [73]. Şekil 3.12’de farklı kimyasal bileşimlere sahip alüminyum alaşımlarının su verme hassasiyetlerinin karşılaştırılması amacıyla zaman-sıcaklık-dönüşüm eğrileri verilmiştir. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında su verme hassasiyetinin daha yüksek olduğu görülmektedir [59].



Şekil 3.12. Farklı alüminyum alaşımlarının izotermal Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) eğrileri [59]

7XXX serisi alüminyum alaşımlarında temel alaşım elementleri olan çinko, magnezyum ve bakır içeriği ve bu alaşım elementlerin birbirleri ile oranları su verme hassasiyeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Ayrıca aşırı doymuş çözeltilerin durumu; içerdiği boş yer, dislokasyon, tane sınırları gibi kafes hatalarının sayısı ve dağılımı da alaşımın su verme işlemi ve yaşlandırma işlemi esnasında oluşan çökelti oluşumunu önemli derecede etkilediği için su verme hassasiyeti açısından oldukça önemlidir [74].

AlZnMg alaşımlarına Cu ilavesi katı çözeltilerin doygunluğunu artırır oda sıcaklığında GP zonlarının ayrışmasını geciktirerek GP bölgelerini stabilize eder ve alaşımın su verme hassasiyetini artırır [75].

Alaşımın Mg içeriği arttıkça aşırı doymuş katı çözeltilerin çözünürlüğü artmakta ve bu durum su verme esnasında η çökeltilerinin oluşması için gerekli itici gücü arttırmaktadır. Bunun sonucunda yüksek Mg içeriği alaşımın su verme esnasında η çökeltilerinin oluşmasını sağlayarak alaşım sertliğinin daha düşük değerlerde elde edilmesine neden olmaktadır [76].

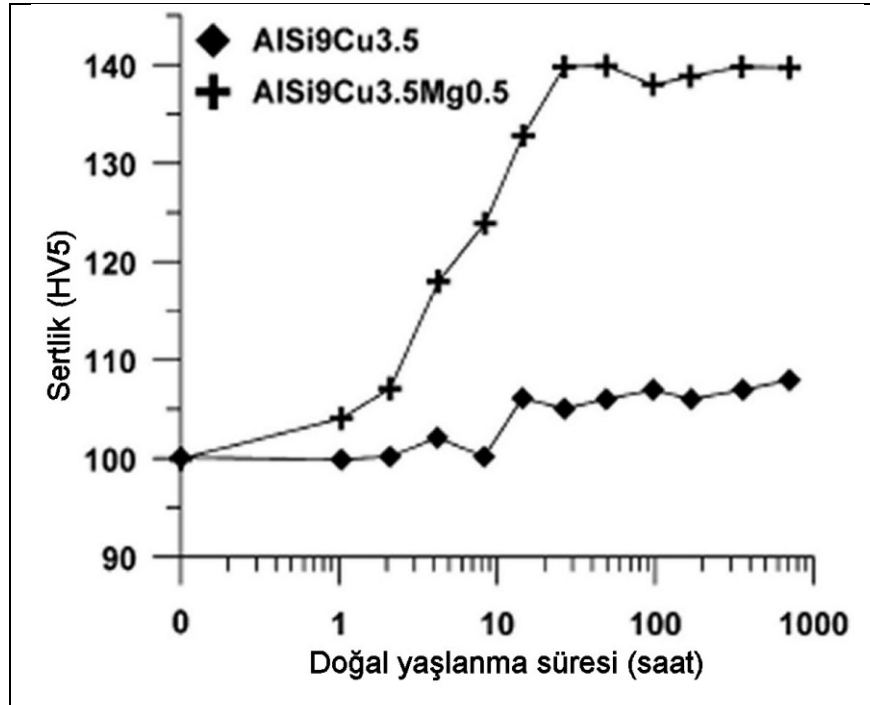
Çinko alüminyum içerisindeki çözünürlüğünün yüksek olması nedeniyle katı çözeltilerin aşırı doygunluğunu artırır. Bu nedenle alaşımın içerdiği Zn veya Zn:Mg oranı arttıkça su verme hassasiyeti azalır [77,78].

Yüksek arayüzey enerjisine sahip tane sınırları yavaş soğuma esnasında heterojen çökelti oluşumu için çekirdeklenme yöreleri olarak görev yapar. Alaşıma Cr, Mn, Zr ve Sc elementlerinin ilavesi ile yeniden kristalleşme ve tane büyümesini geciktirici küçük boyutlu çökeltiler oluşturulabilir [79]. Ancak yavaş soğuma esnasında bu çökeltiler kabalaşma eğilimi göstererek oluşacak yani çökeltiler için heterojen çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak su verme hassasiyetinin artmasına neden olurlar. Alaşımın kimyasal bileşiminde krom yerine Zr ilave edilmesi ile matrisle uyumlu, küçük boyutlu Al_3Zr ön çökeltileri oluşarak başlangıçta alaşımın su verme hassasiyetini düşürmeye katkı sağlar. Ancak zamanla yeniden kristalleşme nedeniyle bu Al_3Zr çökeltilerinin Al matrisle uyumluluğu azalarak kabalaşır ve alaşımın su verme hassasiyetini artırır. Krom elementi katkısı ile oluşan Cr içerikli çökeltiler başlangıç aşamasından itibaren Al matrisle uyumsuz ve Al_3Zr çökeltilerine göre daha

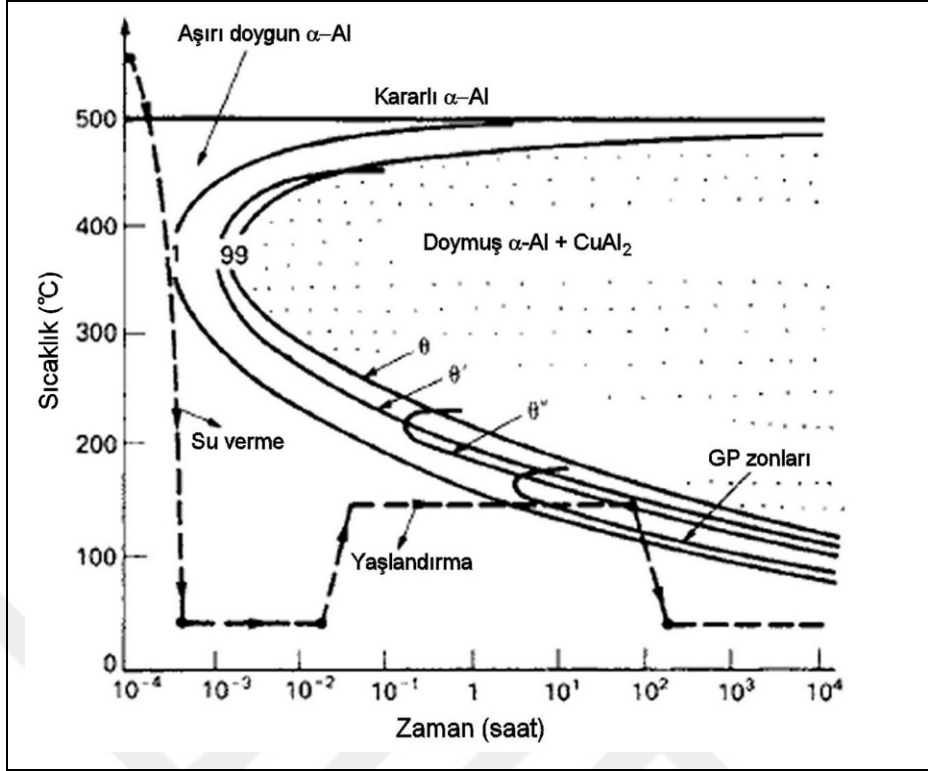
büyük boyutlu oluşurlar ve heterojen çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak alaşımın su verme hassasiyetini arttırlar [79-81].

3.4. Yaşlandırma Isıl İşlemi

Isıl işlem ile sertleştirilebilen alüminyum alaşımlarına yüksek mekanik özellikleri kazandırmak amacıyla uygulanan çökelti sertleşmesi işleminin son aşaması yaşlandırma ısıl işlemidir. Bu işlem su verme işlemi sonrasında doğal yaşlandırma veya suni yaşlandırma olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Doğal yaşlandırma; alaşımın su verme sonrası oda sıcaklığında uzun süre bekletilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Alaşımın kimyasal bileşimi doğal yaşlanma davranışı üzerinde etkiye sahiptir. Magnezyum alüminyum alaşımlarının doğal yaşlanma eğilimini arttırmaktadır. Alaşımın Mg konsantrasyonu arttıkça Şekil 3.13'te verildiği gibi maksimum sertlik eldesi için gerekli doğal yaşlanma süresi önemli derecede azalmaktadır. Suni yaşlandırma işlemi ise alaşımın su verme işlemi sonrasında kimyasal bileşimi ve arzu edilen mekanik özellikler dikkate alınarak belirlenen bir sıcaklığa ısıtılıp, bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletildikten sonra oda sıcaklığına havada soğutulması ile gerçekleştirilmektedir [48].



Şekil 3.13. Al-9Si-3.5Cu alaşımının doğal yaşlanma davranışına magnezyumun etkisi [48]



Şekil 3.14. Al-Cu alaşımının Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı [82]

Çökelti sertleşmesi için ağırlıkça %4 oranında Cu içeren Al-Cu alaşımının çözeltiye alma işlemi sonrasında Şekil 3.14'te verildiği gibi Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm (ZSD) diyagramında çökeltme reaksiyonunun gerçekleştiği bölge ile kesilmeyecek şekilde uygun su verme hızı ile soğutulması sonucunda aşırı doymuş α -alüminyum katı çözeltisi elde edilir. Bu yapının uygun bir sıcaklıkta ve sürede yaşlandırılması ile Al_2Cu çökeltileri oluşturularak alaşımın mukavemet ve sertlik değerlerinin artması sağlanır [82].

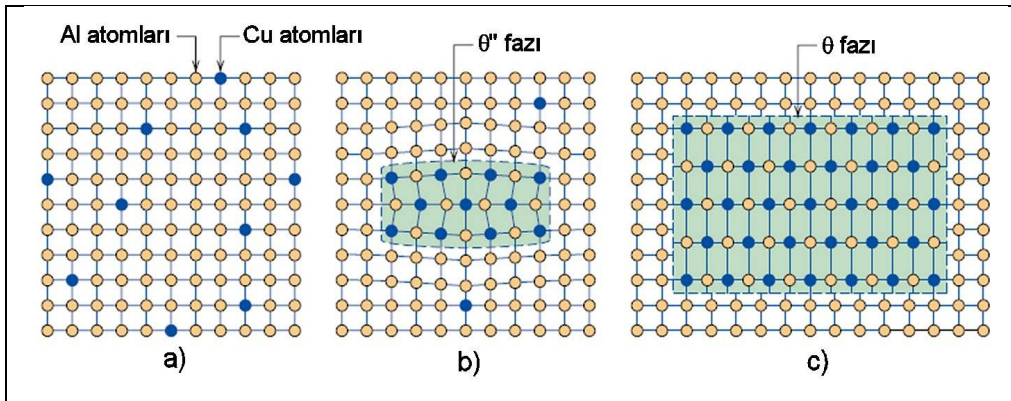
Isıl işlemler ile sertleştirilebilen 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ile oluşan çökeltiler Tablo 3.2'de verilmiştir [83-85].

Yaşlandırma işleminde beklenen mekanik özelliklerin sağlanmasında uygulanan sıcaklık ve zaman oldukça önemlidir. Alüminyum alaşımlarında yüksek mukavemet değerleri T6 ısıl işlemi ile elde edilirken yüksek korozyon dayanımı için ise genellikle aşırı yaşlandırma koşulları içeren T7 ısıl işlemi uygulanmaktadır [86,87].

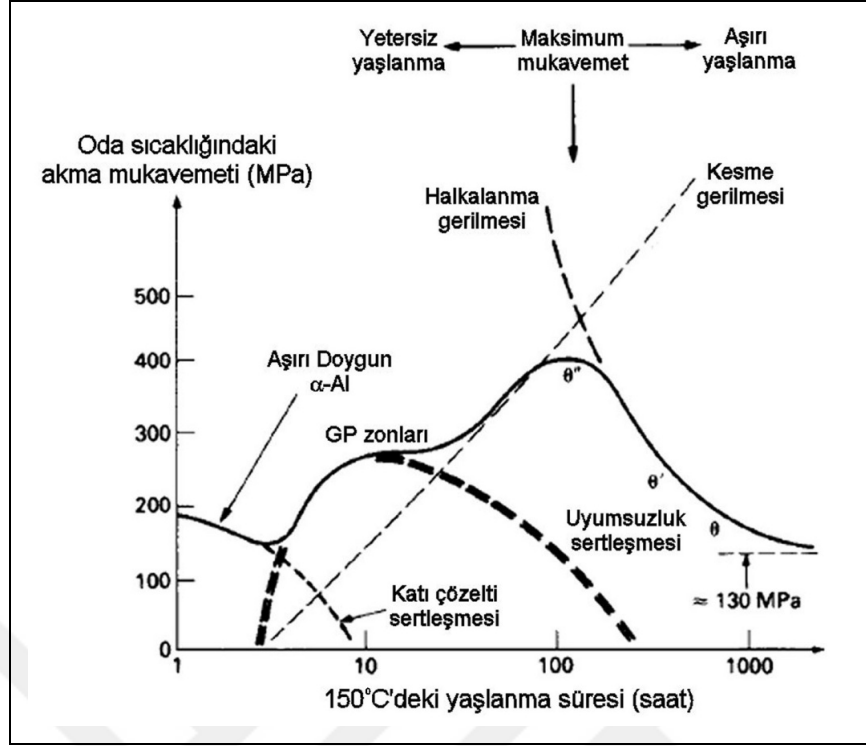
Tablo 3.2. 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ile oluşan çökteliler

Alaşım Serisi	Çöktelti Oluşumu
2XXX	Aşırı Doymuş Katı Çözelti → GP Zonları → θ'' → θ' → θ (CuAl ₂)
6XXX	Aşırı Doymuş Katı Çözelti → GP Zonları → β'' → β' → β (Mg ₂ Si)
7XXX	Aşırı Doymuş Katı Çözelti → GP Zonları → η → η (MgZn ₂)

2XXX serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemi esnasında denge durumundaki θ fazının oluşumu sırasında Şekil 3.15'te verildiği gibi geçiş fazları oluşur. Yaşlandırma işlemi sırasında zamana bağlı olarak meydana gelen bu geçiş fazlarının oluşumu alaşımın mukavemeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yaşlandırma işleminin ilk aşamasında bakır atomlarının aşırı doymun α -Al katı çözeltisi içerisinde birçok bölgede bir veya iki atom kalınlığında ve yaklaşık olarak 25 atom çapında diskler halinde kümelenmesi ile (Guinier-Preston) GP zonları oluşur. GP zonları matrisle uyumludur. Yaşlandırma işlemi esnasında artan zamana bağlı olarak bakır atomlarının difüzyonu ile bu atom kümelerinin boyutları da büyür, kristal yapı oluşturarak θ'' fazını oluşturur. GP zonlarından θ'' fazının oluşumu esnasında kafes parametreleri arasındaki farklılık matrisle gerilme oluşumuna neden olur (Şekil 3.15.b). Yaşlandırma süresinin artması ile θ'' faz çöktelisinin boyutu artar ve matrisle uyumsuz θ fazı oluşur (Şekil 3.15.c) [88].



Şekil 3.15. Al-Cu alaşımlarında yaşlandırma işlemi esnasında oluşan ara fazların şematik gösterimi a) aşırı doymuş α -Al katı çözeltisi, b) θ'' geçiş fazı, c) θ kararlı fazı [88]



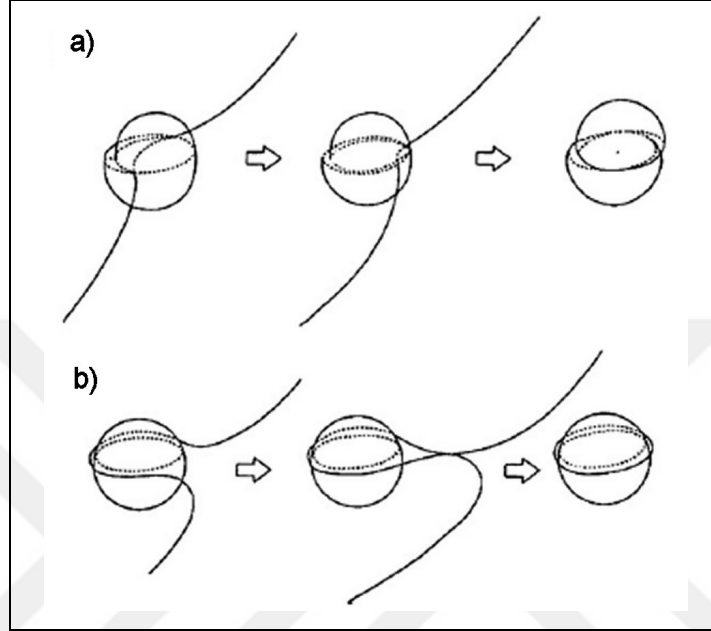
Şekil 3.16. Al-Cu alaşımlarında yaşlandırma süresinin bir fonksiyonu olarak oluşan yaşlandırma mekanizmaları ve mukavemet değişimi [82]

Isıl işlemle sertleştirilen alüminyum alaşımlarında boyut ve şekil açısından genellikle üç farklı tür ikincil faz çökeltileri meydana gelmektedir. Bunlar; nanometre boyutlarında disk/plaka veya iğnesel/çubuksu şekillerde oluşan mukavemet katkısı veren çökeltiler, 0,05-0,5 μm boyutlarındaki küresel şekilli çökeltiler ve 1-10 μm boyutlarında elips şekilli kaba çökeltilerdir [89].

Yaşlandırma işleminde sıcaklık ve zaman parametreleri alaşımın sertlik ve mukavemet değerleri üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Düşük sıcaklıklarda maksimum sertlik için daha uzun yaşlandırma sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıcaklığın artması ile yaşlandırma işlemi için gerekli olan zaman azalmakta fakat çökeltilerdeki kabalaşma eğilimi hızlı bir şekilde gerçekleşeceği için ulaşılan maksimum sertlik değeri daha düşük olmaktadır [82,90].

Alaşımın mukavemeti içerdiği çökeltilerin dislokasyon hareketlerini engelleme kabiliyetine bağlıdır. Bu nedenle çökeltilerin boyutu, dağılımı ve matrisle uyumluluğu alaşımın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Dislokasyon-çökelti-etkileşimi Şekil 3.17’de verildiği gibi Friedel etkisi ve Orowan mekanizması ile açıklanabilir. Çökeltinin boyutu ve sertliğine bağlı olarak dislokasyon çökeltiyi keserek (Friedel etkisi) veya dislokasyon çökelti etrafından halkalanarak hareketine devam eder (Orowan mekanizması) [48].



Şekil 3.17. Dislokasyon-çökelti etkileşimi a) kesme, b) halkalanma [48]

6XXX serisi alüminyum alaşımlarında yaşlanma sırasında oluşan GP zonu matrisle uyumlu bir fazdır. Al-Mg-Si alaşımlarında GP zonlarındaki Mg:Si’un atomik oranı 1:1’e yakındır. Yarı kararlı $\beta'' <100>_{Al}$ boyunca oluşan iğnesel şekilli çökeltilerdir. Yarı kararlı $\beta' <100>_{Al}$ boyunca oluşan hegzagonal kristal yapıya sahip, çubuk şeklinde çökeltilerdir. β' çökeltileri hegzagonal kristal yapıya sahip, lata tipi morfolojidedir ve kompozisyonu Mg_2Si ’dir [91].

7XXX serisi alüminyum alaşımlarının suni olarak yaşlandırılması işleminde aşırı doymuş katı çözeltilerin ayrışmaya başladığı ilk aşamada GP zonları (GP I ve GP II) oluşur. GP I zonları matrisle uyumlu ve oda sıcaklığından 140-150 °C aralığına kadar geniş bir sıcaklık aralığında oluşabilmektedir. GP II zonları ise genellikle alaşımın 450 °C’nin üzerindeki sıcaklıklardan su verme işlemi sonrası 70 °C üzerindeki sıcaklıklarda yaşlandırılması ile oluşmaktadır. GP II zonları daha yüksek Zn içeriğine sahiptir ve matrisle uyumludur. GP zonlarının

oluşumu boşlukça zengin kümelerden kaynaklanmaktadır ve η çökeltilerinin oluşumu için başlangıç fazı olarak görev yapmaktadır [92-94]. Bu nedenle aşırı doymuş katı çözeltilerin içerdiği boşyer konsantrasyonu çökelme prosesi üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir [95,96]. 7XXX serisi alüminyum alaşımlarında esas sertlik artışı matrisle uyumlu GP zonlarından yarı kararlı, küçük boyutlu ve homojen dağılımlı η ($MgZn_2$) çökeltilerinin oluşması ile sağlanmaktadır [86,97].



4. MALZEME VE YÖNTEM

Karmaşık geometriye sahip, büyük boyutlu ve kalın kesitli alüminyum alaşımı malzemeler havacılık sektörü, demiryolu ve denizcilik alanlarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu tür malzemelerde çözeltiyeye alma ısıl işlemi sonrası hızlı soğutma parçanın farklı bölgelerinde düzensiz bir soğumaya yol açarak kalıntı gerilme oluşumuna ve Şekil 4.1’de verildiği gibi boyutsal hassasiyetini koruyamayarak distorsiyona uğramasına neden olmaktadır [98].



Şekil 4.1. AA7075 alaşımı ekstrüze profilin endüstriyel koşullarda uygulanan su verme işlemi sonrası görüntüsü

Bu çalışmada; Jominy alın su verme işlemi ile farklı soğutma koşulları kullanılarak AA7075 serisi alüminyum alaşımları için endüstride önemli bir sorun olan "su verme hassasiyeti" problemi sonucu ortaya çıkan, malzeme profili boyunca meydana gelen soğuma hızı, sertlik, iletkenlik ve mikroyapısal özellik değişimleri incelenmiştir. Farklı soğutma ortamlarının alaşımın mekanik özelliklerine ve kalıntı gerilme oluşumlarına etkisi araştırılmıştır. Alaşımın T6 ısıl işlemi sonrası çözeltiyeye alma ısıl işlemi sonrası

soğutma koşulları optimize edilerek en düşük kalıntı gerilme oluşumlarına yol açan ve malzemenin endüstriyel kullanım koşullarına uygun mekanik özellikleri de sağlayabilen ısıl işlem parametreleri belirlenmiştir.

4.1. Malzeme

Doktora tez çalışması kapsamında AA7075 serisi Al-Zn-Mg-Cu alaşımı kullanılmıştır. Alaşım Onat Alüminyum San. Tic. A.Ş. bünyesinde bulunan Şekil 4.2’de verilen indüksiyon ocağında ergitilerek sürekli döküm yöntemi ile 152 mm çapında 2 metre uzunluğunda biyetler halinde dökülerek üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan ekstrüze AA7075 serisi alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2. AA7075 serisi alüminyum alaşımının dökümü için kullanılan indüksiyon ocağı

Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan AA7075 serisi alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (ağ.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Zr	Ti	Al
0,06	0,07	2,02	0,03	2,87	5,74	0,19	0,06	0,02	Kalan

Biyetler $\Phi 150 \times 300$ mm ebatlarında dilimlenerek yapıda dökümden kaynaklı oluşabilecek heterojensizlikleri gidermek amacıyla Şekil 4.3’te verilen ısıl işlem fırınında 470 °C’de 16 saat süre ile homojenize edilerek ekstrüzyon

işlemine hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.4'te verilen ekstrüzyon presi ile 25 mm çapında içi dolu silindirik şekilli 7075 alaşımı profiller üretilmiştir.



Şekil 4.3. 7075 alaşımı biyetlerin homojenizasyon işleminin yapıldığı ısıtılma fırını

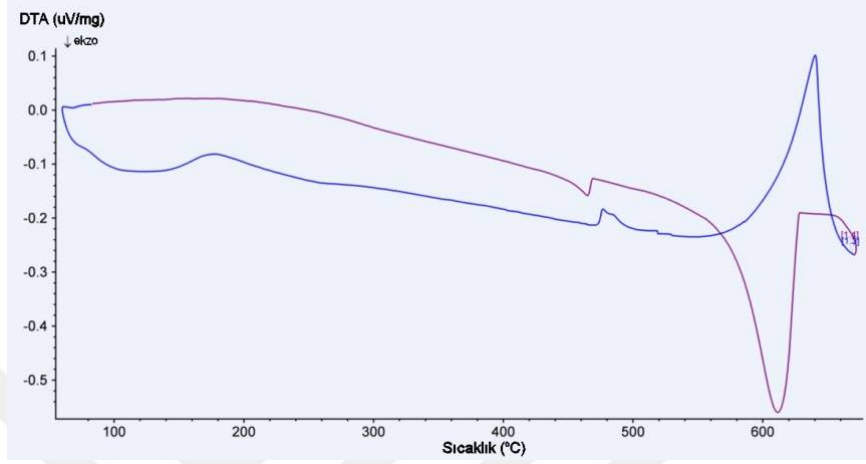


Şekil 4.4. 7075 serisi alüminyum alaşımı profillerin üretildiği ekstrüzyon hattı

4.2. DTA Analizi

Çalışma kapsamında incelenen alaşımın çözeltiye alma sıcaklığını belirlemek amacıyla Diferansiyel Termal Analiz (DTA) yapılmıştır. Analizler Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü termal analiz laboratuvarında bulunan Netzsch marka STA 409 PG Luxx model Diferansiyel Termal Analiz Cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu amaçla alaşım 10 K/dk

ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 675 °C'ye ısıtıldıktan sonra 10 K/dk soğutma hızı ile oda sıcaklığına soğutmuştur. Şekil 4.5'te verilen DTA analiz sonucuna göre alaşımın likidüs sıcaklığının 640 °C, solidüs sıcaklığının ise 575 °C olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.5. Deneysel çalışmada kullanılan AA7075 alaşımının DTA analizi

4.3. Isıl İşlem Deneyleri

4.3.1. Alın su verme test düzeneğinin geliştirilmesi

Deneysel çalışma kapsamında alaşımın su verme hassasiyetini belirlemek, soğuma hızı ile mikroyapı, sertlik ve iletkenlik özellikleri arasındaki ilişkiyi gözlemlemek için alın su verme test yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarında bulunan Şekil 4.6'da verilen test düzeneği geliştirilerek bakım ve onarımları yapılmıştır. Farklı sıcaklık ve farklı soğutma ortamları ile çalışmak amacıyla düzeneğe kapalı devre soğutma sistemi eklenmiştir. Farklı sıcaklıkta soğutma ortamları uygulayabilmek amacıyla alt ve üst soğutma haznelere termostatlı ısıtıcı rezistanslar yerleştirilmiştir. Deneyler esnasında alt ve üst soğutma hazneleri arasındaki sıcaklık farkı ± 2 °C olarak ölçülmüştür.

Geliştirilerek bakım ve onarımları yapılan, çalışma kapsamında ısıl işlem deneylerinde kullanılan alın su verme test düzeneği Şekil 4.7'de verilmiştir. Kullanılan alın su verme test düzeneği ile ilgili detayların daha görülebilir olması açısından Catia programı ile modelleme çalışmaları yapılmıştır. Alın su

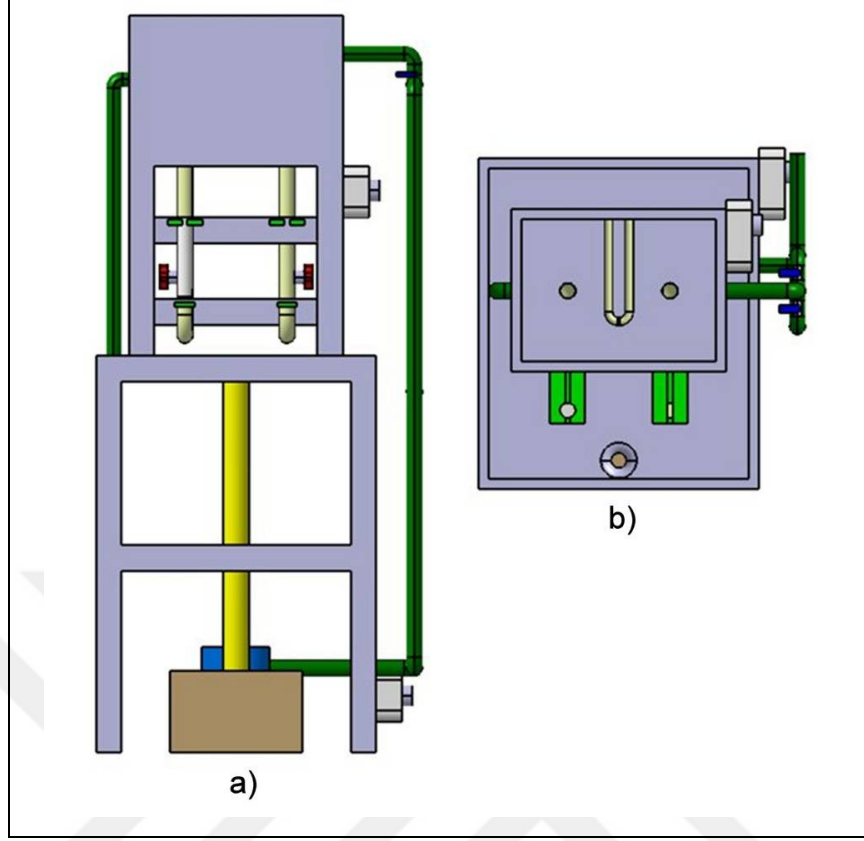
verme test düzeneğinin farklı kesitlerden model görüntüleri Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



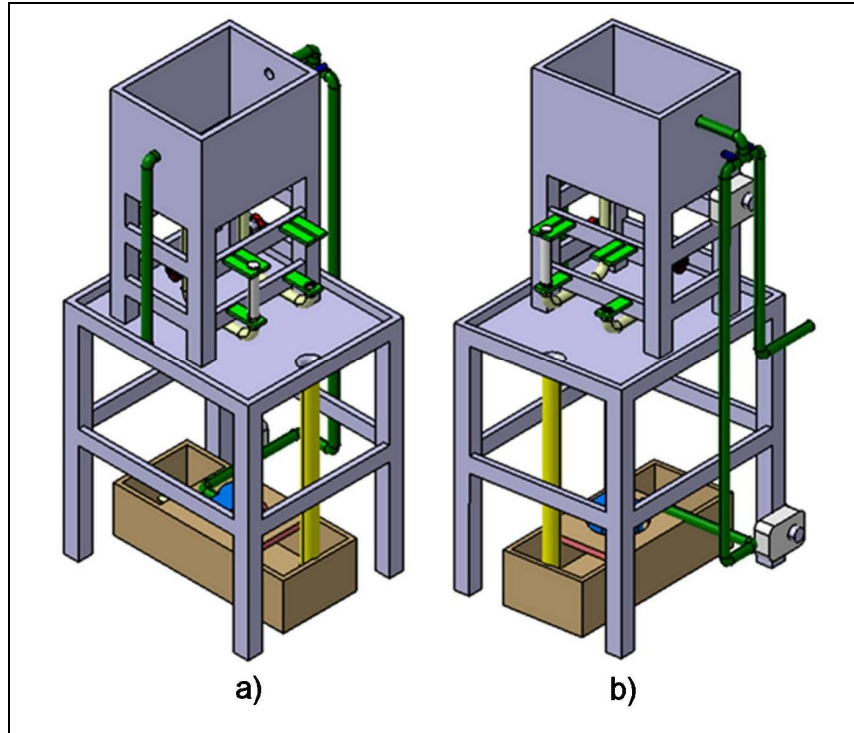
Şekil 4.6. Çalışma kapsamında kullanılan soğutma düzeneğinin bakım onarım işlemleri öncesindeki görünümü



Şekil 4.7. Çalışma kapsamında kullanılan alın su verme test düzeneğinin bakım onarım işlemleri sonrasındaki görünümü



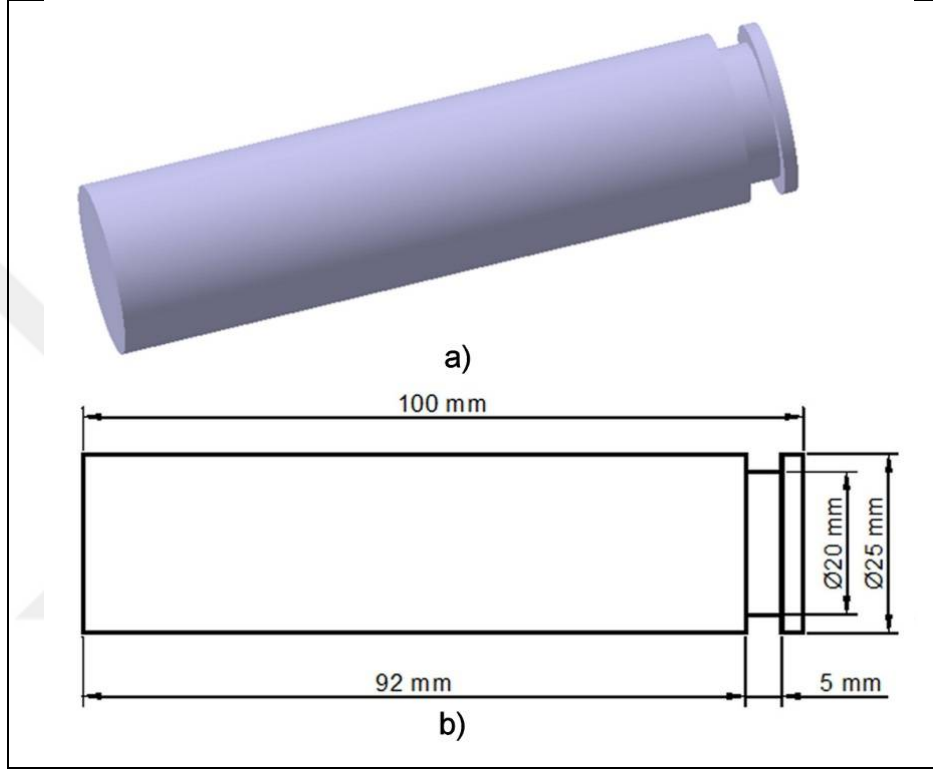
Şekil 4.8. Alın su verme test düzeneğinin a) ön kesit, b) üst kesit model görüntüsü



Şekil 4.9. Alın su verme test düzeneğinin a) sol kesit, b) sağ kesit model görüntüsü

4.3.2. Alın su verme deneyleri

Çalışma kapsamında uygulanan alın su verme ısıl işlem deneylerinde ekstrüze profillerden dilimlenerek hazırlanmış Şekil 4.10.a'da üç boyutlu izometrik görünümü ve Şekil 4.10.b'de numune ölçülerinin belirtildiği teknik resmi verilmiş dairesel kesitli numuneler kullanılmıştır.



Şekil 4.10. Alın su verme testlerinde kullanılan numunenin a) üç boyutlu izometrik görünümü, b) teknik resmi

Numunelere 480 °C'de 5 saat süre ile çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmıştır. Çözeltiye alma işlemi sonrası numuneler 5 saniyeden daha az bir sürede Şekil 4.12 'de gösterildiği gibi alın su verme test düzeneğine alınarak numunelere 20 °C, 50 °C, 75 °C sıcaklıklarda su ve hacimce % 5, % 15, % 25'lik konsantrasyonlarda polimer çözeltileri kullanılarak 10 dakika süre ile alın su verme soğutma işlemi uygulanmıştır. Soğutma amaçlı kullanılan Aquatensid BW ticari isimli polimer sıvısının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir [99]. Alın su verilen numuneler 120 °C' de 24 saat süre ile suni yaşlandırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri fanlı ve sıcaklık kontrollü Linn marka VMK-1600 model ısıl işlem fırını ile yapılmıştır.

Tablo 4.2. Deneysel çalışmada soğutma amaçlı kullanılan polimer sıvısının fiziksel ve kimyasal özellikleri [99]

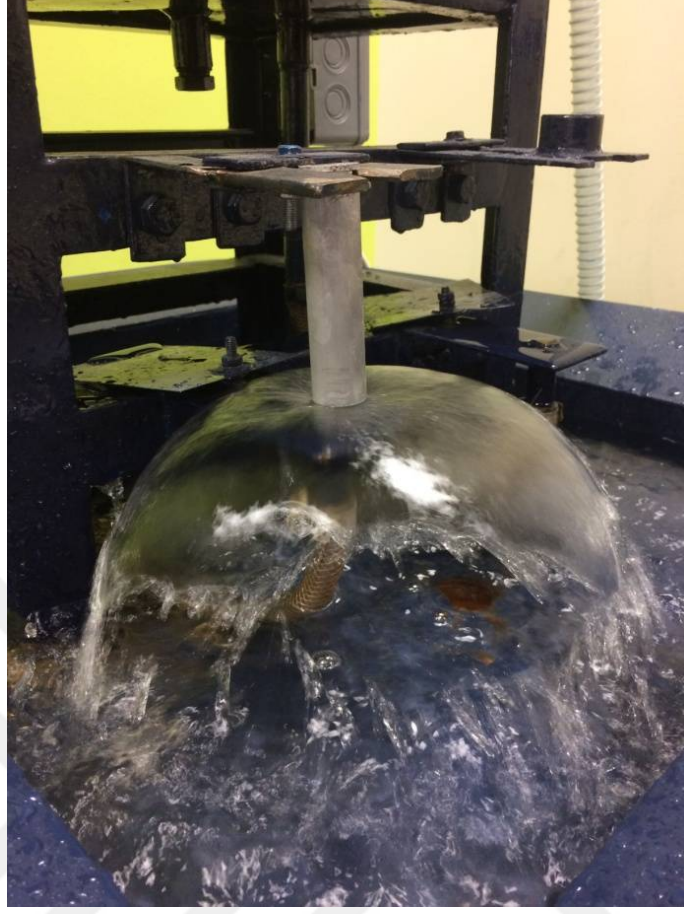
Renk	Yeşil
Yoğunluk (20 °C)	1,080 g/cm ³
pH Değeri (%5 ağırlıkça) (20 °C)	8,7-9,1
Viskozite (20 °C)	700 mm ² /s
Kaynama Sıcaklığı	100 °C

Tablo 4.3. Farklı konsantrasyonlardaki polimer çözeltilerinin oda sıcaklığında viskozite değerleri [99]

Konsantrasyon (%)	Viskozite (mm ² /s)
1	1,4
5	1,9
10	3,0
15	4,5
20	6,9



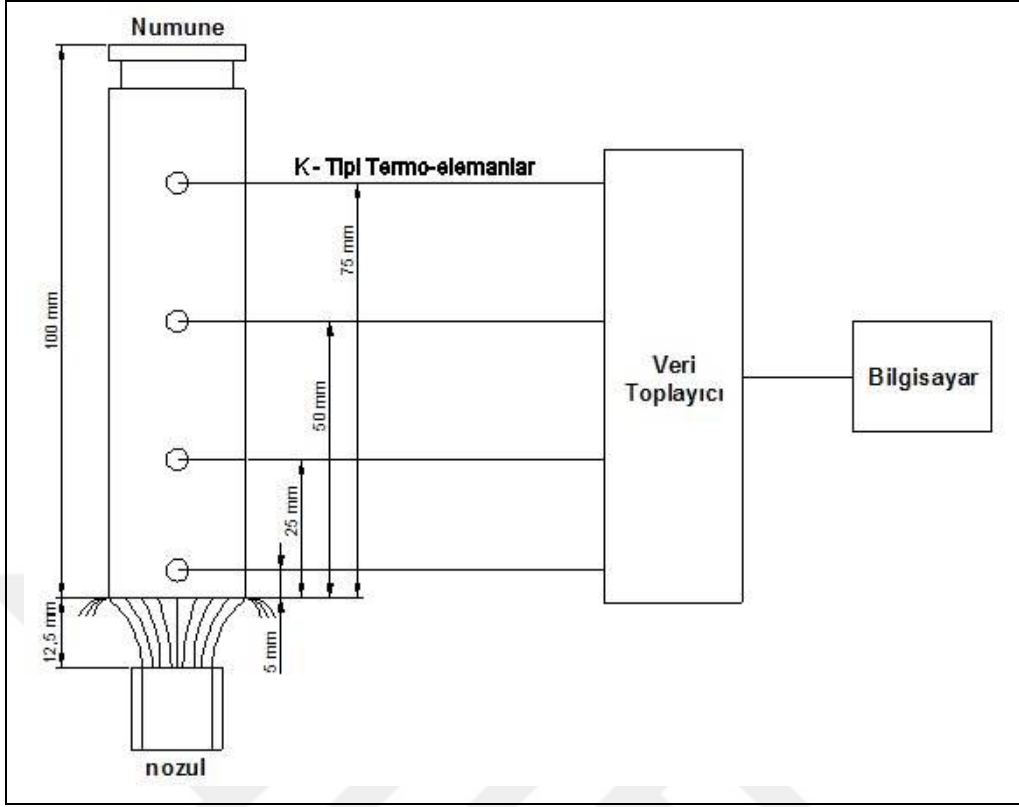
Şekil 4.11. Çözeltiyeye alma ve yaşlandırma işlemlerinde kullanılan ısıl işlem fırını



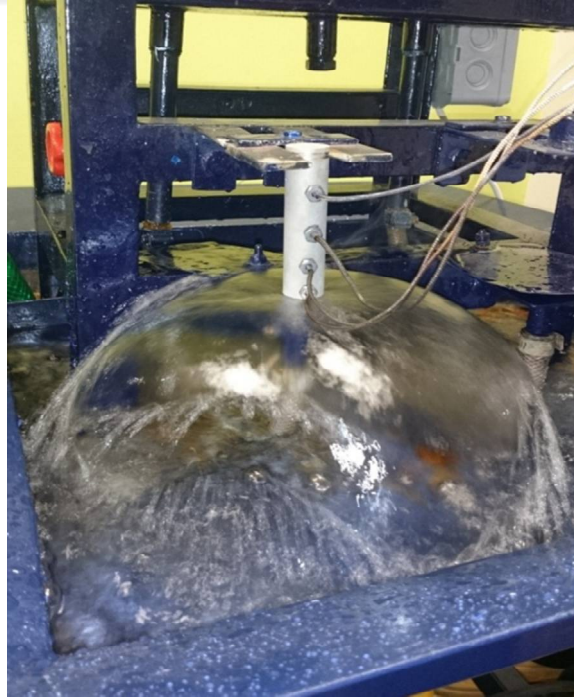
Şekil 4.12. Çözeltiye alma sonrası numunelere farklı ortamlar kullanılarak uygulanan bir uçtan soğutma işleminin görüntüsü

4.3.3. Sıcaklık ölçümleri

Çözeltiye alma işlemi sonrası uygulanan alın su verme soğutma işlemi sırasında kullanılan her bir soğutma ortamı için numunede profil boyunca meydana gelen soğuma hızı farklılıklarını belirlemek amacı ile su verilen uçtan 5 mm, 25 mm, 50 mm ve 75 mm uzaklıkta 5mm çapında delikler açılarak Şekil 4.13'te şematik olarak gösterildiği gibi K tipi termo-elemanlar her bir test numunesi üzerine belirlenen bölgelere vidalanmıştır. Her bir termo-elemanın diğer uçları ise 5 kanallı veri toplayıcının (datalogger) her bir kanalının + ve - kutuplarına ayrı ayrı vidalanmıştır. Bu sayede alın su verme test düzeneğinde soğuma esnasında, numune üzerinde 4 farklı bölgeye yerleştirilmiş K tipi termo-elemanlar ile soğuma hızları Şekil 4.13'te ve Şekil 4.14'te görüldüğü gibi eş zamanlı olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.13. Çalışmada farklı soğutma ortamları için uygulanan soğuma hızı ölçümlerinin şematik görünümü



Şekil 4.14. Çok kanallı veri toplayıcı ile alın su verme işlemi esnasında numune üzerinde eş zamanlı soğuma hızı ölçümünün görüntüsü

Soğuma karakteristiğini belirlemek amacıyla su verilen uçtan belirli aralıklarla termo-elemanlar ile sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı bölgelerde farklı soğutma ortamları için soğuma hızlarındaki değişimlerin belirlenmesi ve karşılaştırılması amacıyla 480 °C ve 120 °C aralığındaki zamana bağlı sıcaklık değişimleri göz önünde bulundurularak ortalama soğuma hızları hesaplanmıştır.

4.3.4. Soğumanın modellenmesi

Sıcaklık ölçüm testleri sonrası farklı sıcaklıklarda su ve farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltileri kullanılarak yapılan alın su verme işlemleri esnasında malzeme profili boyunca elde edilen soğuma eğrileri kullanılarak DEFORM yazılım programı ile numunelerde meydana gelen soğumalar modellenmiştir. Bu sayede deneyler esnasında elde edilen soğuma eğrileri DEFORM programı ile yapılan modelleme çalışmaları ile nümerik olarak doğrulanmıştır. Ayrıca modelleme çalışmaları ile çözeltiye alma işlemi sonrası uygulanan alın su verme test düzeneğinde bir uçtan soğutma işleminin başladığı andan itibaren farklı sürelerde (5, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 250, 500 saniye) her bir soğutma ortamı için numune profili boyunca meydana gelen soğuma karakteristiği gözlemlenerek karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

4.4. Mikroyapısal İncelemeler

Alın su verme işlemi sonrası yaşlandırılmış numunede profil boyunca meydana gelen mikroyapı değişimlerini incelemek ve yapıda gözlemlenen çökeltileri karakterize etmek amacıyla Olympus marka Işık Mikroskobu (IM) ve IXRF marka Enerji Dağılımlı X-Işın Spektrometresi (EDX) ataçmanlı Jeol marka JSM 6060 model Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır. Bu amaçla numuneler soğuma hızı ölçümlerinin uygulandığı bölgelerden kesilerek metalografik olarak hazırlanmıştır. Metalografik hazırlama işleminde numuneler sırasıyla 120, 320, 600, 1000 ve 2000 mesh numaralı SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Daha sonra numunelere sırasıyla 6 µm, 3 µm ve 1 µm elmas solüsyon ile parlatma işlemi ve silika ile nihai parlatma işlemi uygulanmıştır. Mikroyapıda fazlar arasında kontrast oluşturarak yapının daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmasını sağlamak

amacıyla numuneler inceleme öncesinde Graff Sergeant ayracı (84 ml su, 15,5 ml HNO₃, 0,5 ml HF, 3 g CrO₃) ile dağlanmıştır.

Soğuma hızının çökelti dağılımı, boyutu ve tane sınırlarındaki çökeltisiz bölgenin genişliğine etkisini daha detaylı bir şekilde incelemek amacıyla Ortadoğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan EDX ataçmanlı Jeol marka JEM2100F model Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) ile incelemeler yapılmıştır. TEM incelemesi seçilen bir numune üzerinde belirli bölgelerden örnekler alınarak yapılmıştır. Bu amaçla çözeltiliye alma ısıl işlemi sonrası 20 °C su ile alın su verme testi uygulanmış ve yaşlandırılmış numunenin su verilen uçtan 5 mm ve 25 mm mesafedeki bölgelerinden hassas kesme ile ince kesitli numuneler alınmıştır. Numuneler ultrasonik zımba ile 3 mm çapında disk şeklinde kesilmiştir. Daha sonra numuneler sırasıyla 40 µm, 10 µm ve 5 µm zımpara ile 100 µm kalınlığa kadar inceltilmiştir. Dimple grinder ile 5 µm pasta kullanılarak numunenin ortasında çukur açılmıştır. Son aşamada ise numuneye Precision Ion Polishing System (PIPS) ile ortası delinene kadar iyon bombardımanı yapılmıştır.

4.5. XRD Analizi

Mikroyapı incelemelerinde gözlemlenen çökeltilerin kompozisyonunu belirlemek amacıyla 480 °C'de 5 saat çözeltiliye alma işlemi sonrası farklı soğutma ortamları kullanılarak alın su verme yöntemi ile soğutulmuş ve 120 °C'de 24 saat süre ile yaşlandırılmış numunelerde X-Işın Difraksiyon Analizleri (XRD) yapılmıştır. XRD analizleri Kocaeli Üniversitesi ve Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Cu X-Işını tüpü ve CuK α ($\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) dalga boyuna sahip Rigaku marka X-Işın difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde XRD paternleri 10° - 90° aralığında alınmıştır.

4.6. Sertlik Ölçümleri

480°C' de 5 saat süre ile çözeltiliye alma işlemi sonrası 20 °C, 50 °C, 75 °C su ve %5, %15, %25'lik konsantrasyonlarda hazırlanmış polimer çözeltileri ile alın su verme işlemi uygulanmış numunelere 120 °C 'de 24 saat yaşlandırma işlemleri sonrasında 3 kg yük altında 10 sn süre ile sertlik testi uygulanmıştır.

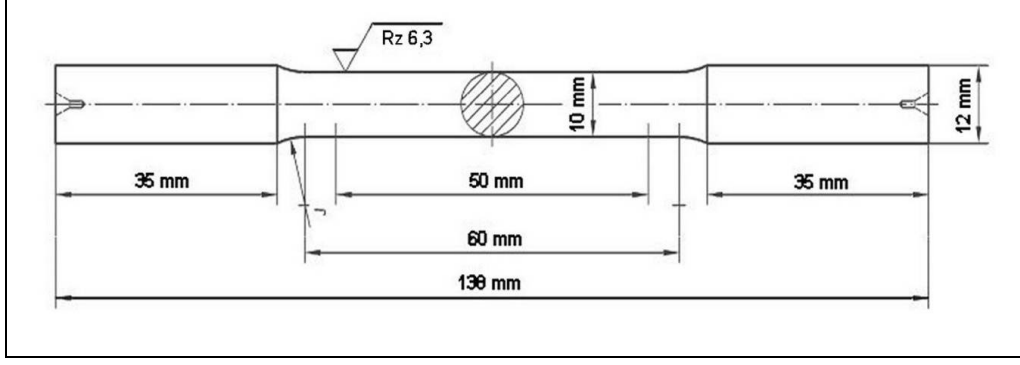
Sertlik ölçümleri Future-Tech marka Vickers makro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri su verilen uçtan 5 mm, 25 mm, 50 mm ve 75 mm mesafelerde her bir bölgeden beş ölçüm alınarak yapılmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak standart sapmaları hesaplanmıştır.

4.7. Elektriksel İletkenlik Ölçümleri

Farklı soğutma ortamları kullanılarak alın su verme işlemi uygulanmış yaşlandırılmış konumdaki numunelerde su verilen yüzeyden 5 mm, 25 mm, 50 mm ve 75 mm uzaklıktaki bölgelerden numuneler alınmıştır. İletkenlik ölçümleri Tübitak Marmara Araştırma Enstitüsü'nde bulunan Institut Dr. Forster Sigmatest iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Her bir numunede 3 ölçüm yapılmış ve ortalama değer alınmıştır. Ölçümler International Annealed Copper Standart (%IACS) standardına göre yapılmış olup, kalibrasyon bloğu olarak bakır ve pirinç bloklar kullanılmıştır. Cihazın ölçüm hassasiyeti $\pm 0,1$ 'dir.

4.8. Mekanik Testler

Soğutma ortamının malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla çözeltili alma işlemi sonrası 20 °C, 50 °C, 75 °C su ve %5, %15, %25'lik konsantrasyonlarda hazırlanmış polimer çözeltileri ile soğutulan ve ardından 120 °C de 24 saat süre ile yaşlandırılmış 25 mm çapında 150 mm uzunluğundaki numuneler DIN 50125:2009-07 standardına uygun çekme test numuneleri olarak hazırlanmışlardır [100]. Kullanılan test numunelerinin standarda uygun teknik resmi Şekil 4.15'te verilmiştir. Her bir soğutma ortamı için 4 adet numune hazırlanmıştır. Çekme testleri Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Instron marka 300 LX model test cihazı kullanılarak, oda sıcaklığında ve 5 mm/dk deformasyon hızı ile gerçekleştirilmiştir.



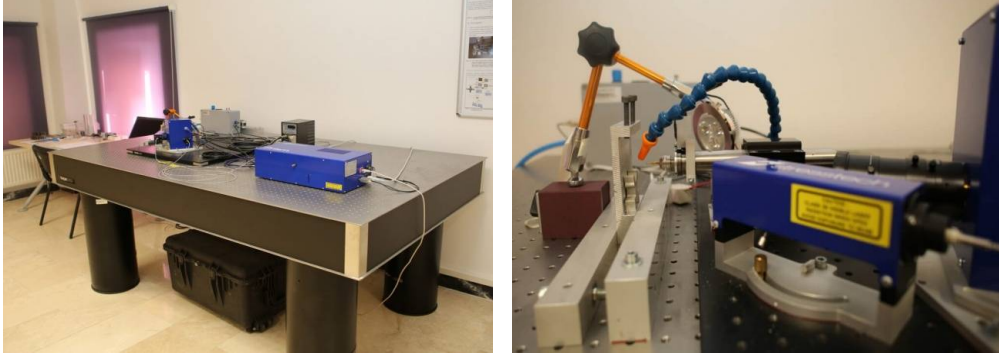
Şekil 4.15. Çekme test numunelerinin teknik resmi

4.9. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Çekme testi sonrasında numunelerin kırılma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla kırılma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Kırık yüzey incelemelerinde gözlemlenen mikroyapı bileşenleri EDX analizi ile belirlenerek kırılma morfolojisine etkisi incelenmiştir.

4.10. Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Çözeltiyeye alma işlemi sonrası soğutma koşullarının malzemede kalıntı gerilme oluşumuna etkisini belirlemek amacıyla numunelerde kalıntı gerilme ölçümleri yapılmıştır. Kalıntı gerilme ölçümleri Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmelliyet Merkezi Kalıntı Gerilme Ölçüm laboratuvarında bulunan Şekil 4.16'da verilen Stresstech marka Kalıntı Gerilme Analiz Cihazı ile Delik Delme ile Kalıntı Gerilme Analiz Sistemi (ESPI Hole Drilling) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalıntı gerilme ölçümleri için AA7075 alaşımı ekstrüze profillerden $\Phi 25 \times 10$ mm ölçülerinde numuneler kesilerek yüzeylerindeki pürüzlülükler metalografi yöntemleri uygulanarak giderilmiştir. Kalıntı gerilme ölçümleri öncesinde numuneler $480 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 5 saat süre ile çözeltiyeye alma işlemi sonrasında ayrı ayrı $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $75 \text{ }^\circ\text{C}$ su, %5 ve %25'lik konsantrasyonlarda hazırlanmış polimer çözeltileri ile soğutulmuştur. Numunelerde çözeltiyeye alma, su verme işlemleri ve kalıntı gerilme ölçümleri arasındaki bekleme süreleri her numune için aynı olacak şekilde uygulanmıştır. ESPI yöntemi ile kalıntı gerilme ölçümleri delik çapı 1,57 mm, delme derinliği 0,05 mm, delik uzunluğu 1 mm olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16. Deneysel çalışmada kullanılan ESPI delik delme ile kalıntı gerilme analiz sistemi

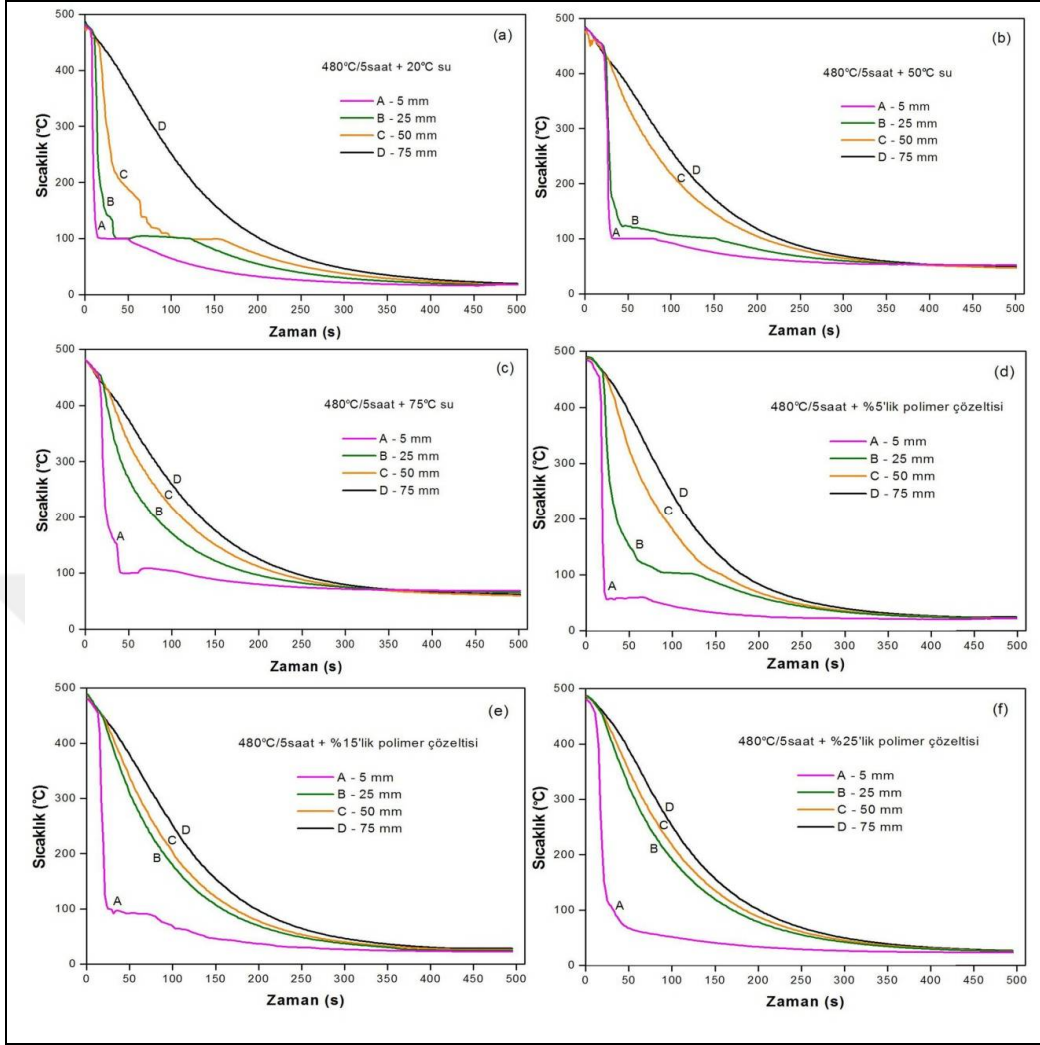


5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Soğuma Karakteristiğinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında geliştirilen alın su verme test düzeneğinde çözeltiliye alma ısıl işlemi sonrası farklı soğutma ortamları kullanılarak yapılan bir uçtan soğutma işlemleri esnasında numune profili boyunca zamana bağlı olarak meydana gelen soğuma karakteristiğindeki değişimler Şekil 5.1'de verilmiştir. Çözeltiliye alma ısıl işlemi yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının elde edilmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Katı çözeltilinin aşırı doymuşluğu çözeltiliye alma sıcaklığı, tutma süresi ve soğuma hızına bağlıdır. Şekil 5.1'de verilen soğuma eğrilerinde soğutma ortam koşullarının malzemenin soğuma karakteristiğine etkisi açıkça görülmektedir. Soğutma işleminin uygulandığı uç bölgeye yakın olan yaklaşık 5 mm mesafedeki bölgede sıcaklık hızlı bir şekilde düşerken, su verilen uçtan uzaklaştıkça soğumanın daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. En hızlı soğuma karakteristiği 20 °C su ile yapılan alın su verme işleminde gözlemlenirken, su sıcaklığı ve polimer konsantrasyonu arttıkça soğuma işleminin malzeme profili boyunca daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Çözeltiliye alma işlemi sonrası uygulanan soğutma ortamı ile malzeme arasındaki sıcaklık farkı arttıkça ısı alış veriş hızı daha hızlı gerçekleşmekte ve bu durum malzeme sıcaklığının hızlı bir şekilde düşmesine neden olmaktadır [98]. Malzemenin soğutucu ortam ile temas eden yüzeyindeki sıcaklığın soğutma ortamının kaynama sıcaklığının altına düşmesinden sonra, konvektif soğutma rejimi kurulmakta ve soğuma hızı daha düşük bir seviyede sabit kalmaktadır [101].

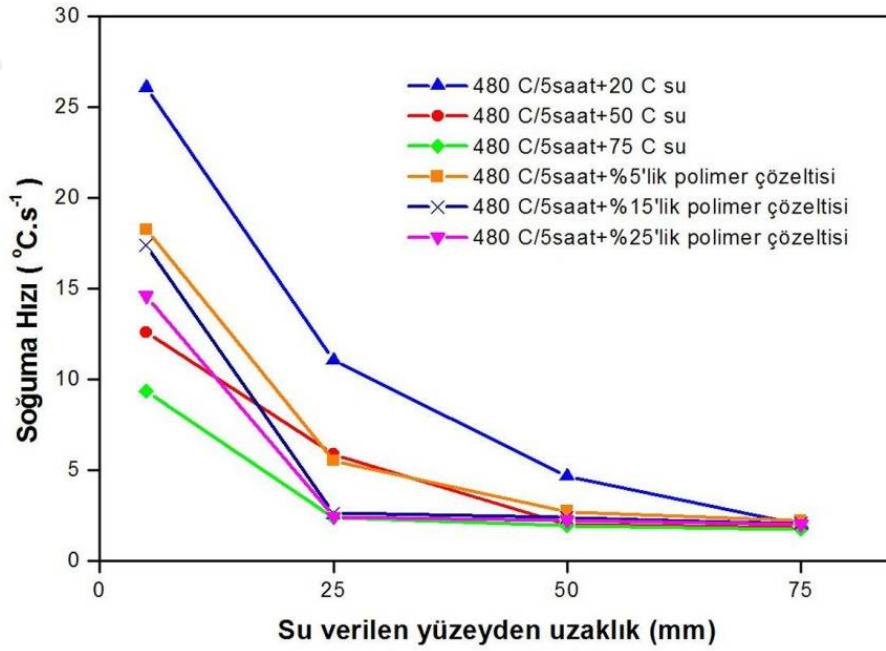
Su sıcaklığının artmasıyla numune ile ortam arasındaki sıcaklık farkı azaldığı için 75 °C su ile bir uçtan soğutulan numunede yüzeyden merkeze doğru sıcaklık değişiminin daha düşük bir hızda gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 5.1.d – Şekil 5.1.f'de verilen soğuma eğrilerinde polimer konsantrasyonu arttıkça malzeme yüzeyinde oluşan polimer film tabakasının etkinliğinin de artması nedeniyle daha yavaş bir soğumanın meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 5.1. Farklı soğutma ortamları ile alın su verme işlemi esnasında numunenin profili boyunca zamana bağlı soğuma karakteristiği a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Alın su verme işlemi sırasında yüzeyden 5 mm, 25 mm, 50 mm ve 75 mm uzaklıklarda farklı soğutma ortamları için soğuma hızlarındaki değişimlerin belirlenmesi ve karşılaştırılması amacıyla 480 °C ve 120 °C aralığındaki zamana bağlı sıcaklık değişimleri göz önünde bulundurularak ortalama soğuma hızları hesaplanmıştır. Farklı soğutma ortamları için su verilen yüzeyden mesafenin bir fonksiyonu olarak elde edilen ortalama soğuma hızları Şekil 5.2'de verilmiştir. Su verilen yüzeyden uzaklaştıkça soğuma hızının azaldığı görülmektedir. Numune profili boyunca su verilen yüzey ve yüzeye en uzak mesafe arasındaki soğuma hızı farklılıklarının 20 °C ile soğutulan numunede en yüksek değerde olduğu açıkça görülebilmektedir. Su verilen yüzeye 5 mm

mesafede elde edilen soğuma hızları karşılaştırıldığında farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltilerinde 50 °C su ve 75 °C suya göre daha yüksek soğuma hızlarının elde edildiği görülmektedir. Bu durum polimer çözeltilerinin oda sıcaklığında olması nedeniyle numune ile ortam arasındaki sıcaklık farkı 50 °C su ve 75 °C suya göre daha fazla olmasından dolayı polimer ile soğutulan numunelerde soğutma işleminin uygulandığı ilk anlarda sadece alın yüzeyinde ve yüzeye yakın bölgede daha hızlı bir soğuma karakteristiğinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Su verilen yüzeyden 25 mm itibari ile numune profili boyunca 50 °C su ile %5'lik polimer çözeltisi ile elde edilen soğuma hızlarının, %15 ve %25'lik polimer çözeltileri ile de 75 °C su ile elde edilen soğuma hızlarındaki değişimin benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Alın su verme test işlemi esnasında su sıcaklığı ve polimer çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça numune profili boyunca soğuma hızındaki değişimin azaldığı ve daha homojen bir soğuma karakteristiğinin elde edildiği gözlemlenmiştir.



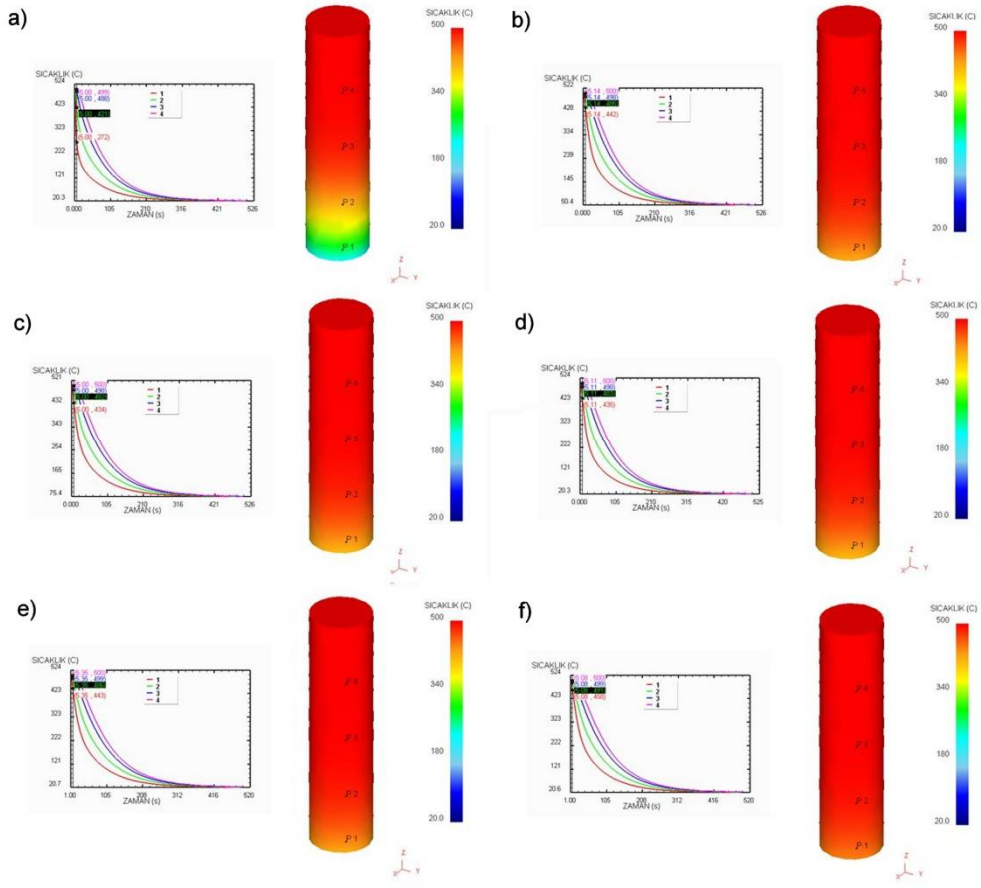
Şekil 5.2. Su verilen yüzeyden uzaklığın bir fonksiyonu olarak numune profili boyunca soğuma hızı değişimi

5.2. Farklı Ortamlar için Soğumanın Modellenmesi

Çözeltiye alma işlemi sonrası su ile soğutma işlemi esnasında zamana bağlı olarak su verilen numune yüzeyinde sırasıyla ince buhar filmi oluşumu, kabarcıklı kaynama ve konveksiyonel soğuma aşamalarından oluşan 3 aşamalı ısı transferi gerçekleşir. Çözeltiye alma işlemi sonrası alın su verme işlemi esnasında 20 °C'deki suyun numunenin alın yüzeyine çarpması ile birlikte sıcak numunenin alın yüzeyinin etrafında bir buhar filmi oluşur. Isı daha sonra bu buhar filmi vasıtasıyla suya aktarılır. Numunenin yüzey sıcaklığı 350 °C ile 100 °C aralığında iken kabarcıklı kaynama oluşumu gözlemlenir. Numunenin yüzey sıcaklığı 100 °C'nin altına düştüğünde ısı transferi önemli derecede azalır ve ısı konveksiyon yolu ile transfer edilir. Daha yüksek sıcaklıklarda su ile soğutma işlemi esnasında ise daha kararlı ve kalıcı bir buhar tabakası meydana gelir. Bu buhar tabakası su verilen yüzeyin sıcaklığı Leidenfrost sıcaklığı olarak adlandırılan noktaya ulaştığında yok olur ve çok kuvvetli kabarcıklı kaynama aşaması gerçekleşir. Sıcaklık 100 °C'nin altına düştüğünde ise konveksiyonel soğuma gerçekleşir [6,102].

Su ile karşılaştırıldığında polimer çözeltisi ile soğutma işlemi esnasında malzeme yüzeyinde polimer konsantrasyonuna bağlı olarak bir polimer film tabakası oluşur ve soğuma işlemi esnasında ısı transferinde bu film tabakası etkilidir [102,103].

Şekil 5.3'te çözeltiye alma ısıl işlemi sonrası alın su verme ile soğutma işleminin 5. saniyesinde numunelerin soğuma profillerindeki değişimler verilmiştir. Şekil 5.3.a'da 20 °C su ile yapılan alın su verme işleminde en hızlı soğumanın gerçekleştiği belirgin bir şekilde görülmektedir. 50 °C su, 75 °C su ve farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltileri ile soğutulan numunelerde profil boyunca 5. saniyede belirgin bir sıcaklık değişiminin henüz gerçekleşmemiş olduğu 20 °C su ile soğutulan numunede ise su verilen yüzeyden 5 mm mesafede sıcaklığın 272 °C'ye düşerek profil boyunca sıcaklık değişiminin başlamış olduğu görülmektedir.

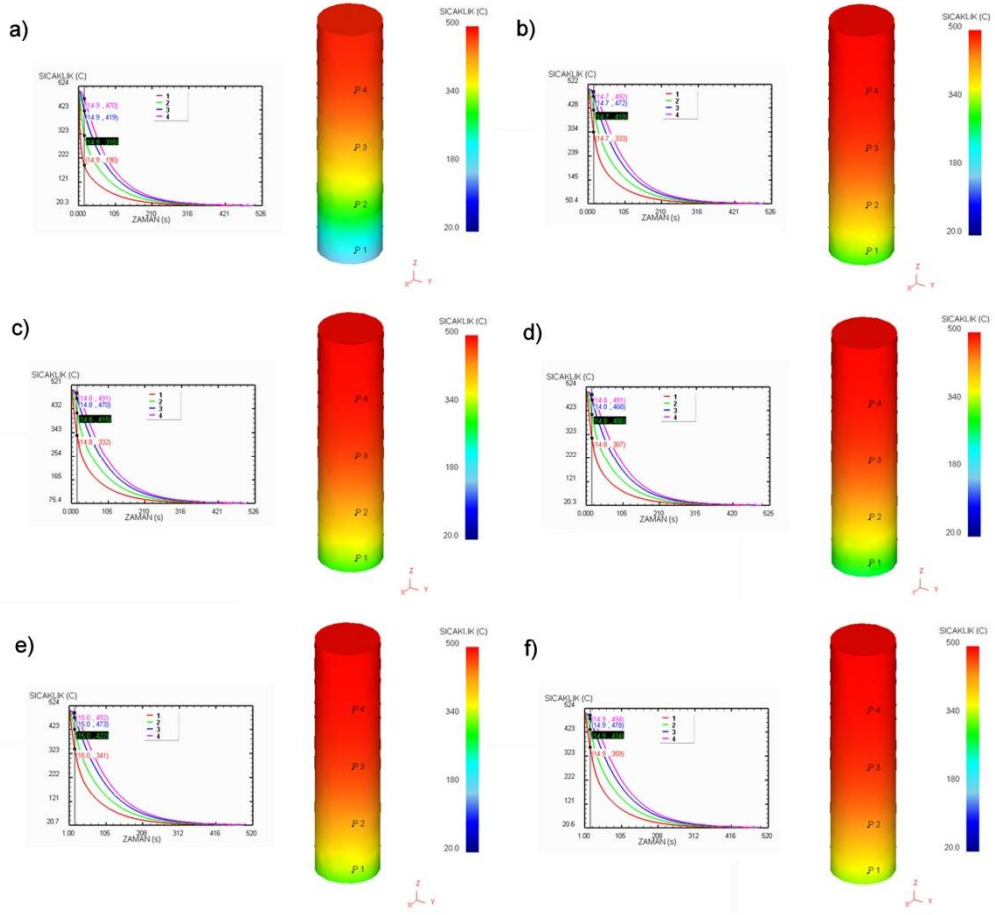


Şekil 5.3. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 5. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Çözeltiye alma ısıl işlemi sonrası alın su verme ile soğutma işleminin 15. saniyesinde numunelerin soğuma profillerindeki değişimler Şekil 5.4'te verilmiştir.

Şekil 5.4.a'da verilen 20 °C su ile yapılan bir uçtan soğutma işlemi sırasında numune profili boyunca farklı sıcaklık bölgelerinin oluşmaya başladığı ve su verilen yüzeye en yakın bölgede sıcaklığın 190 °C'ye düştüğü görülmektedir.

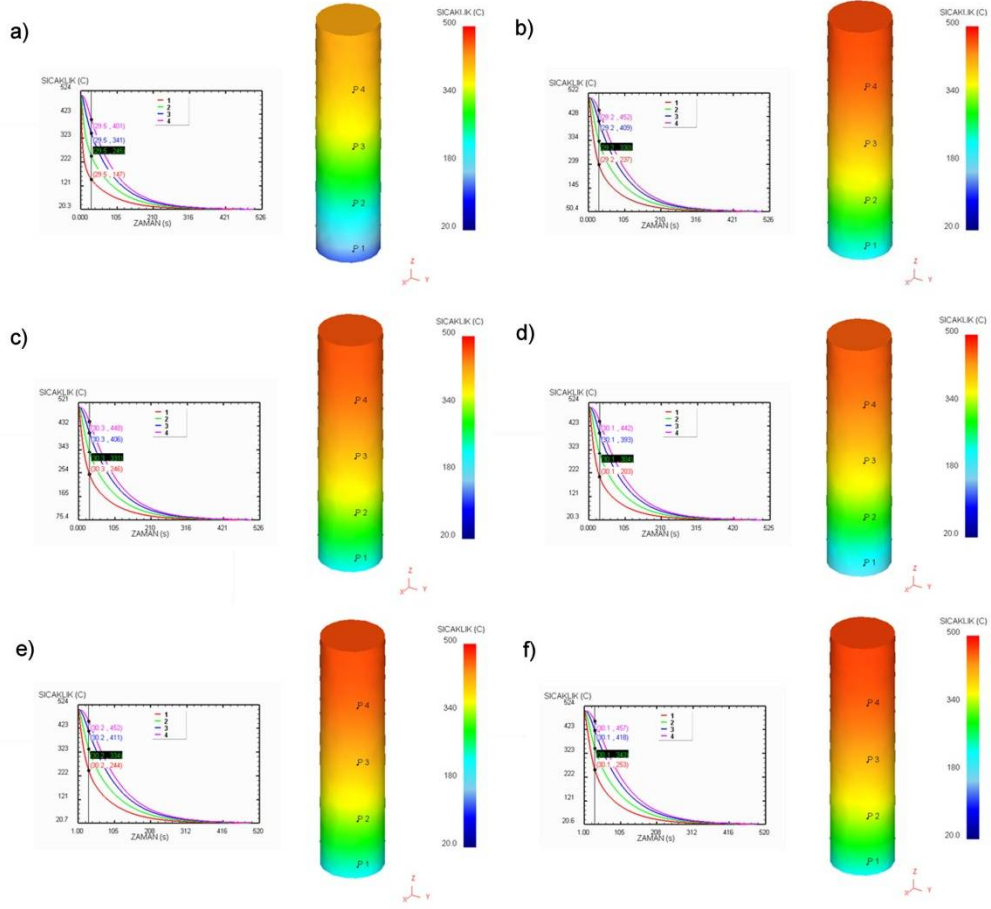
Şekil 5.4.b – Şekil 5.4.f'de verilen 50 °C su, 75 °C su ve farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltileri ile soğutulan numunelerde ise alın su verme yüzeyine en yakın bölgelerde sıcaklığın 307-369 °C aralığına düşmeye başladığı, yüzeyden uzaklaştıkça belirgin bir sıcaklık düşüşünün gerçekleşmediği, yüzeye en uzak bölgelerin ise halen çözeltiye alma sıcaklığında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.4. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 15. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.5'te farklı soğutma ortamları için profil boyunca meydana gelen soğuma karakteristiğindeki değişimlerin 30. saniyede daha belirgin hale gelmeye başladığı görülmektedir.

%5'lik konsantrasyondaki polimer çözeltisi ile alın su verme işleminde profil boyunca 20 °C suya göre daha yavaş ancak 50 °C su, 75 °C su, %15'lik ve %25'lik polimer çözeltisine göre daha belirgin soğuma farklılıklarının meydana geldiği görülmüştür.

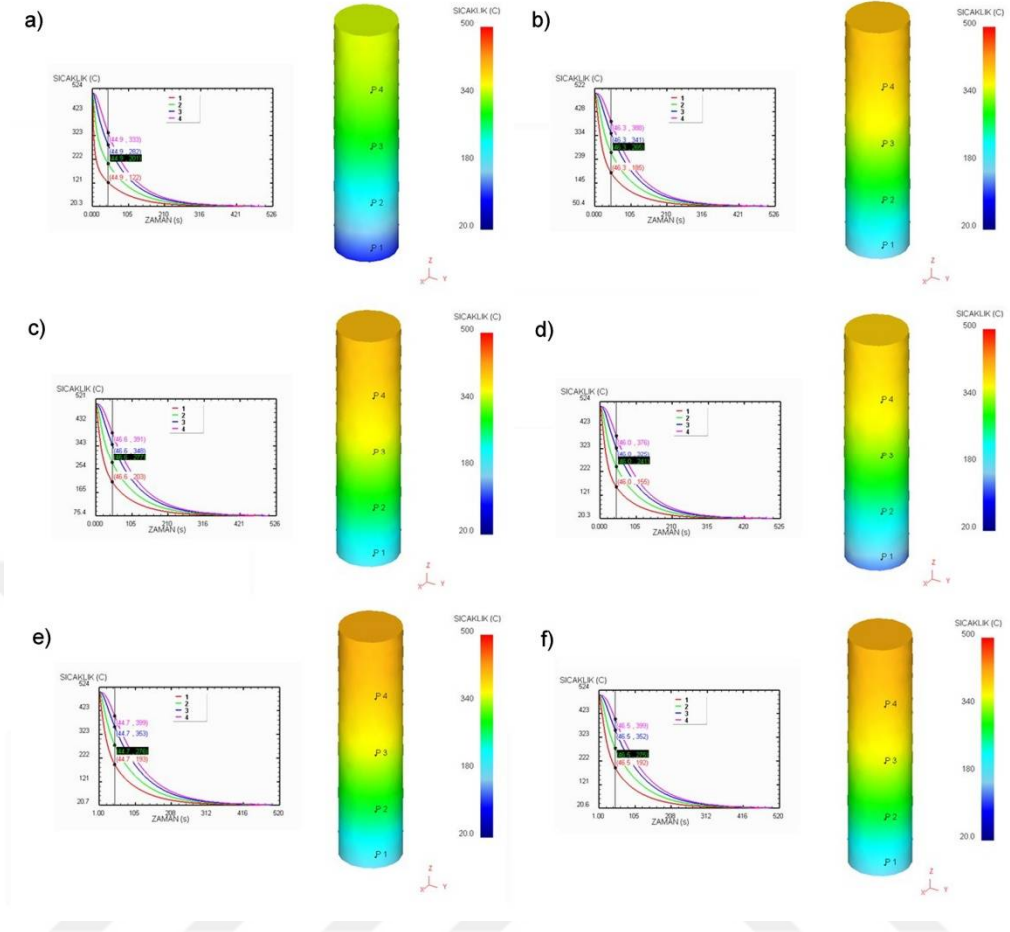


Şekil 5.5. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 30. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.6'da alın su verme işlemi sırasında farklı soğutma ortamları için profil boyunca soğuma karakteristiğinin 45. saniyedeki değişimleri verilmiştir.

20 °C su ile soğutulan numunede profil boyunca meydana gelen soğuma farklılıklarının diğer soğutma ortamlarına göre daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı yüzeye en yakın bölgede sıcaklığın 122 °C'ye, en uzak bölgede ise 333 °C'ye düştüğü görülmektedir.

50 °C su , %15'lik ve %25'lik polimer çözeltileri ile yapılan alın su verme işlemlerinde profil boyunca 20 °C su ve %5'lik polimer çözeltisine göre daha yavaş fakat 75 °C suya göre daha belirgin soğuma farklılıklarının meydana geldiği görülmüştür.

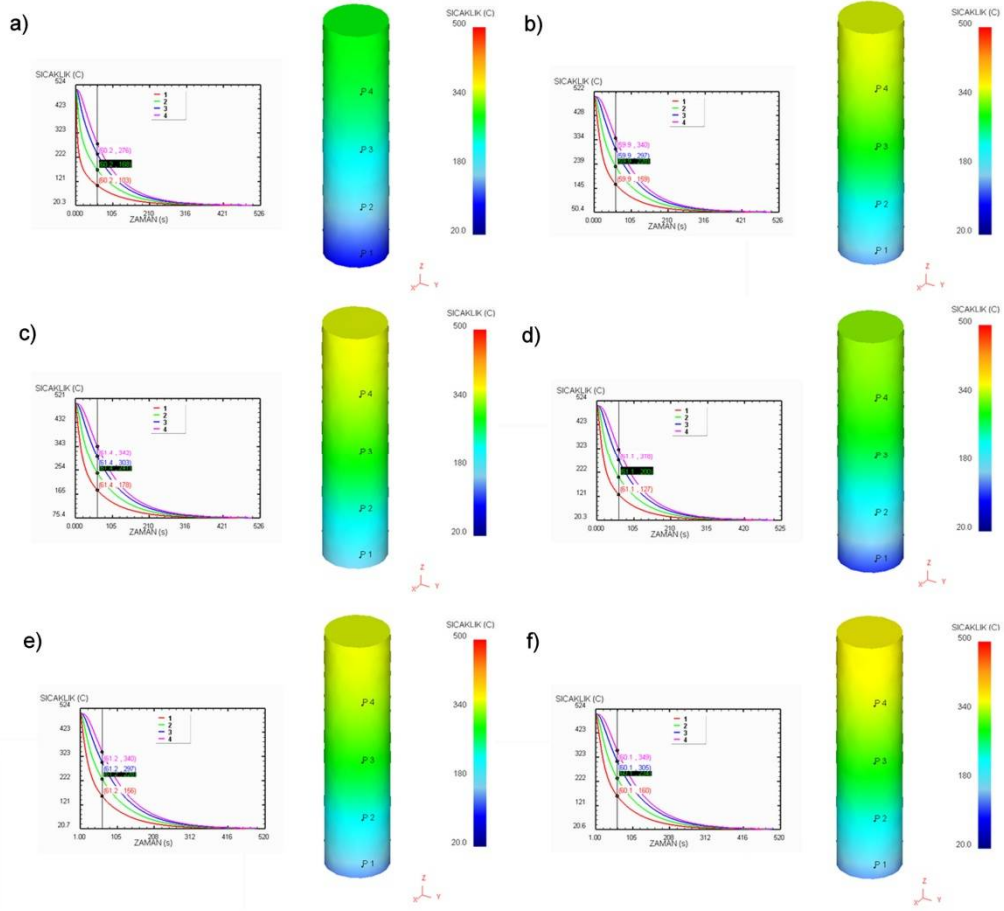


Şekil 5.6. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 45. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.7'de verilen alın su verme ile soğutma işleminin 60. saniyesinde numunelerin soğuma profillerinde gözlemlenen değişimlerin 20 °C su ve %5'lik polimer çözeltisi ile soğutulan numunelerde diğer numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Her iki numunenin alın yüzeyine en uzak bölgede sıcaklığın 340 °C'nin altına kadar düştüğü görülürken 20 °C su ile soğutulan numunede %5'lik polimer çözeltisi ile soğutulan numuneye göre alın yüzeyinden daha uzak mesafelerde çok daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

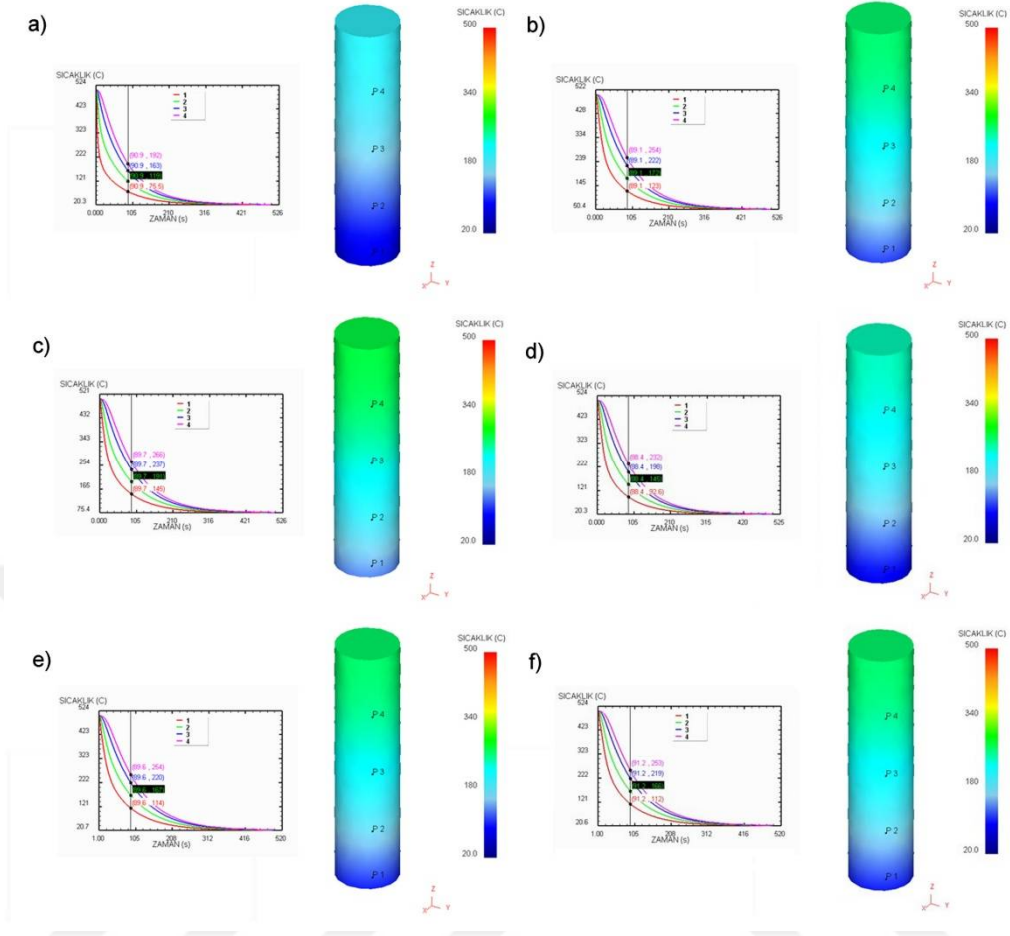
Su sıcaklığı ve polimer konsantrasyonu arttıkça profil boyunca soğuma karakteristiğindeki değişimin daha yavaş ve kontrollü bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.7. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 60. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.8'de verilen alın su verme ile soğutma işleminin 90. saniyesinde numunelerin soğuma profillerindeki değişimler incelendiğinde artan soğutma süresine bağlı olarak soğutma ortamının numunenin farklı bölgeleri üzerindeki etkisi daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

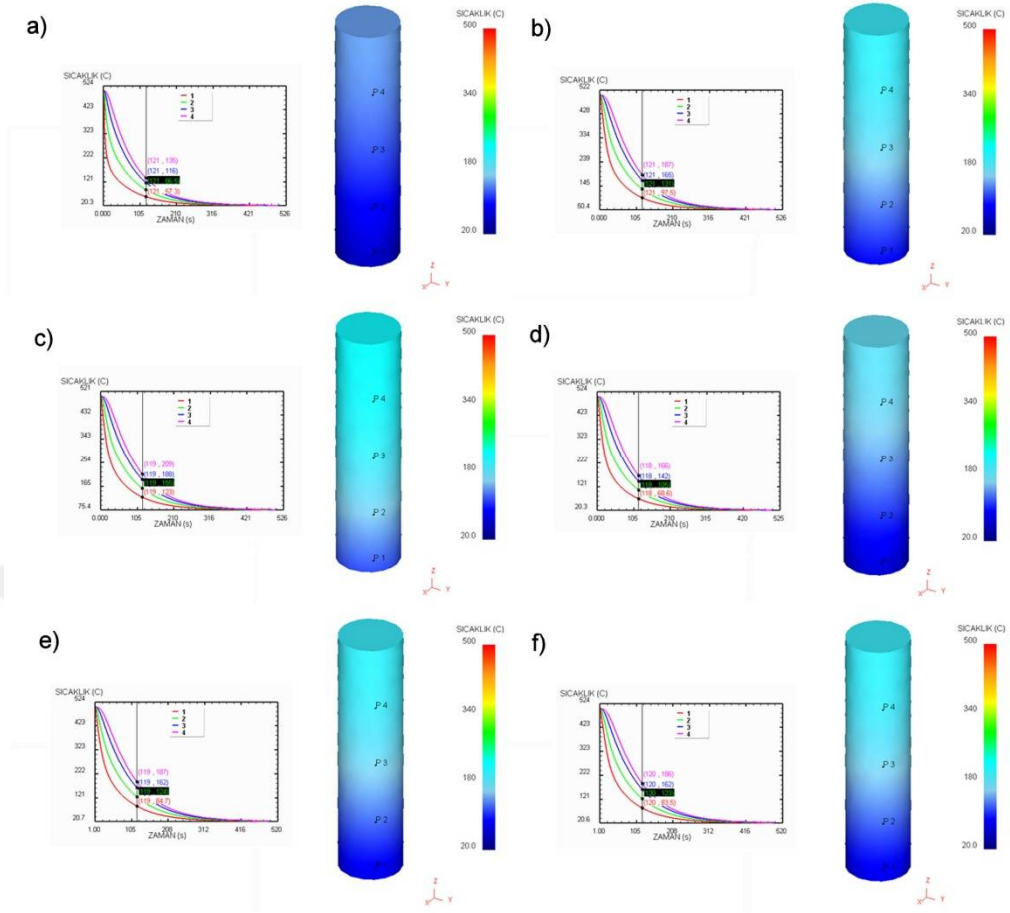
Su verme işleminin 90. saniyesinde 50 °C su ile soğutulan numunede yüzeye en yakın bölgede sıcaklık 123 °C iken en uzak bölgede ise 254 °C olduğu gözlemlenmiştir. 50 °C su ile yapılan alın su verme işlemlerinde profil boyunca 20 °C su ve %5'lik polimer çözeltisine göre daha yavaş fakat 75 °C su, %15'lik ve %25'lik polimer çözeltilerine göre daha belirgin soğuma farklılıklarının meydana gelmeye başladığı görülmüştür.



Şekil 5.8. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 90. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.9'da verilen alın su verme işlemi esnasında numunelerin 120. saniyedeki soğuma profillerinde 20 °C su ile yapılan soğutma işleminde profil boyunca meydana gelen soğuma değişiminin belirgin bir şekilde azalmaya başladığı ancak diğer soğutma ortamları için profil boyunca değişimin halen devam ettiği görülmektedir.

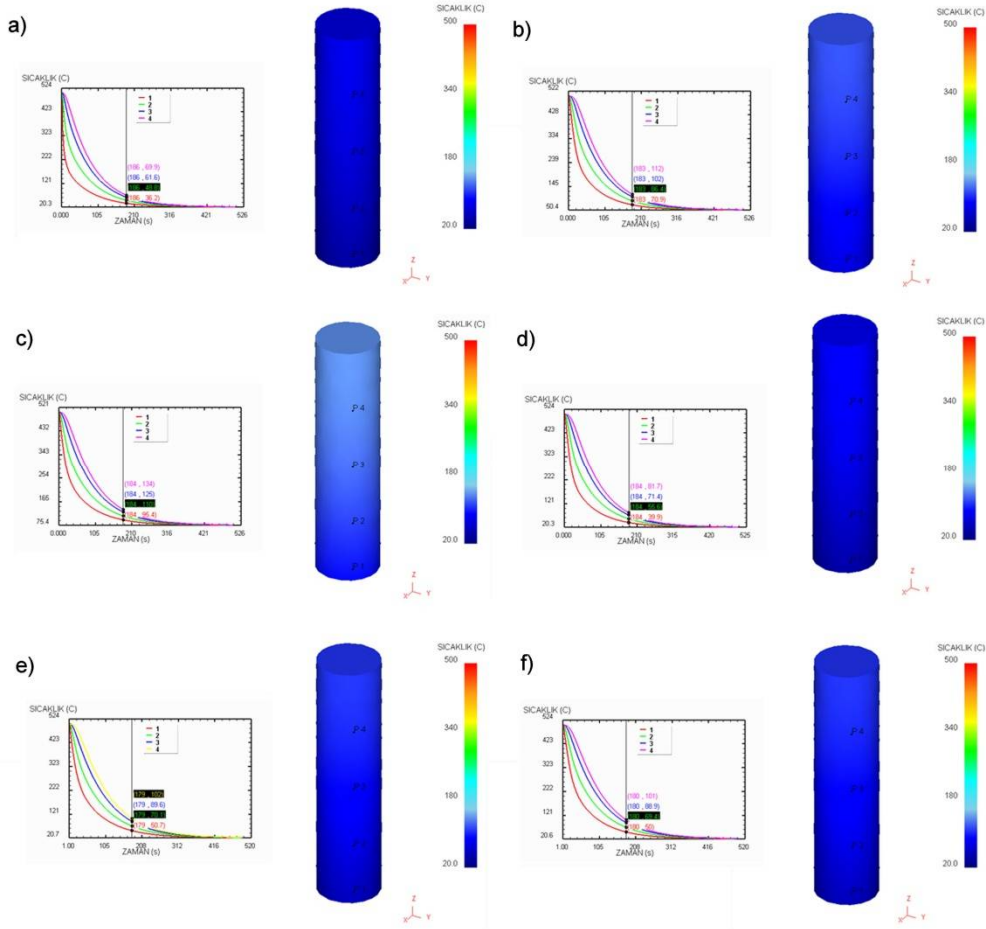
120. saniyede 20 °C su ile soğutulan numunede su verilen yüzeye en yakın bölgede sıcaklığın yaklaşık 57 °C'ye en uzak bölgede ise sıcaklığın yaklaşık 135 °C ye düştüğü görülmektedir. Profil boyunca en yavaş soğuma karakteristiğinin gözlemlendiği 75 °C su ile soğutulan numunede ise su verilen yüzeye en yakın bölgede sıcaklığın 123 °C, en uzak bölgede ise 209 °C'de olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 120. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

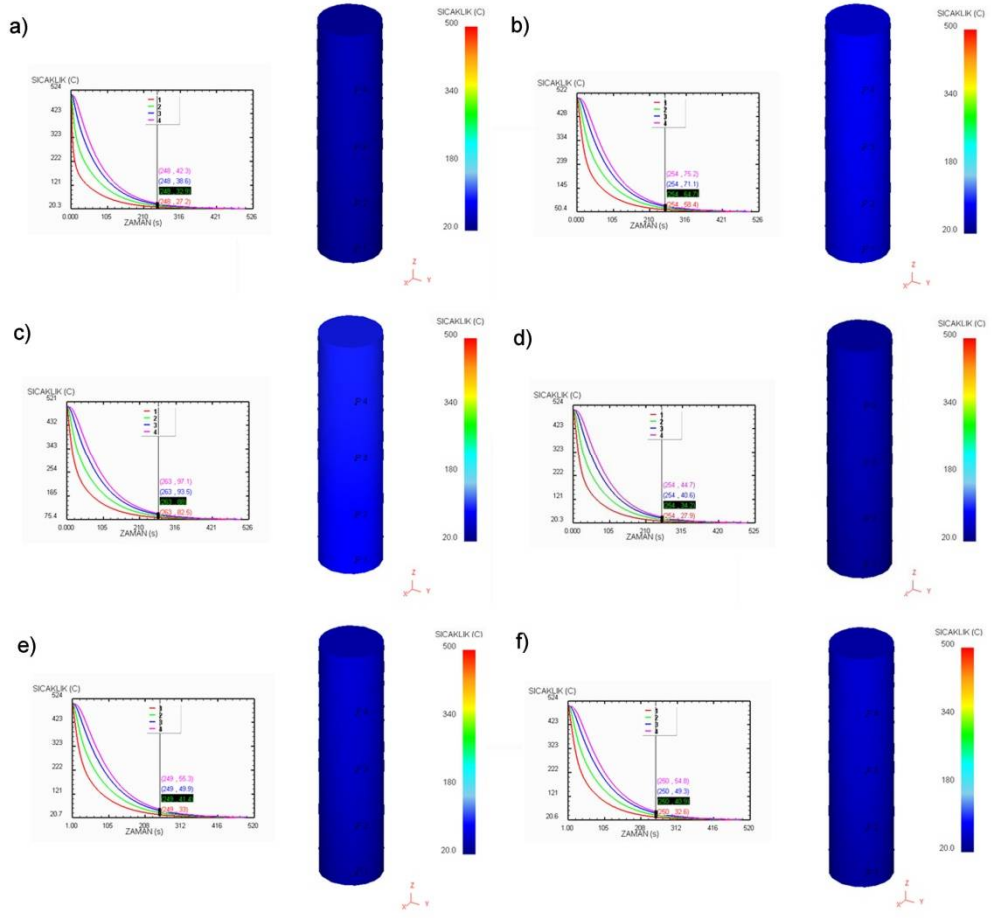
Şekil 5.10'da verilen alın su verme işlemi esnasında farklı soğutma ortamları için profil boyunca meydana gelen soğuma karakteristiğinin 180. saniyedeki değişimleri incelendiğinde artan zamana bağlı olarak tüm soğutma koşulları için su verilen yüzey ve yüzeye en uzak bölgeler arasındaki sıcaklık farklılıklarının belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir.

%5'lik konsantrasyonda polimer çözeltisi ile su verilen numunede alın yüzeyine en yakın bölge ile en uzak bölge arasındaki sıcaklık farklılığının yaklaşık 40 °C'ye, %25'lik konsantrasyonda polimer çözeltisi ile alın su verilen numunede ise bu iki bölge arasındaki sıcaklık farklılığının yaklaşık 50 °C'ye kadar düştüğü görülmüştür.



Şekil 5.10. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 180. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

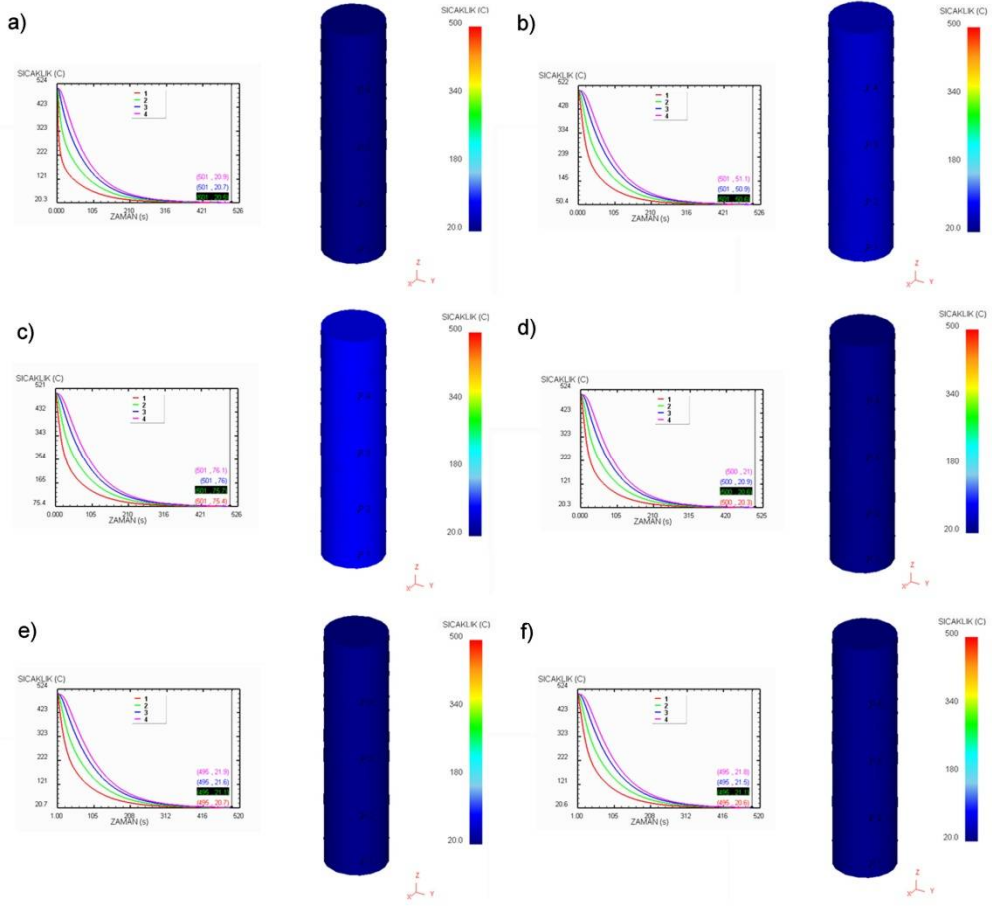
Çözeltiye alma ısıl işlemi sonrası farklı soğutma ortamları kullanılarak alın su verme işlemi ile bir uçtan soğutma işlemi esnasında numunelerin 250. saniyedeki soğuma profilleri Şekil 5.11'de verilmiştir. En hızlı soğuma profilinin elde edildiği 20 °C su ile alın su verilen numunede yüzeye en yakın bölgede sıcaklık 27 °C iken yüzeye en uzak bölgede sıcaklığın 42 °C'ye düştüğü, 75 °C su ile soğutulan numunede yüzeye en yakın bölgede sıcaklığın 82 °C'ye en uzak bölgede ise 97 °C'ye kadar düştüğü görülmektedir. %25'lik polimer çözeltisi ile soğutulan numunede ise yüzeye en yakın bölgede sıcaklığın 32 °C'ye en uzak bölgede ise 54 °C'ye düştüğü tüm soğutma koşulları için profil boyunca sıcaklık farklılıklarının belirgin bir şekilde azaldığı artan zamana bağlı olarak homojen sıcaklık dağılımının elde edilmek üzere olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.11. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 250. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.12'de verilen alın su verme işlemi esnasında numunelerin 500. saniyedeki soğuma profillerinde tüm soğutma koşulları için uygulanan soğutma ortamının sıcaklığına göre profil boyunca soğumanın tamamlanarak homojen bir sıcaklık dağılımına sahip oldukları görülmektedir.

Modelleme çalışmaları ile alın su verme işlemi sırasında zamana bağlı olarak numunelerde profil boyunca numerik olarak elde edilen ve görsel olarak da gözlemlenen sıcaklık değişimlerinin Şekil 5.1'de verilen termo-elemanlar ile ölçülerek elde edilen deneysel sonuçlar ile paralellik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 5.12. Numunelerin alın su verme ile soğutma işlemi esnasında profil boyunca 500. saniyedeki soğuma karakteristikleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) %25'lik polimer çözeltisi

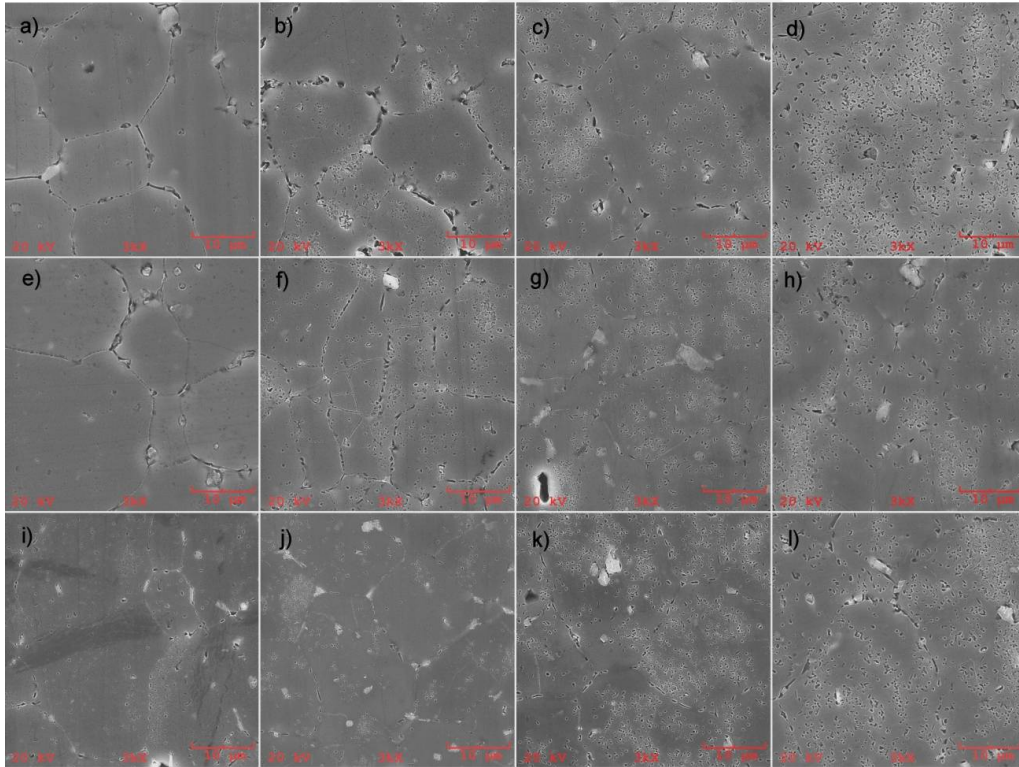
5.3. Mikroyapısal Karakterizasyon

5.3.1. SEM incelemeleri

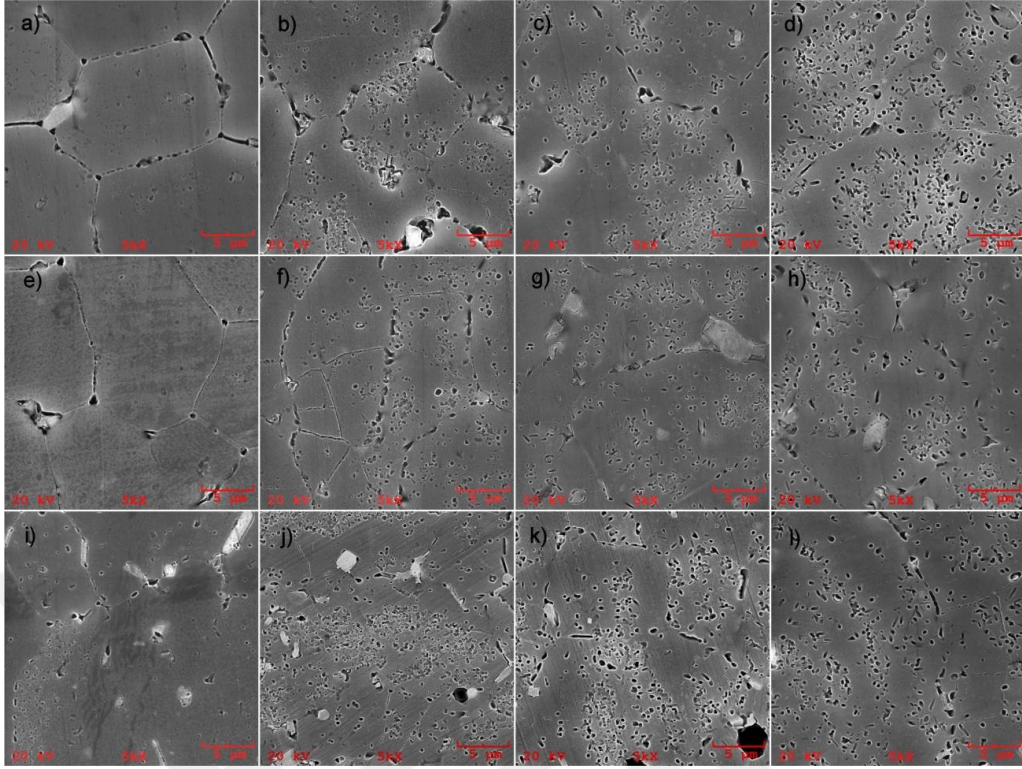
480 °C'de 5 saat çözeltiye alma ısıl işlemi sonrası 20 °C su, 50 °C su ve 75 °C su ile alın su verme yöntemi ile bir uçtan soğutulduktan sonra 120 °C'de 24 saat süre ile yaşlandırma işlemleri uygulanmış numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde soğuma hızı azaldıkça yapının daha kaba olduğu görülmüştür. Numunelerde su verilen uçtan uzaklaştıkça ve soğutma ortam sıcaklığı arttıkça çökeltilerin tane sınırlarından ziyade tane içerisinde de oluşum gösterdiği ve daha kaba boyutlu olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 5.15'te verilen yüksek büyütmede alınmış SEM görüntüsünde 50 °C su ile alın su verilmiş ve yaşlandırılmış konumdaki numunede su verilen uçtan 25 mm mesafedeki çökeltilerin dağılımı ve morfolojilerindeki değişim açıkça görülmektedir.

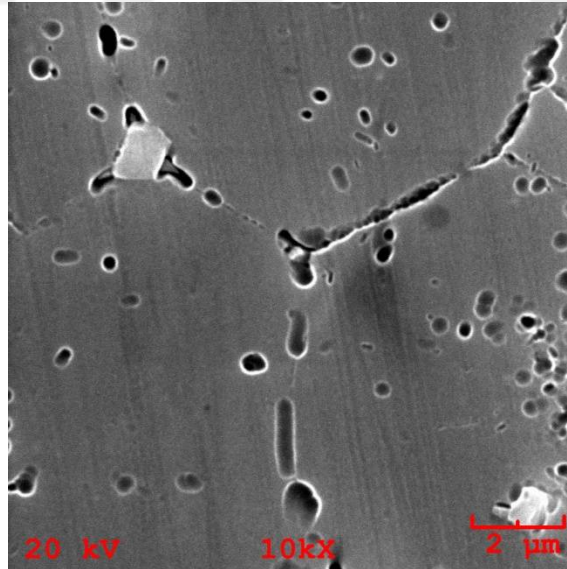
Çözeltiye alma işlemi sonrasında su verme hızı arttıkça katı çözeltinin aşırı doygunluğu da artar. Aynı zamanda hızlı soğutma ile malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli etkiye sahip küçük boyutlu çökeltilerin çekirdeklenmesini kolaylaştırabilen yüksek miktarda boşyer konsantrasyonuna sahip olmasını sağlar. Su verme hızı azaldıkça katı çözeltinin aşırı doygunluğu azalır ve difüzyon süresi artar. Bu durum daha kaba boyutlu çökeltilerin oluşmasına, boşyer konsantrasyonunda ve yaşlandırma işlemi sonrasında oluşan küçük boyutlu çökeltilerin miktarında azalmaya neden olmaktadır [41,104].



Şekil 5.13. Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) 20 °C su, e-h) 50 °C su, i-l) 75 °C su



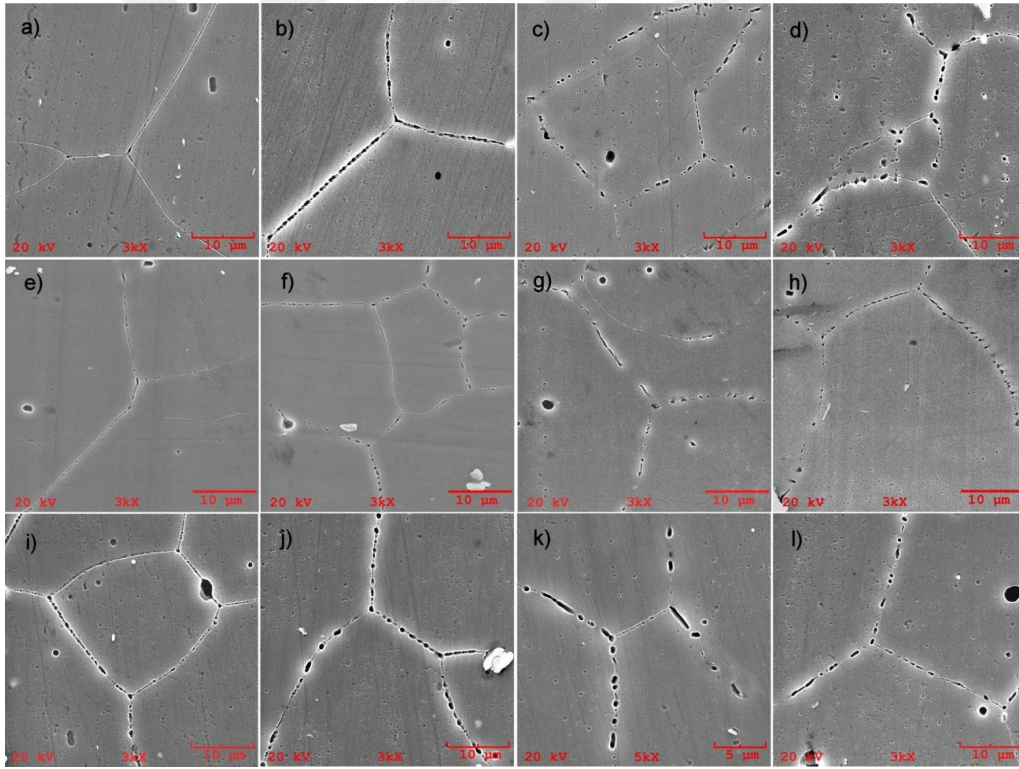
Şekil 5.14. Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) 20 °C su, e-h) 50 °C su, i-l) 75 °C su



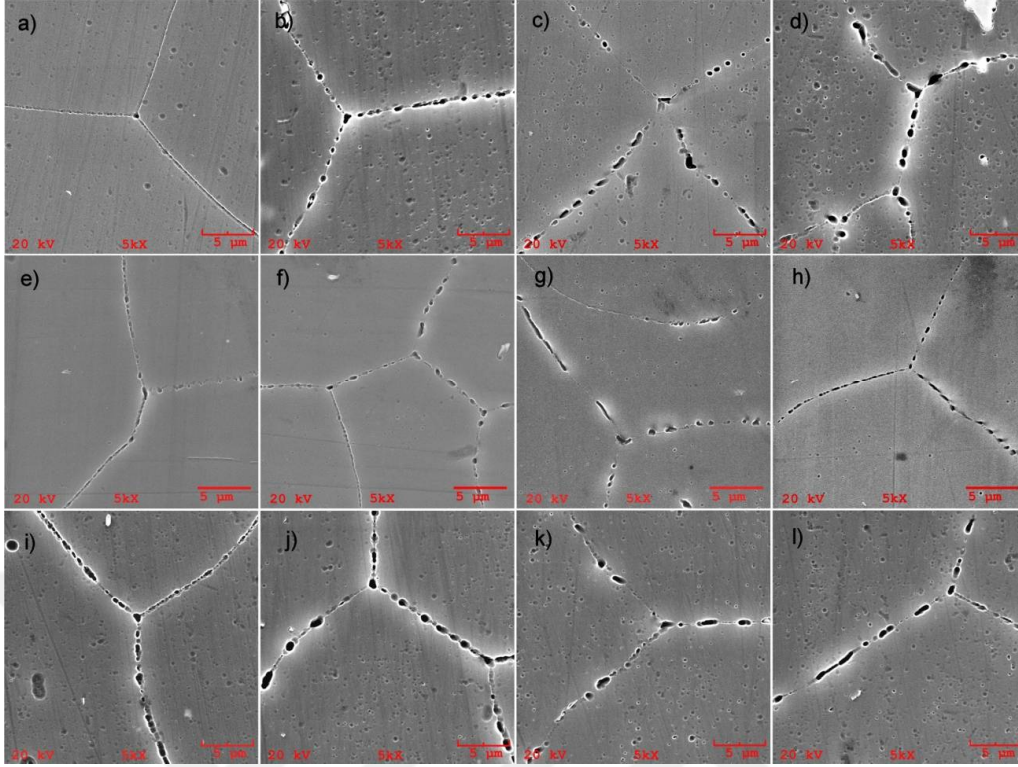
Şekil 5.15. 50 C su ile alın su verilmiş ve yaşlandırılmış konumdaki numunede su verilen uçtan 25 mm mesafedeki çöktülerin yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de 480 °C’de 5 saat çözeltiye alma ısıl işlemi sonrası hacimce %5, %15 ve %25’lik konsantrasyonlarda polimer çözeltileri ile alın su verme yöntemi ile bir uçtan soğutulduktan sonra 120 °C’de 24 saat süre ile yaşlandırma işlemleri uygulanmış numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Polimer çözeltileri ile soğutulan numunelerde tane yapısının su ile soğutulan numunelere göre daha kaba olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca çökeltilerin ağırlıklı olarak tane sınırlarında oluşum gösterdikleri, su verilen uçtan uzaklaştıkça ve polimer konsantrasyonu arttıkça daha kaba boyutlara sahip oldukları görülmektedir.

Düşük soğuma hızlarında malzemede kaba ve heterojen dağılımlı çökelti oluşumu beklenir. Bu çökeltiler genellikle η denge çökeltileridir ve η çökeltilerine göre daha kaba bir yapıya sahiptirler [41,50,52].

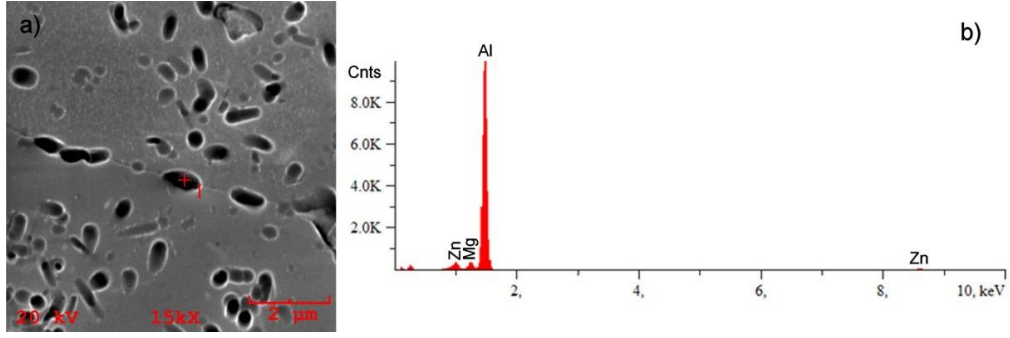


Şekil 5.16. Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) %5’lik polimer, e-h) %15’lik polimer, i-l) %25’lik polimer

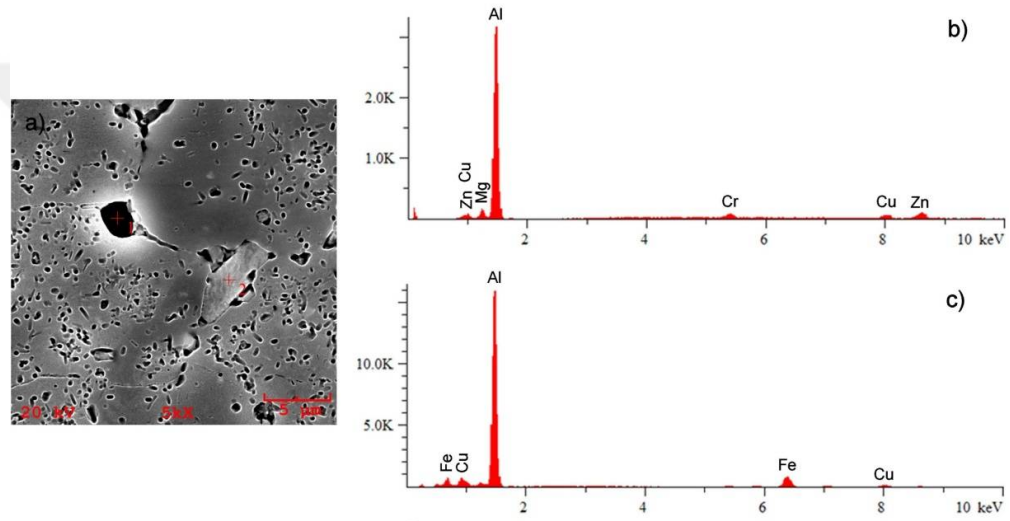


Şekil 5.17. Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin su verilen uçtan farklı mesafelerdeki SEM görüntüleri a-i) 5 mm, b-j) 25 mm, c-k) 50 mm, d-l) 75 mm, a-d) %5'lik polimer, e-h) %15'lik polimer, i-l) %25'lik polimer

Farklı soğutma ortamları kullanılarak bir uçtan soğutulan numunelerde mikroyapı incelemelerinde gözlemlenen çökeltilerin ve intermetaliklerin kimyasal kompozisyonlarını belirlemek amacıyla EDX analizi yapılmıştır. Şekil 5.18'de verilen EDX analiz sonucunda mikroyapı incelemelerinde tane sınırlarında ve tane içerisinde gözlemlenen küçük boyutlu çökeltilerin Mg ve Zn içerdikleri görülmüştür. Bu çökeltilerin alaşıma esas sertlik katkısı veren η ($MgZn_2$) çökeltileri olabileceği belirlenmiştir. Şekil 5.19'de verilen EDX analiz sonucunda mikroyapı incelemelerinde gözlemlenen kaba boyutlu koyu renkli intermetaliklerin Cu, Mg ve Zn içerdikleri açık gri renkteki kaba intermetaliklerin ise Fe ve Cu içerdikleri görülmektedir. Koyu renkli intermetaliklerin literatürde [105-107] de verildiği gibi S (Al_2CuMg) fazı ve açık gri renkteki intermetaliklerin ise Al_7Cu_2Fe partikülleri olabileceği belirlenmiştir. Mikroyapıda gözlemlenen bu kaba boyutlu intermetalikler katılaşma sırasında oluşabilir ve yüksek ergime sıcaklığına sahiptirler [64,94].



Şekil 5.18. 20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin yaşlanmış konumda alın yüzeyinden 75 mm mesafedeki a) SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDX analizi

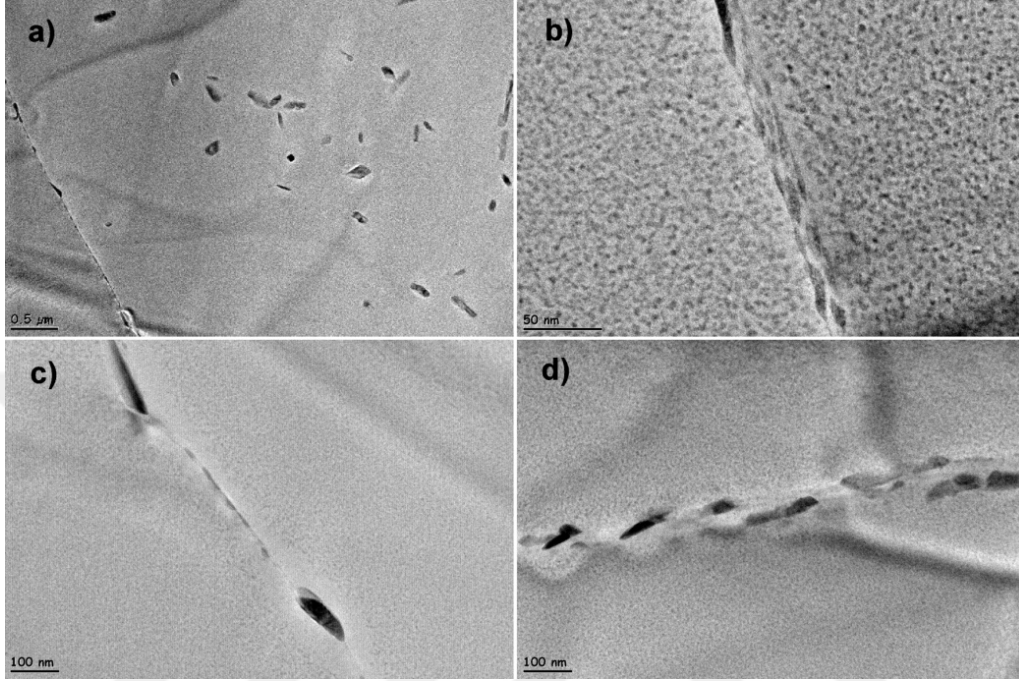


Şekil 5.19. 20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin yaşlanmış konumda alın yüzeyinden 75 mm mesafedeki a) SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDX analizi, c) 2 nolu noktanın EDX analizi

5.3.2. TEM incelemeleri

Çözeltiye alma ısıtma işlemi sonrası su verme hızı tane sınırlarındaki çökeltisiz bölgenin genişliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [108,109]. Şekil 5.20’de çözeltiye alma ısıtma işlemi sonrası 20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin yaşlanmış konumda su verilen yüzeyden 5 mm ve 25 mm uzaklıklardaki bölgelerin TEM görüntüleri verilmiştir. TEM incelemelerinde alın su verme işlemi esnasında profil boyunca soğuma hızında meydana gelen düşmeye bağlı olarak tane sınırlarındaki çökeltisiz bölge genişliğinin arttığı görülmektedir. Soğuma hızı azaldıkça su verme kaynaklı çökelti daha belirgin hale gelir [110]. Tane sınırı çökeltilerinin artması ve kabalaşması ile birlikte tane sınırı yakınındaki bölgelerde çözünen bileşenlerin miktarı da

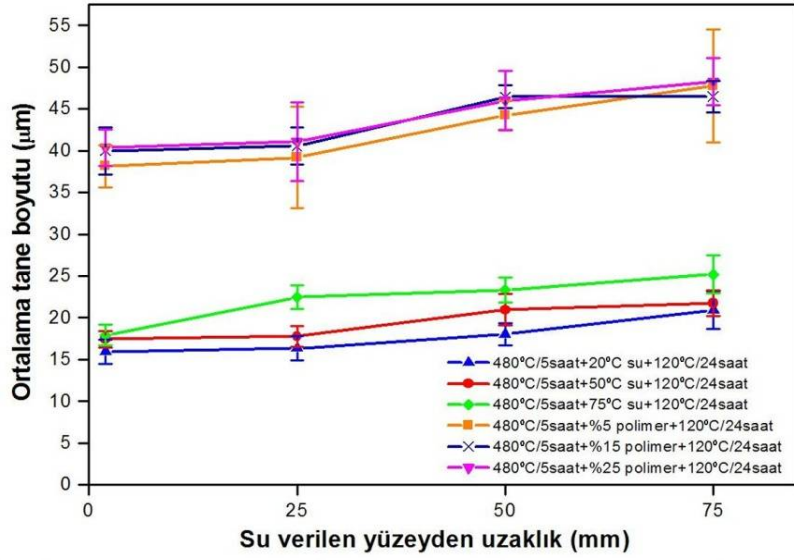
azalır. Bu durum tane sınırları etrafında çökeltisiz bölgelerin (PFZ) oluşmasına neden olur [41,111]. Aynı zamanda su verilen yüzeyden uzaklaştıkça çökeltilerin daha kaba bir yapıya sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 5.20. 20 °C su ile alın su verme işlemi uygulanmış numunenin su verilen yüzeyden farklı mesafelerinin yaşlanmış konumdaki TEM görüntüleri a-c) 5 mm, b-d) 25 mm

5.3.3. Görüntü analizi incelemeleri

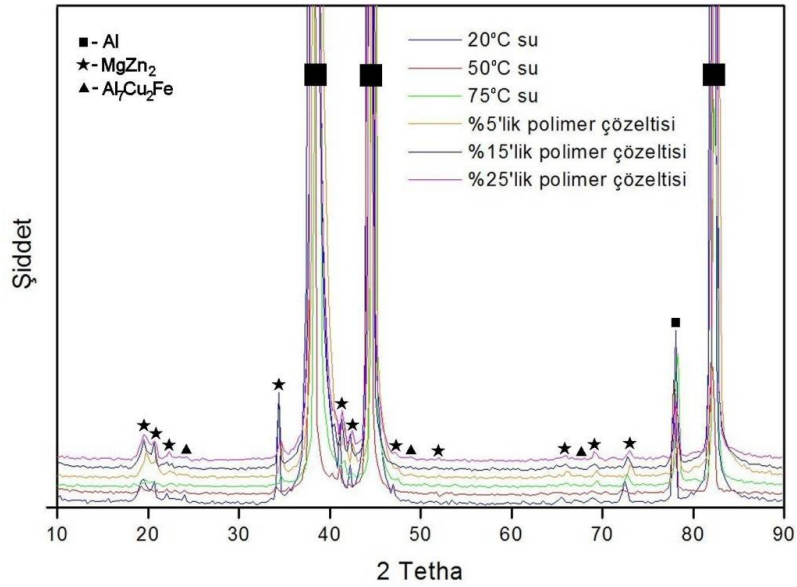
20 °C su, 50 °C su, 75 °C su ve hacimce %5, %15, %25'lik konsantrasyonlardaki polimer çözeltileri ile alın su verme yöntemi ile soğutulan numunelerin profil boyunca soğuma hızına bağlı olarak yüzeyden farklı mesafelerdeki tane boyutu değişimleri Şekil 5.21'de verilmiştir. Soğutma koşullarının numunelerin tane yapıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Polimer çözeltisi ile soğutulan numunelerde su ile soğutulan numunelere göre tane boyutunun yaklaşık 2 katı kadar artış gösterdiği görülmektedir. Su sıcaklığı, polimer konsantrasyonu ve su verilen yüzeyden mesafe arttıkça soğuma hızındaki azalmaya bağlı olarak numune profili boyunca tane boyutunda düşük de olsa farklılıklar meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.21. Soğutma koşullarının numune profili boyunca tane boyutu dağılımına etkisi

5.4. XRD Analizi İncelemeleri

Yaşlandırılmış konumdaki numunelerin XRD paternleri Şekil 5.22’de verilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde bütün soğutma koşullarında numunelerde $MgZn_2$ ve Al_7Cu_2Fe çökeltilerinin bulunduğu belirlenmiştir. Daha kaba boyutlu $MgZn_2$ çökeltilerinin gözlemlendiği polimer ile soğutulan numunelerde $MgZn_2$ piklerinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

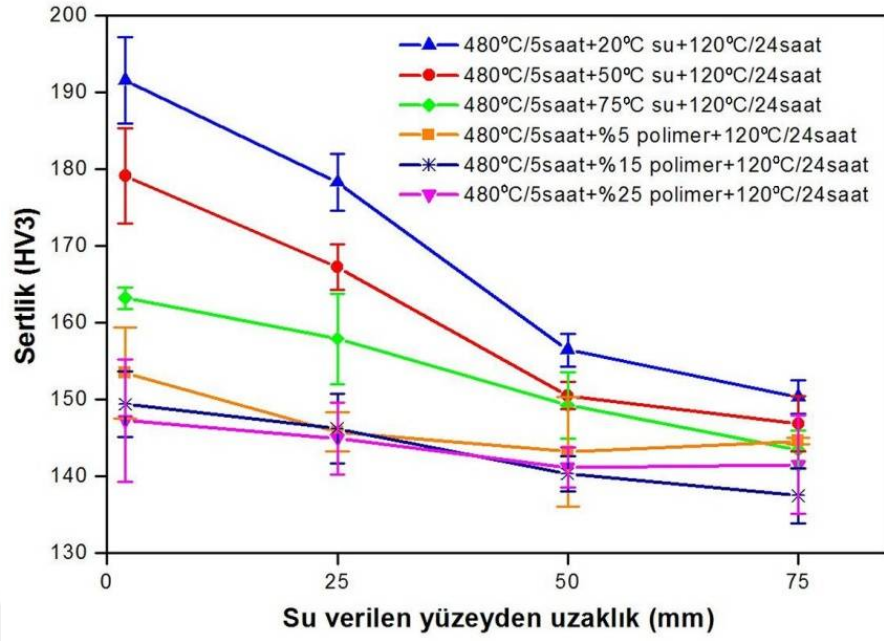


Şekil 5.22. Farklı ortamlarda su verilmiş ve 120 °C’de 24 saat süre ile yaşlandırılmış numunelerin XRD analizleri

5.5. Sertlik İncelemeleri

Şekil 5.23'te farklı soğutma ortamları ile alın su verme işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış numunelerde su verilen yüzeyden uzaklaştıkça numune profilleri boyunca sertlikte meydana gelen değişimler verilmiştir. En yüksek malzeme sertliği ve profil boyunca sertlik farklılığının 20 °C su ile soğutulan numunede elde edildiği görülmüştür. Alın yüzeyine 5 mm mesafede ölçülen sertlik değeri ortalama 191,6 HV iken en uzak mesafe olan 75 mm de 150,33 HV olarak ölçülmüştür. Buna göre numune profili boyunca su verilen yüzeye en yakın ve en uzak nokta arasındaki sertlik farkının 41,27 HV olduğu belirlenmiştir. Bu durum 20 °C su ile soğutulan numunede su verme hassasiyetinin en yüksek değerde olduğunu da göstermektedir. Sertlik değişiminin alın su verme işlemi esnasında profil boyunca gözlemlenen ve ölçülen soğuma hızındaki değişimlere paralellik gösterdiği görülmektedir. Bu alaşımlarda yüksek sertlik değerleri yaşlandırma işlemi sonrası oluşan matrisle uyumlu, ince ve homojen dağılım gösteren MgZn₂ çökeltilerinin oluşumuna ve miktarına bağlıdır [112].

20 °C su ile alın su verilen numunede diğer soğutma ortamları ile kıyaslandığında en yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesi en yüksek soğuma hızının bir sonucu olarak numunenin en düşük tane boyutu, yüksek boşyer konsantrasyonuna bağlı olarak yaşlandırma sonrası daha fazla miktarda küçük boyutlu çökeltilere sahip olmasından kaynaklanmaktadır [113]. Su sıcaklığı ve polimer konsantrasyonu arttıkça soğuma hızındaki azalma, tane yapısı ve çökelti boyutundaki değişimlere bağlı olarak malzeme sertliğinin de düştüğü ancak profil boyunca sertlik değişiminin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. %25'lik konsantrasyonda polimer çözeltisi ile alın su verilen numunede malzeme profili boyunca sertlik değişiminin arzu edilen şekilde en az indirildiği görülmüştür. Alın yüzeyine 5 mm mesafede ölçülen sertlik değeri ortalama 147,27 HV iken en uzak mesafe olan 75 mm de 141,53 HV olarak ölçülmüştür. Buna göre numune profili boyunca su verilen yüzeye en yakın ve en uzak nokta arasındaki sertlik farkının 5,84 HV olduğu belirlenmiştir. Bu sertlik değerlerinin AA7075 alaşımının endüstriyel kullanım sertliğine uygun değerlerde olduğu görülmüştür.

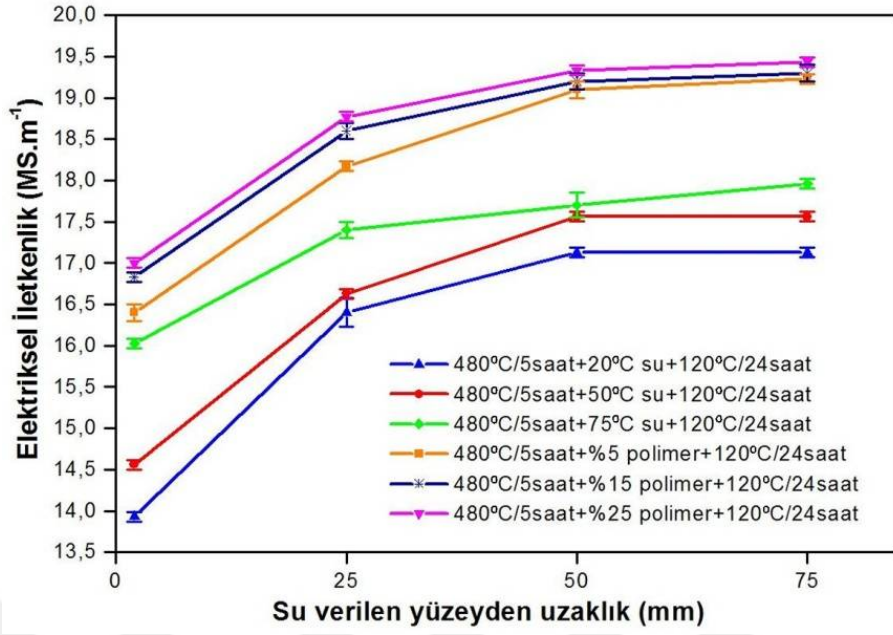


Şekil 5.23. Alın su verme işlemi uygulanmış numunelerde yaşlandırılmış konumda profil boyunca sertlik değişimi

5.6. Elektriksel İletkenlik İncelemeleri

Alın su verme işlemi uygulanmış numunelerde soğutma ortamına bağlı olarak soğuma hızının malzemenin elektriksel iletkenlik özelliklerine etkisi Şekil 5.24'te verilmiştir. Soğutma ortamının elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir. Çöktülerin kabalaşması ve tane boyutunun artması elektriksel iletkenliği de artırır. Homojen dağılımlı ve küçük boyutlu çöktüler elektron hareketini engellemede daha etkilidir [90,114].

Şekil 5.24'te verilen numune profili boyunca elektriksel iletkenlik değişimleri incelendiğinde soğutma su sıcaklığı, polimer çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça ve su verilen yüzeyden uzaklaştıkça elektriksel iletkenliğin artan tane boyutu ve çökelti kabalaşmasına bağlı olarak beklenildiği şekilde arttığı görülmektedir. Ayrıca soğutma ortamının sıcaklığı ve polimer konsantrasyonu arttıkça numune profili boyunca su verilen yüzeye en yakın ve en uzak bölgeler arasında elektriksel iletkenlik özelliklerindeki değişimin sertlikte de olduğu gibi daha az miktarda olduğu görülmüştür.



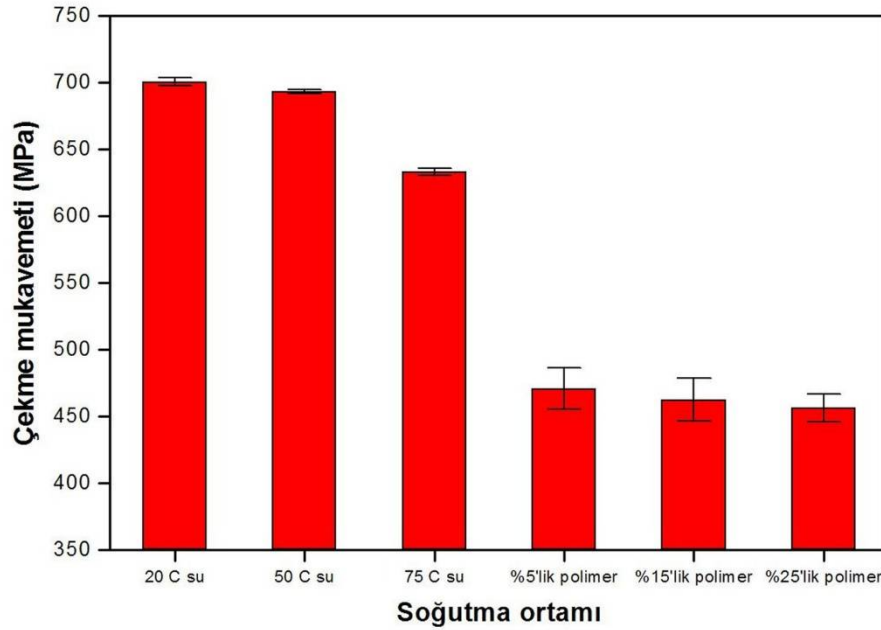
Şekil 5.24. Alın su verme işlemi uygulanmış numunelerde yaşlandırılmış konumda profil boyunca elektriksel iletkenlik değişimi

Elektriksel iletkenlik aynı zamanda su verme sonrası katı çözeltinin aşırı doygunluğunu ve boşyer konsantrasyonunu da yansıtır [78,109]. Soğuma hızı azaldıkça katı çözeltinin doygunluğu ve içerdiği boşyer konsantrasyonu azalır [109]. Buna göre elektrik iletkenliğindeki değişimler literatürdekine [109] benzer şekilde malzeme profili boyunca alın su verme işlemi esnasında meydana gelen soğuma hızı değişimine bağlı olarak oluşabilecek boş yer konsantrasyonundaki değişim ile de ilişkilendirilebilir.

5.7. Mekanik Test İncelemeleri

Su verme hızı malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yetersiz su verme hızı yaşlandırma sonrasında sertlik ve mekanik özelliklerde düşüşe neden olur. Çok yüksek su verme hızlarında ise yaşlandırma sonrası yüksek sertlik ve mekanik özellikler elde edilirken yüksek kalıntı gerilme nedeniyle parçaların boyutsal hassasiyetini koruyamayarak distorsiyona uğraması gibi durumlar ile karşı karşıya kalınabilmektedir. Bu nedenle maksimum mekanik özellik minimum kalıntı gerilme oluşumunu sağlayan ısıl işlem parametrelerinin sağlanması oldukça önemlidir [72,115].

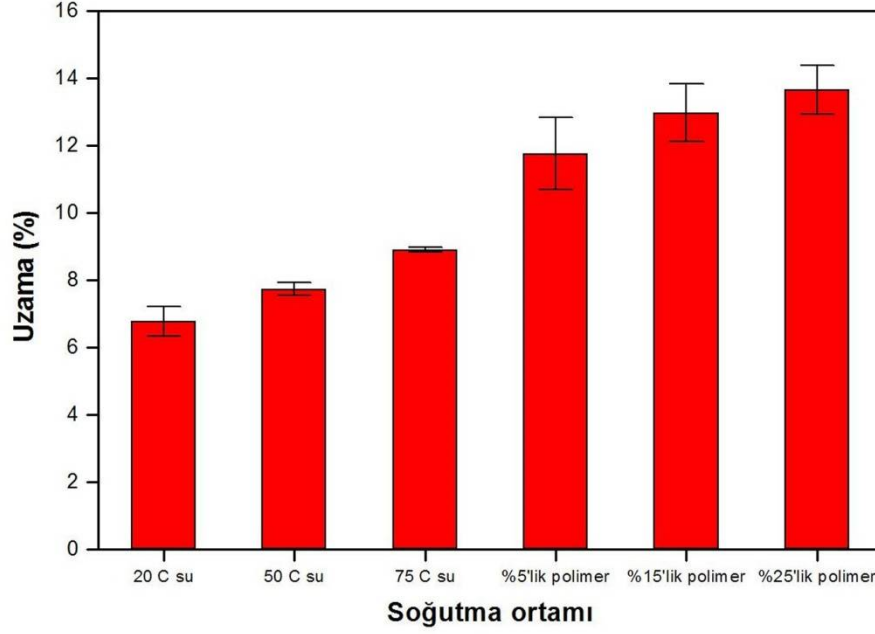
Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da çözeltiye alma işlemi sonrası farklı su verme ortamlarında soğutulan numunelerin yaşlandırma işlemi sonrası mekanik özellikleri verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda su ile soğutulan numuneler karşılaştırıldığında su sıcaklığı arttıkça soğuma hızındaki azalmaya bağlı olarak beklenildiği gibi çekme ve akma mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Malzemenin mukavemet ve sertliğindeki değişimler mikroyapı özellikleri ile doğrudan ilişkilendirilebilir. İnce taneli yapı, homojen dağılımlı ve küçük boyutlu çökelti deformasyon sırasında dislokasyonların hareketliliğini engelleyerek malzemenin akma, çekme dayanımı ve sertlik özelliklerinin artmasını sağlar [112,116]. Soğuma hızı düştükçe daha düşük sertlik katkısı veren kaba ve denge durumundaki η çökeltilerinin oluşumunun artması, boşyer konsantrasyonunun azalması, tane kabalaşması gibi oluşumlar malzemenin çekme ve akma mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır [113].



Şekil 5.25. Çözeltiye alma sonrası soğutma ortamının malzemenin çekme mukavemetine etkisi

Mekanik test incelemelerinde polimer çözeltileri ile soğutulan numunelerde mukavemet değerlerinde belirgin bir düşüş olmasına rağmen elde edilen değerlerin 7075 alaşımının endüstriyel kullanım koşullarına uygun değerlerde olduğu görülmüştür. Şekil 5.26’da soğuma hızı azaldıkça beklenildiği gibi numunelerin % uzama değerlerinin arttığı görülmüştür. Şekil 5.23’te verilen

soğutma ortamına bağlı olarak malzeme sertliğindeki değişim ile çekme mukavemeti sonuçlarının uyumluluk gösterdiği görülmektedir.



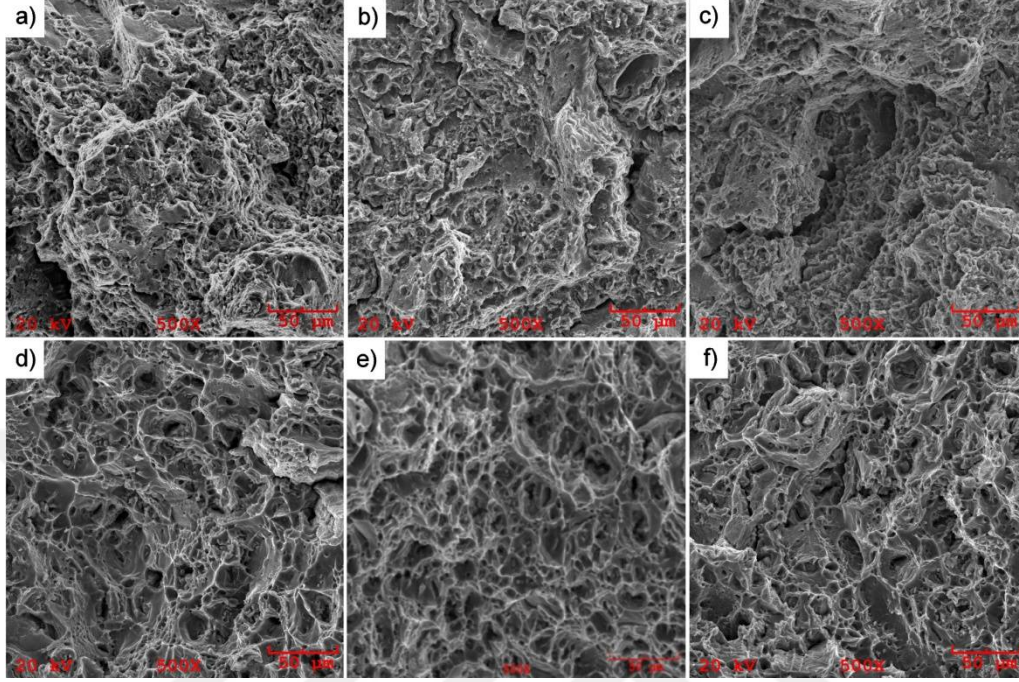
Şekil 5.26. Numunelerde soğutma ortamına bağlı olarak %-uzamanın değişimi

5.8. Kırılma Yüzey İncelemeleri

Isıl işlem sonrası malzemenin içerdiği çökeltilerin boyutları ve dağılımı, tane yapısı, tane sınırlarındaki çökeltiler bölgesinin (PFZ) genişliği kırılma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kaba tane ve yüksek çökeltiler bölgesi genişliği gerilme altında taneler arası kırılmaya neden olmaktadır [117-119].

Şekil 5.27'de çözeltiye alma işlemi sonrası farklı ortamlarda soğutulmuş 120 °C'de 24 saat süre ile yaşlandırılmış konumdaki numunelerin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Kırılma yüzey incelemelerinde ağırlık olarak çekme testi esnasında tek eksenli gerilme altında mikroyapıda bulunan çökeltiler ve tane sınırları etrafında mikro boşlukların oluşarak büyümesi sonucu oluşan sünek kırılma morfolojisinin gözlemlendiği görülmüştür. Mikroyapı incelemelerinde gözlemlenen kaba boyutlu intermetaliklerin sert ve kırılman bir yapıya sahip olmaları nedeni ile gerilme altında deformasyona uğramadan gevrek bir kırılma davranışı sergileyerek

kırılma yüzeyinde düşük miktarda fasetli bölgelerin de oluşmasına neden oldukları görülmüştür.



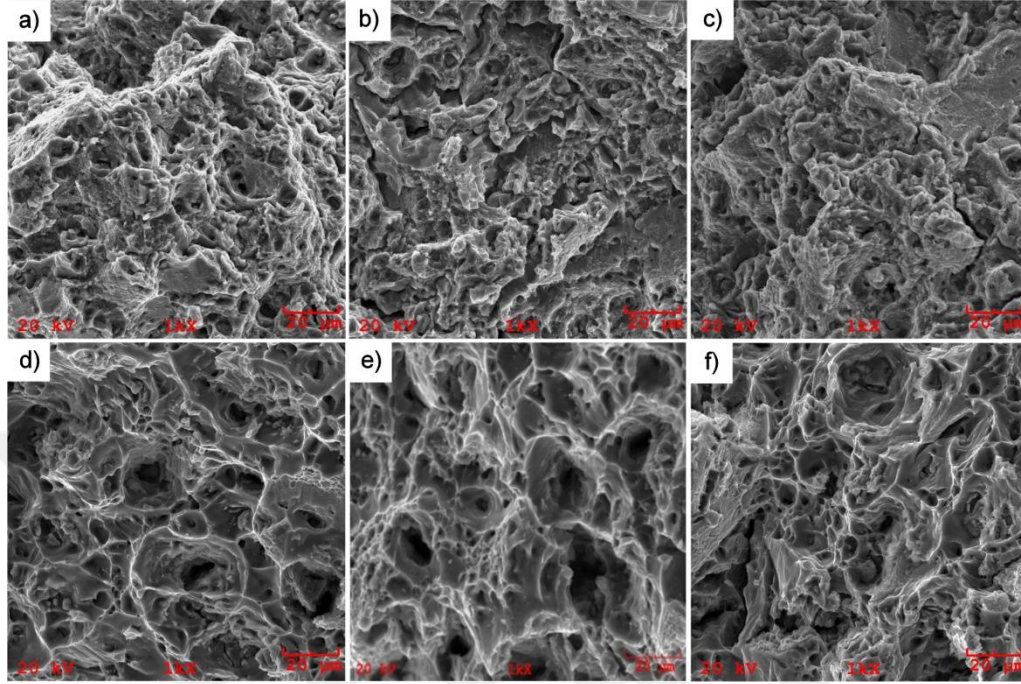
Şekil 5.27. Çözeltiye alma işlemi sonrası farklı ortamlarda soğutulmuş numunelerin yaşlandırılmış konumdaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) %15'lik polimer çözeltisi, f) % 25'lik polimer çözeltisi

Şekil 5.28'de verilen kırılma yüzeyi SEM görüntülerinde farklı sıcaklıklarda su ile soğutulan numunelere göre daha büyük tane boyutu ve daha yüksek % uzama özelliklerine sahip farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltileri ile soğutulan numunelerde beklenildiği gibi sünek kırılma morfolojisini yansıtan çukurcukların daha kaba ve daha derin bir yapıya sahip oldukları görülmektedir.

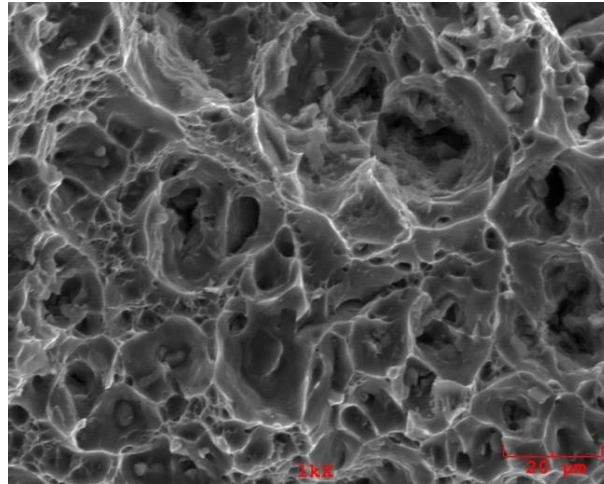
Şekil 5.29'da sünek kırılma yüzeyinde çukurcuklar içerisine yerleşmiş bulunan farklı morfolojilerdeki çökeltilerin SEM görüntüsü verilmiştir. Matrise göre daha sert ve kırılğan yapıdaki bu kaba intermetaliklerin gerilme altında şekil değiştiremeyerek yer yer kırılmış oldukları da görülmektedir.

Şekil 5.30'da verilen kırılma yüzeyi SEM görüntüsü ve EDX analizlerinde kırık yüzey incelemelerinde peteksi yapının içerisine yerleştiği gözlemlenen partiküllerin kırılma morfolojisi üzerinde önemli etkiye sahip Cu ve Fe içeren

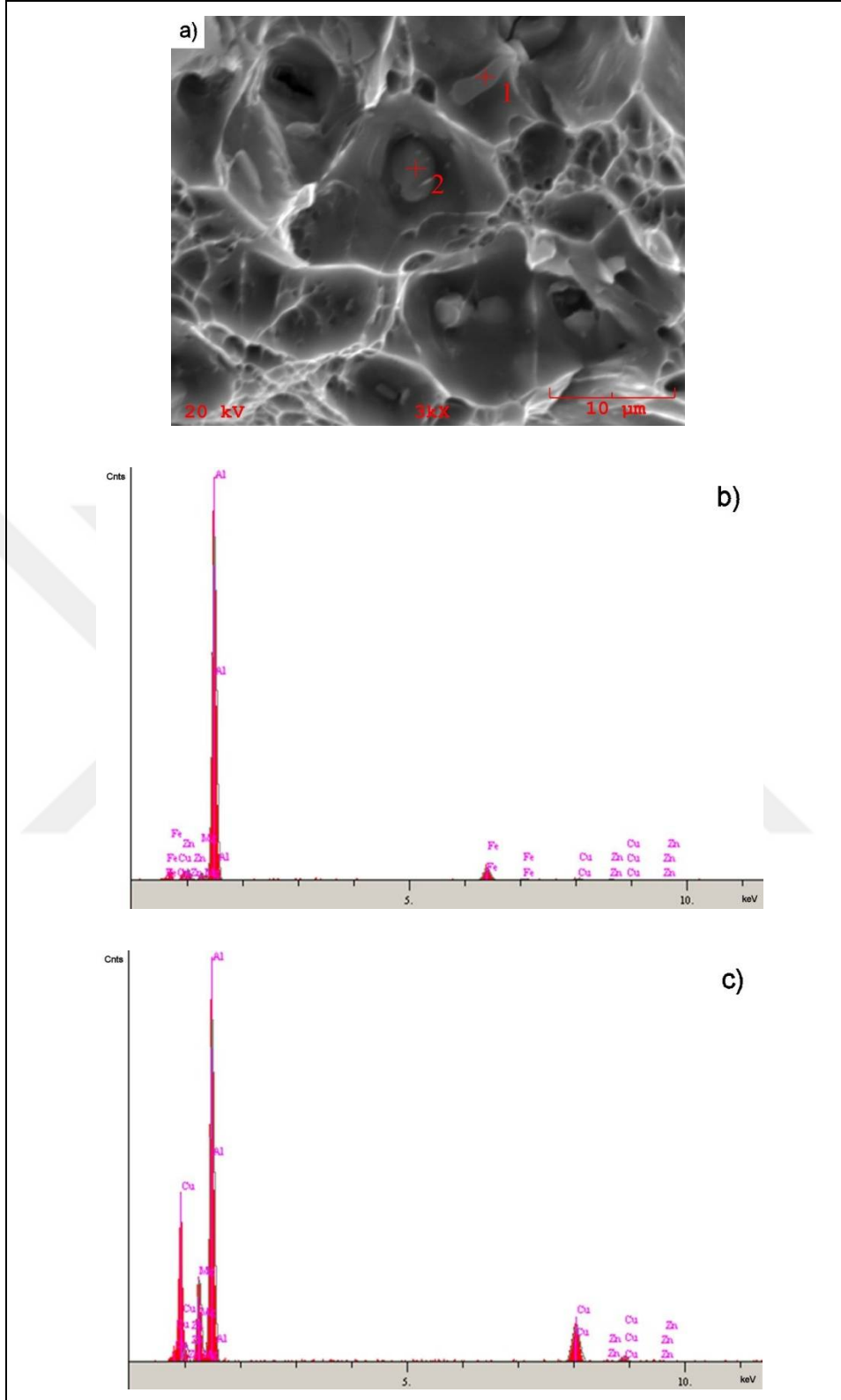
kaba çökeltiler oldukları belirlenmiştir. Bu kaba çökeltilerin boyutuna bağlı olarak etrafındaki peteksi yapının da daha kaba olduğu görülmektedir .



Şekil 5.28. Çözeltiye alma işlemi sonrası farklı ortamlarda soğutulmuş numunelerin yaşlandırılmış konumdaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri a) 20 °C su, b) 50 °C su, c) 75 °C su, d) %5'lik polimer çözeltisi, e) % 15'lik polimer çözeltisi, f) % 25'lik polimer çözeltisi



Şekil 5.29. Sünek kırılma yüzeyinde çukurcuklar içerisine yerleşmiş bulunan farklı morfolojilerdeki çökeltilerin SEM görüntüsü



Şekil 5.30. Kırılma yüzeyinde peteksi yapının içerisine yerleşmiş partiküllerin a) SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDX analizi, c) 2 nolu noktanın EDX analizi

5.9. Kalıntı Gerilme İncelemeleri

Çözeltiyeye alma işlemi sonrası su verme hızı kalıntı gerilme oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek soğuma hızlarında parça geometrisi boyunca homojen olmayan sıcaklık değişimleri kalıntı gerilme oluşumuna yol açar. Bu durum parçanın soğuma işlemi sonrasında plastik deformasyona uğramasına sebep olur [72,120].

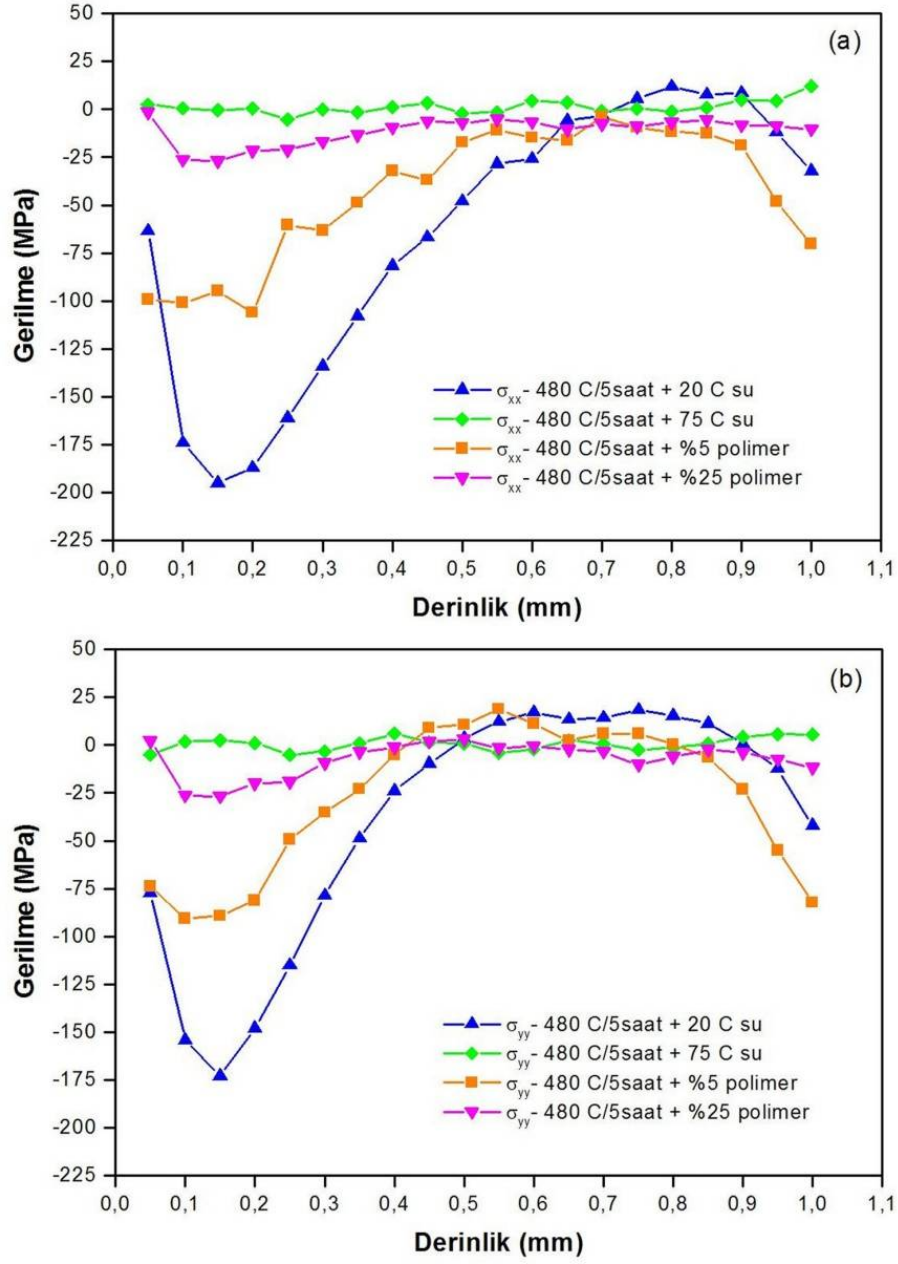
Şekil 5.31'de 480 °C 5 saat süre ile çözeltiyeye alma işlemi sonrası 20 °C su, 75 °C su, %5'lik ve %25'lik polimer çözeltileri ile soğutulan numunelerde soğuma hızına bağlı olarak oluşan, -x ve -y eksenleri boyunca yüzeyden merkeze doğru kalıntı gerilme dağılımları verilmiştir.

Su verilen numunelerde kalıntı gerilme dağılımlarının yüzeyde basma gerilmeleri merkezde ise çekme kalıntı gerilmeleri şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durum en yüksek kalıntı gerilme oluşumunun gözlemlendiği 20 °C su ile soğutulan numunede talaşlı imalat yöntemi ile delik delme işlemi sonrası dairesel kesitli bir deliğin kalıntı gerilmenin etkisi ile boyutsal hassasiyetini koruyamayarak elips şeklini alabileceğini göstermektedir.

Soğutma suyunun sıcaklığı ve polimer çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça soğuma hızının azalması ile birlikte kalıntı gerilme oluşumunun da belirgin bir şekilde azaldığı açıkça görülmektedir.

En yüksek kalıntı gerilme oluşumunun gözlemlendiği 20 °C su ile soğutulan numune ile kıyaslandığında 70 °C su ile soğutulan numunede ölçülen basma kalıntı gerilmesinin yaklaşık olarak %90, %5'lik polimer çözeltisi ile soğutulan numunede %50 ve %25'lik polimer çözeltisi ile soğutulan numunede ise %87,5 oranında azaldığı belirlenmiştir.

İncelenen farklı soğutma koşullarında numunelerdeki gerilme dağılımının -x ve -y yönünde birbirine paralellik gösterdiği de görülmüştür.



Şekil 5.31. Kalıntı gerilme oluşumuna soğuma hızının etkisi a) -x yönünde b) -y yönünde

5.10. Endüstriyel Uygulama

Savunma sanayisinde kullanılan 7XXX serisi ekstrüze alüminyum alaşımlarının üretiminde ısıl işlem sonrası Şekil 5.33'te gösterildiği gibi talaşlı imalat yöntemleri ile farklı geometrik şekillerde delikler açılmaktadır. Ancak üretim şartlarında çözeltiye alma sonrası geleneksel olarak oda sıcaklığında su ile soğutulan bu alaşımlarda su verme hassasiyeti nedeniyle oluşan kalıntı gerilme probleminden kaynaklı olarak profil üzerindeki işlenen kısımlar

boyutsal hassasiyetini koruyamayarak ölçü toleranslarında sapmaların meydana geldiği görülmüştür.

Deneysel çalışma sonrası elde edilen sonuçlar doğrultusunda Onat Alüminyum firmasında savunma sanayisinde kullanılan ekstrüze 7XXX serisi alüminyum alaşımı profillerde endüstriyel uygulama koşulları göz önünde bulundurularak %25'lik polimer çözeltisi ile su verme denemeleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.32. Ekstrüze 7XXX serisi alüminyum alaşımları



Şekil 5.33. Talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmiş alüminyum profil

Şekil 5.32'de verilen ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş içi boş alüminyum profiller 25 cm uzunluğunda dilimlendikten sonra Şekil 5.34'te gösterildiği gibi

dik konumda fırın sepetine yerleştirilmiştir. Profiller fırın rejimi göz önünde bulundurularak uygulanan 475 °C’de çözeltiye alma ısıl işlemi sonrasında vinç yardımıyla Şekil 5.36’da gösterildiği gibi %25’lik konsantrasyondaki polimer çözeltilisine daldırılarak 10 dakika süre ile soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.34. Isıl işlem için hazırlanmış ekstrüze profiller



Şekil 5.35. Çözeltiye alma ısıl işlemi



Şekil 5.36. Polimer çözeltisi ile su verme işlemi

Su verme işlemi tamamlandıktan sonra yüzeylerin temizlenmesi amacıyla profiller Şekil 5.37’de verildiği gibi oda sıcaklığındaki su banyosuna alınarak temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.37. Su verme işlemi sonrası temizleme aşaması

Su verme işlemi sonrası profillere alaşımdan beklenen sertlik ve mukavemet özelliklerini kazandırmak amacıyla 120 °C’de 24 saat süre ile yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemi sonrası malzeme sertliği ortalama

147,8 HV olarak ölçülmüştür. Malzeme sertliğinin bu alaşımdan beklenen minimum sertlik değeri olan 130 HV'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Çekme testleri sonrası alaşımın akma mukavemetinin ortalama 422 MPa, çekme mukavemetinin ortalama 476 MPa ve %-uzama değerinin % 11,5 olduğu görülmüştür. Elde edilen mekanik test sonuçlarının deneysel veriler ile uyumluluk içinde olduğu belirlenmiştir. Isıl işlem sonrası profiller Şekil 5.33'te verildiği gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmiştir. Polimer ile soğutulan profillerde işlenen kısımlarda oda sıcaklığında su ile soğutulan parçalarda olduğu gibi ölçü toleranslarının dışına çıkan sapmaların meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda günümüzde Onat Alüminyum bünyesinde gerçekleştirilen savunma sanayisine yönelik üretilen 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının ısıl işleminde su yerine %25'lik konsantrasyonda polimer çözeltisi kullanılmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında AA7075 alüminyum alaşımları için endüstride önemli bir sorun olan “su verme hassasiyeti” probleminin bir sonucu olarak ortaya çıkan malzeme kesiti boyunca meydana gelen soğuma hızı, mikroyapı özellikleri, sertlik ve iletkenlik özelliklerindeki değişimler Jominy alın su verme test yöntemi kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemi sonrasında çözeltiye alma işlemi sonrasında genellikle oda sıcaklığında su ile soğutma işlemi uygulanmaktadır. Günümüzde endüstriyel uygulamalarda alüminyum alaşımının ısıtma işlemi sonrasında polimer çözeltisi kullanımının olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada farklı sıcaklıklara su ve farklı konsantrasyonlarda polimer çözeltileri kullanılarak AA7075 alüminyum alaşımında su verme hassasiyeti problemi nedenli kalıntı gerilme oluşumunu ortadan kaldıracak uygun mekanik özellikleri de sağlayan su verme koşullarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada genellikle çelik malzemelerin sertleşebilirlik testlerinde kullanılan Jominy yöntemi alüminyum alaşımlarının su verme hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla kullanılarak farklı soğutma ortamlarının alaşımın su verme hassasiyetine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Su verme işlemi esnasındaki sıcaklık ölçümleri ve yapılan modelleme çalışmaları ile su verilen uçtan uzaklaştıkça, soğutma su sıcaklığı ve polimer çözeltisi konsantrasyonu arttıkça soğuma hızının azaldığı belirlenmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde su verme ortamının alaşımın tane yapısı ve çökelti karakteristiği üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Soğuma hızı azaldıkça çökeltilerin tane sınırlarından ziyade tane içerisinde de oluşum gösterdiği, morfolojilerinin değiştiği ve daha kaba yapıya sahip oldukları görülmüştür.

20 °C, 50 °C, 75 °C su ve hacimce %5, %15, %25'lik konsantrasyonlardaki soğutma ortamları kullanılarak alın su verilen numunelerde profil boyunca ölçülen sertlik değişimleri ile soğuma hızlarındaki değişimler arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Su sıcaklığı ve polimer konsantrasyonu arttıkça soğuma hızındaki azalmaya bağlı olarak profil boyunca sertlik değişiminin belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Profil boyunca en az sertlik değişimi %25'lik konsantrasyondaki polimer çözeltisi ile elde edilmiştir.

Farklı soğutma ortamlarında alın su verilen numunelerde soğuma hızı azaldıkça elektriksel iletkenliğin arttığı görülmüştür. Ayrıca soğutma su sıcaklığı ve polimer konsantrasyonunun artması ile birlikte alın su verilen uçtan uzaklaştıkça profil boyunca iletkenlikteki değişimin azaldığı belirlenmiştir. Bu farklılığın su verme hızı azaldıkça malzemede soğuma hızındaki değişime bağlı olarak meydana gelen boşyer konsantrasyonu, çökeltilerin dağılımı, boyutları ve tane yapısındaki değişimden kaynaklandığı görülmüştür.

Soğuma hızı azaldıkça tane yapısı ve çökelti morfolojisindeki değişim ve kabalaşma nedeniyle alaşımın mukavemetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak elde edilen mukavemet değerlerinin AA7075 alaşımının endüstriyel kullanım özelliklerinin altına düşmediği görülmüştür.

Soğutma su sıcaklığının ve polimer çözeltisi konsantrasyonunun artması ile kalıntı gerilme oluşumunun endüstride geleneksel olarak oda sıcaklığında su ile soğutulan alaşımlara göre yaklaşık %90 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Deneysel sonuçlar AA7075 alüminyum alaşımının ısı işleminde çözeltiye alma sonrası 75 °C su veya %25'lik konsantrasyonda polimer çözeltisi ile soğutulması ile mekanik özellik açısından alaşımın endüstriyel kullanım koşullarının altına düşmeden su verme hassasiyeti nedeni oluşan kalıntı gerilme probleminin ortadan kaldırılabilceğini göstermiştir.

Çalışma kapsamında 75 °C su veya %25'lik polimer çözeltisi kullanılması ile kalın kesitli parçalarda su verme hassasiyetinin önemli derecede azaltılarak parçanın yüzeyi ve merkezi arasında malzeme özelliklerindeki değişimin minimize edilmesi sonucu daha homojen yapı ve özelliklere sahip parçaların

üretilebilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Ancak endüstriyel üretim koşulları göz önünde bulundurulduğunda 75 °C su ile soğutma işleminin seri üretim için sıcaklık kontrolünün sağlanması ve sürekliliği açısından çok uygun olmadığı görülmüştür. Bu nedenle polimer çözeltisi ile çalışmanın endüstriyel açıdan daha elverişli olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen deneysel çalışmalar doğrultusunda yapılan saha denemeleri ile de %25'lik polimer çözeltisi ile su verme işleminin AA7075 alüminyum alaşımları için yeterli sertlik özelliklerinin elde edilmesi ve kalıntı gerilme probleminin giderilmesi açısından uygun olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar doğrultusunda savunma sanayisinde kullanılan ekstrüzyon ile üretilmiş AA7075 serisi milli ve yerli üretim parçaların ısıtma işleminde çözeltiye alma sonrası polimer çözeltisi ile soğutma yapılarak yaşlandırılmış konumda istenilen mekanik özellikler ve boyutsal hassasiyetini koruyan minimum kalıntı gerilmeye sahip ürünler üretilmeye başlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Stojanovic B., Bukvic M., Epler I., Application of Aluminum and Aluminum Alloys in Engineering, *Applied Engineering Letters*, 2018, **3** (2), 52-62.
- [2] Sheasby P. G., Pinner R., *The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys*, 6th ed., ASM International, USA, 1-10, 2001.
- [3] Cobden R., Banbury A., *Aluminum: Physical Properties, Characteristics and Alloys, Training in Aluminum Application Technologies*, TALAT Lecture 1501, 1-60, 1994.
- [4] Cayless R. B. C., *Alloy and Temper Destination Systems for Aluminum and Aluminum Alloys*, Editors: Zwilsky K. M., Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Handbook, Volume 2, ASM International, Ohio, USA, 39-117, 1990.
- [5] Hind A. R., Bhargava S. K., Grocott S. C., The Surface Chemistry of Bayer Process Solids: a Review, *Colloids Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, **146**, 359-374.
- [6] Sverdin A., *Introduction to Aluminum*, Editors: Totten G. E., Mackenzie D. S., Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Process, Marcel Dekker INC, USA, 1-30, 2003.
- [7] Hirsch J., Aluminum Alloys for Automotive Application, *Materials Science Forum*, 1997, **242**, 33-50.
- [8] Starke E. A., Staley J. T., Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft, *Progress in Aerospace Science*, 1996, **32**, 131-172.
- [9] Doksanovic T., Dzeba I., Markulak D., Applications of Aluminum Alloys in Civil Engineering, *Technical Gazette*, 2017, **24** (5), 1609-1618.
- [10] Ertuğ B., Kumruoğlu L. C., Alüminyum Alaşımlarının Otomotiv Endüstrisinde Uygulama Alanları, *Metal Dünyası*, 2015.
- [11] Rambabu P., Prasad N. E., Kutumbarao V. V., Wanhill R. J. H., *Aluminum Alloys for Aerospace Applications*, Editors: Parasad E. N. Wanhill R. J. H., Aerospace Materials and Materials Technologies, Springer, Indian, 29-52, 2017.
- [12] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, Light Metals and Alloys, ASM International, USA, 351-416, 2001.

- [13] [http://www.everyspec.com/Aluminum and Aluminum Alloys.pdf](http://www.everyspec.com/Aluminum_and_Aluminum_Alloys.pdf) (Ziyaret Tarihi : 22 Nisan 2019).
- [14] [http://european-aluminum.eu/media/1343/internationalalloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys.pdf](http://european-aluminum.eu/media/1343/internationalalloy_designations_and_chemical_composition_limits_for_wrought_aluminum_and_wrought_aluminum_alloys.pdf) (Ziyaret Tarihi : 25 Nisan 2019).
- [15] Ng C. H., Yahaya S. N. M., Majid A. A. A, Reviews on Aluminum Alloy Series and Its Applications, *Academia Journal of Scientific Research*, 2017, **5** (12), 708-716.
- [16] Zheng K., Politis D. J., Wang L., Lin J., A Review on Forming Techniques for Manufacturing Lightweight Complex-Shaped Aluminum Panel Components, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, **1**, 55-80.
- [17] Tang J., Chen H., Zhang X., Liu S., Liu W., Ouyang H., Li H., Influence of Quench Induced Precipitation on Aging Behavior of Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, 1255-1263.
- [18] Marlaud T., Malki B., Henon C., Deschamps A., Baroux B., Relationship Between Alloy Composition, Microstructure and Exfoliation Corrosion in Al-Zn-Mg-Cu Alloys, *Corrosion Science*, 2011, **53**, 3139-3149.
- [19] Sun Z. C., Zheng L. S., Yang H., Softening Mechanism and Microstructure Evolution of As-Extruded 7075 Aluminum Alloy During Hot Deformation, *Materials Characterization*, 2014, **90**, 71-80.
- [20] Shi D., Kang K., Gao G., Effect of Quenching Parameters on the Mechanical Properties of the 7A04 Aluminum Alloy, *Materials and Technology*, 2017, **51** (1), 95-99.
- [21] Zhang Z. H., Xiong B. Q., Liu S. F., Zhu B. H., Zuo T. T., Changes of Microstructure of Different Quench Sensitivity 7000 Aluminum Alloy After End Quenching, *Rare Metals*, 2014, **33**(3), 270-275.
- [22] Staring M. J. Milkereit B., Zhang Y., Rometsch P. A., Predicting the Quench Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu Alloys: A Model for Linear Cooling and Strengthening, *Materials and Design*, 2015, **88**, 958-971.
- [23] Shu W. X., Hou L. G., Zhang C., Zhang F., Liu J. C., Liu J. T., Zhuang L. Z., Zhang J. S., Tailored Mg and Cu Contents Affecting the Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloys, *Materials Science & Engineering A*, 2016, **657**, 269-283.
- [24] Kolb G. K. H., Antrekowitsch H., Pöshmann D., Uggowitzer P. J., Pogatscher S., *Effect of Interrupted Quenching on Al-Zn-Mg-Cu Alloys*, Editors: Ratvik A.P., Light Metals, USA, 385-389, 2017.

- [25] Mukhopadhyay A. K., Gunier-Preston Zones in a High Purity Al-Zn-Mg Alloy, *Philosophical Magazine Letters*, 1994, **70** (3), 135-140.
- [26] Peng X., Guo Qi, Liang X., Deng Y., Gu Y., Xy G., Yin Z., Mechanical Properties, Corrosion Behavior and Microstructures of a Non-Isothermal Ageing Treated Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2017, **688**, 146-154.
- [27] Hou X., Bai P., Evaluation of Strain Fields Caused by the η Phase in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2017, **683**, 90-93.
- [28] Jiang F., Zurob H. S., Purdy G. R., Zhang H., Characterizing Precipitate Evolution of an Al-Zn-Mg-Cu Based Commercial Alloy During Artificial Aging and Non-Isothermal Heat Treatments by in Situ Electrical Resistivity Monitoring, *Materials Characterization*, 2016, **117**, 47-56.
- [29] Gou W., Guo J., Wang J., Yang M., Li H., Wen X., Zhang J., Evolution Precipitate Microstructure During Stress Aging of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2015, **634**, 167-175.
- [30] Li H., Cao F., Guo S., Jia Y., Zhang D., Liu Z., Wang P., Scudino S., Sun J., Effects of Mg and Cu on Microstructures and Properties of Spray-Deposited Al-Zn-Mg-Cu Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **719**, 89-96.
- [31] Starink M. J., Li X. M., A Model for the Electrical Conductivity of Peak-Aged and Overaged Al-Zn-Mg-Cu Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, **34 A**, 899-911.
- [32] Li X. M., Starink M. J., The Effect of Compositional Variations on the Characteristics of Coarse Intermetallic Particles in Overaged 7xxx Al Alloys, *Materials Science and Technology*, 2001, **17**, 1324-1328.
- [33] Godard D., Archambault P., Gautier E. A., Lapasset G., Precipitation Sequences During Quenching of the AA 7010 Alloy, *Acta Materialia*, 2002, **50**, 2319-2329.
- [34] Priya P., Johnson D. R., Krane M., J. M., Precipitation During Cooling of 7XXX Aluminum Alloys, *Computational Materials Science*, 2017, **139**, 273-284.
- [35] Liu S., Zhong Q., Zhang Y., Liu W., Zhang X., Deng Y., Investigation of Quench Sensitivity of High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloys by Time-Temperature-Properties Diagrams, *Materials and Design*, 2010, **31**, 3116-3120.
- [36] Milkereit B., Kessler O., Schick C., Recording of Continuous Cooling Precipitation Diagrams of Aluminum Alloys, *Thermochimica Acta*, 2009, **492**, 73-78.

- [37] Zhang Y., Milkereit B., Kessler O., Schick C., Rometsch P. A., Development of Continuous Cooling Precipitation Diagrams for Aluminum Alloys AA7150 and AA7020, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, **584**, 581-589.
- [38] Başer T. A., Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendislik ve Makina*, 2012, **53** (635), 51-58.
- [39] Priya P., Johnson D. R., Krane J. M., Modelling Phase Transformation Kinetics During Homogenization of Aluminum Alloy 7050, *Computational Materials Science*, 2017, **138**, 277-287.
- [40] Deng Y., Yin Z., Cong F., Intermetallic Phase Evolution of 7050 Aluminum Alloy During Homogenization, *Intermetallics*, 2012, **26**, 114-121.
- [41] Rometsch P. A., Zhang Y., Knight S., Heat Treatment of 7xxx Series Aluminum Alloys-Some Recent Developments, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, **24**, 2003-2017.
- [42] Fan X., Jiang D., Meng Q., Zhang B., Wang T., Evolution of Eutectic Structures in Al-Zn-Mg-Cu Alloys During Heat Treatment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, **16**, 577-581.
- [43] [http://www.intechopen.com/Microstructural Evolution During the Homogenization of Al-Zn-Mg Aluminum Alloys.pdf](http://www.intechopen.com/Microstructural_Evolution_During_the_Homogenization_of_Al-Zn-Mg_Aluminum_Alloys.pdf) (Ziyaret Tarihi : 8 Mayıs 2019)
- [44] Han N. M., Zhang X. M., Liu S. D., He D. G., Zhang R., Effect of Solution Treatment on the Strength and Fracture Toughness of Aluminum Alloy 7050, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**, 4138-4145.
- [45] Hatch J. E. *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, Editors: Hatch J. E., ASM International, 134-199, 1984.
- [46] İbrahim M. F., Samuel A. M., Samuel F. H., A Preliminary Study on Optimizing the Heat Treatment of High Strength Al-Cu-Mg-Zn Alloys, *Materials and Design*, 2014, **57**, 342-350.
- [47] Brooks C. R., *Heat Treating of Aluminum Alloys*, Editors: Copley S. M., Heat Treatment, ASM Handbook, Volume 4, Ohio, USA, 1861-1960,1991.
- [48] Sjölander E., Seifeddine S., The Heat Treatment of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**, 1249-1259.

- [49] Li H., Liu J., Yu W., Zhao H., Li D., Microstructure Evolution of Al-Zn-Mg-Cu Alloy During Non-Linear Cooling Process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **26**, 1191-1200.
- [50] Zhang Y., Yang S., Ji H., Microstructure Evolution in Cooling Process of Al-Zn-Mg-Cu Alloy and Kinetics Description, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, 2087-2091.
- [51] Chaudhury S. K., Apelian D., Effects of Mg and Cu Content on Quench Sensitivity of Al-Si-Mg Alloy, *International Journal of Metalcasting*, 2016, **10**(2), 138-146.
- [52] Liu S. D., Zhang X. M., Chen M. A., You J. H., Influence of Aging on Quench Sensitivity Effect of 7055 Aluminum Alloy, *Materials Characterization*, 2008, **59**, 53-60.
- [53] Hall D. D., Mudawar I., Optimization of Quench History of Aluminum Parts for Superior Mechanical Properties, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, **39** (1), 81-95.
- [54] Robinson J. S., Cudd R. L., Tanner D. A., Dolan G. P., Quench Sensitivity and Tensile Property Inhomogeneity in 7010 Forgings, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **119**, 261-267.
- [55] Robinson J. S., Tanner D. A., Petegem S., Evans A., Influence of Quenching and Aging on Residual Stress in Al-Zn-Mg-Cu Alloy 7449, *Materials Science and Technology*, 2012, **28**(4), 420-430.
- [56] Tiryakioğlu M., Quench Sensitivity of Aluminum Alloys, *Conference of Quenching and Distortion Control Technology*, Mart 1999, Illinois.
- [57] Westermann I., Haugstad A. L., Langsrud Y., Marthinsen K., Effect of Quenching Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Commercial AA7018 Aluminum Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, 1872-1877.
- [58] Canale L. C. F., Totten G. E., Quenching Technology : A Selected Overview of the Current State of the Art, *Materials Research*, 2005, **8** (4), 461-467.
- [59] Mackenzi D. S., *Quenching of Aluminum Alloys*, Editors : Totten G. E., Mackenzi D. S., Heat Treating of Nonferrous Alloys, ASM Handbook, Volume 4E, Ohio, USA, 145-672, 2016.
- [60] Araghchi A., Mansouri H., Vafaei R., Guo Y., Optimization of the Mechanical Properties and Residual Stresses in 2024 Aluminum Alloy Through Heat Treatment, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, **27**, 3234-3238.

- [61] Senatorova O. G., Mikhailova I. F., Ivanov A. L., Mitasov M. M., Sidelnikov V. V., Low Distortion Quenching of Aluminum Alloys in Polymer Media, *Materials Science and Heat Treatment*, 2016, **57**, 669-672.
- [62] Chobaut N., Carron D., Arsene S., Schloth P., Drezet J. M., Quench Induced Residual Stress Prediction in Heat Treatable 7xxx Aluminium Alloy Thick Plates Using Gleeble Interrupted Quench Tests, *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, **222**, 373-380.
- [63] Zhang J., Deng Y., Yang W., Hu S., Zhang X., Design of the Multi-Stage Quenching Process for 7050 Aluminum Alloy, *Materials and Design*, 2014, **56**, 334-344.
- [64] Zheng Y., Li C., Liu S., Deng Y., Zhang X., Effect of Homogenization Time on Quench Sensitivity of 7085 Aluminum Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, **24**, 2275-2281.
- [65] Zhang Y., Pelliccia D., Milkereit B., Kirby N., Starink M. J., Rometsch P. A., Analysis of Age Hardening Precipitates of Al-Zn-Mg-Cu Alloys in a Wide Range of Quenching Rates Using Small Angle X-Ray Scattering, *Materials and Design*, 2018, **142**, 259-267.
- [66] Robinson J. S., Tanner D. A., Truman C. E., Paradowska A. M., Wimpory R. C., The Influence of Quench Sensitivity on Residual Stresses in the Aluminum Alloys 7010 and 7075, *Materials Characterization*, 2012, **65**, 73-85.
- [67] Li Y., Zhang Y., Li X., Li Z., Wang G., Jin L., Huang S., Xiong B., Quenching Residual Stress Distributions in Aluminum Alloy Plates with Different Dimensions, *Rare Metals*, 2016, **9**, 1-11.
- [68] Dolan G. P., Robinson J. S., Residual Stress Reduction in 7175-T73, 6061-T6 and 2017A-T4 Aluminum Alloys Using Quench Factor Analysis, *Journal Materials Processing Technology*, 2004, **153-154**, 346-351.
- [69] Chen J., Zhen L., Yang S., Shao W., Dai S., Investigation of Precipitation Behavior and Related Hardening in AA7055 Aluminum Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2009, **500**, 34-42.
- [70] Flynn R. J., The Application of Advances in Quench Factor Analysis Property Prediction to the Heat Treatment of 7010 Aluminum Alloy, *Journal Materials Processing Technology*, 2004, **153-154**, 674-680.
- [71] Tanner D. A., Robinson J. S., Effect of Precipitation During Quenching on the Mechanical Properties of the Aluminum Alloy 7010 in the W-Temper, *Journal Materials Processing Technology*, 2004, **153-154**, 998-1004.

- [72] Zhang Y., Yi Y., Huang S., Dong F., Influence of Quenching Cooling Rate on Residual Stress and Tensile Properties of 2A14 Aluminum Alloy Forgings, *Materials Science & Engineering A*, 2016, **674**, 658-665.
- [73] Liu S., Liu W., Zhang Y., Zhang X., Deng Y., Effect of Microstructure on the Quench Sensitivity of AlZnMgCu Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, **507**, 53-61.
- [74] Deschamps A., Brechet Y., Influence of Quench and Heating Rates on the Ageing Response of an Al-Zn-Mg-(Zr) Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 1998, **251**, 200-207.
- [75] Lim S.T., Yun S. J., Nam S. W., Improved Quench Sensitivity in Modified Aluminum Alloy 7175 for Thick Forging Applications, *Materials Science & Engineering A*, 2004, **371**, 82-90.
- [76] Deng Y., Wan L., Zhang Y., Zhang X., Influence of Mg Content on Quench Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**, 4636-4642.
- [77] Nie B., Liu P., Zhou T., Effect of Composition on the Quenching Sensitivity of 7050 and 7085 Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2016, **667**, 106-114.
- [78] Lin L., Liu Z., Bai S., Ying P., Wang X., Effects of Germanium on Quench Sensitivity in Al-Zn-Mg-Zr Alloy, *Materials and Design*, 2015, **86**, 679-685.
- [79] Li C., Han S., Liu S., Deng Y., Zhang X., Grain Structure Effect on Quench Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu-Cr Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **26**, 2276-2282.
- [80] Lin L., Liu Z., Bai S., Zhou Y., Liu W., Lv Q., Effects of Ge and Ag Additions on Quench Sensitivity and Mechanical Properties of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2017, **682**, 640-647.
- [81] Liu S., Zhang X., Chen M., You J., Zhang X., Effect of Zr Content on Quench Sensitivity of AlZnMgCu Alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, **17**, 787-792.
- [82] Ashby M. F., Jones D. R., Engineering Materials 2, *An Introduction to Microstructures, Processing and Design*, 3rd ed., Butterworth Heinemann, Oxford, 108-121, 2006.
- [83] Zuiko I., Kaibyshev R., Aging Behavior of an Al-Cu-Mg Alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **759**, 108-119.
- [84] Fang X., Song M., Li K., Du Y., Precipitation Sequence of an Aged Al-Mg-Si Alloy, *Journal of Mining and Metallurgy*, 2010, **46(2)**, 171-180.

- [85] Ferragut R., Somoza A., Torriani I., Pre-precipitation Study in the 7012 Al-Zn-Mg-Cu Alloy by Electrical Resistivity, *Materials Science & Engineering A*, 2002, **334**, 1-5.
- [86] Ma K., Wen H., Hu Tao, Topping T. D., Isheim D., Seidman D. N., Lavernia E. J., Schoenung J. M., *Acta Materialia*, 2014, **62**, 141-155.
- [87] Yang R., Liu Z., Ying P., Li J., Lin L., Zeng S., Multistage Aging Process Effect on Formation of GP Zones and Mechanical Properties in Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **26**, 1183-1190.
- [88] Callister W. D., *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, Editor: Welter J., John Wiley, 3rd ed., 443-445, 2008.
- [89] Liu G., Zhang G. J., Wang R. H., Hu W., Sun J., Chen K. H., Heat Treatment Modulated Coupling Effect of Multi-Scale Second Phase Particles on the Ductile Fracture of Aged Aluminum Alloys, *Acta Materialia*, 2007, **55**, 273-284.
- [90] Dellah M., Bournane M., Ragab K. A., Sadaoui Y., Sirenko A. F., Early Decomposition of Supersaturated Solid Solutions of Al-Zn-Mg Casting Alloys, *Materials and Design*, 2013, **50**, 606-612.
- [91] Yassar R. S., Field D. P., Weiland H., The Effect of Predeformation on the β'' and β' Precipitates and the Role of Q' Phase in an Al-Mg-Si Alloy, *Scripta Materialia*, 2005, **53**, 299-303.
- [92] Chen J., Zhen L., Yang S., Shao W., Dai S., Investigation of Precipitation Behavior and Related Hardening in AA7075 Aluminum Alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2009, **500**, 34-42.
- [93] Liu S., Li C., Han S., Deng Y., Zhang X., Effect of Natural Aging on Quench Induced Inhomogeneity of Microstructure and Hardness in High Strength 7055 Aluminum Alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, **625**, 34-43.
- [94] Jiang F., Zurob H. S., Purdy G. R., Zhang H., Characterizing Precipitate Evolution of an Al-Zn-Mg-Cu Based Commercial Alloy During Artificial Aging and Non-Isothermal Heat Treatments by in Situ Electrical Resistivity Monitoring, *Materials Characterization*, 2016, **17**, 47-56.
- [95] Berg I. K., Gjonnes J., Hansen V., Li X. Z., Wedel M. K., Waterloo G., Schryvers D., Wallenberg L. R., GP Zones in Al-Zn-Mg Alloys and Their Role in Artificial Aging, *Acta Materialia*, 2001, **49**(17), 3443-3451.

- [96] Strobel K., Lay M. D. H., Easton M. A., Sweet L., Zhu S., Parson N. C., Hill A. J., Effects of Quench Rate and Natural Aging on the Age Hardening Behavior of Aluminum Alloy AA6060, *Materials Characterization*, 2016, **111**, 43-52.
- [97] Liu S., Zhang Y., Liu W., Deng Y., Zhang X., Effect of Step Quenching on Microstructure of Aluminum Alloy 7055, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, **20**, 1-6.
- [98] Wang M., Yang G., Huang C., Chen B., Simulation of Temperature and Stress in 6061 Aluminum Alloy During Online Quenching Process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, **24**, 2168-2173.
- [99] <http://www.petrofer.com.tr/ürün-bülteni> (Ziyaret Tarihi 27 Nisan 2019)
- [100] DIN 50125, Testing of Metallic Materials-Tensile Test Pieces, 2009.
- [101] Kopun R., Skerget L., Hribersek M., Zhang D., Stauder B., Greif D., Numerical Simulation of Immersion Quenching Process for Cast Aluminum Part at Different Pool Temperatures, *Applied Thermal Engineering*, 2014, **65**, 74-84.
- [102] Abubakre O. K., Mamaki U. P., Muriana R. A., Investigation of the Quenching Properties of Selected Media on 6061 Aluminum Alloy, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 2009, **8**(4), 303-315.
- [103] Dong Y., Shao W., Lu L., Jiang J., Zhen L., Numerical Simulation of Residual Stress in an Al-Cu Alloy Block During Quenching and Aging, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, **24**, 4928-4940.
- [104] Dumont D., Deschamps A., Brechet Y., A Model for Predicting Fracture Mode and Toughness in 7000 Series Aluminum Alloys, *Acta Materialia*, 2004, **52**, 2529-2540.
- [105] Li X., Starink M. J., Analysis of Precipitation and Dissolution in Overaged 7xxx Aluminum Alloy Using DSC, *Materials Science Forum*, 2000, **331-337**, 1071-1076.
- [106] Lim S. T., Eun S., Nam S. W., Control of Equilibrium Phases (M, T, S) in the Modified Aluminum Alloy 7175 for Thick Forging Applications, *Materials Transactions*, 2003, **44**(1), 181-187.
- [107] Tiryakioğlu M., Robinson J. S., Eason P. D., On the Quench Sensitivity of 7010 Aluminum Alloy Forgings in the Overaged Condition, *Materials Science & Engineering A*, 2014, **618**, 22-28.

- [108] Liu S., Li C., Deng Y., Zhang X., Influence of Grain Structure on Quench Sensitivity Relative to Localized Corrosion of High Strength Aluminum Alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 2015, **167**, 320-329.
- [109] Li P., Xiong B., Zhang Y., Li Z., Zhu B., Wang F., Liu H., Quench Sensitivity and Microstructure Character of High Strength AA7050, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, 268-274.
- [110] Morgenevner T. F., Starink M. J., Wang S. C., Sinclair I., Quench Sensitivity of Toughness in an Al Alloy: Direct Observation and Analysis of Failure Initiation at the Precipitate Free Zone, *Acta Materialia*, 2008, **56**, 2872-2884.
- [111] <http://www.intech.com.tr/Fracture Behavior Evaluation of High Strength 7050 and 7075 Aluminum Alloys Using V-Notched Specimen.pdf> (Ziyaret Tarihi : 24 Mayıs 2019)
- [112] Isadare D. A., Adeoye M. O., Adetunji A. R., Oluwasegun K. M., Rominiyi A. L., Akinluwade K. J., Effect of As Cast Cooling on the Microstructure and Mechanical Properties of Age Hardened 7000 Series Aluminum Alloy, *International Journal of Materials Engineering*, 2015, **5**(1), 5-9.
- [113] Cheng S., Chen K., Peng G., Liang X., Chen X., Effect of Quenching Rate on Microstructure and Stress Corrosion Cracking of 7085 Aluminum Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, 47-52.
- [114] Archambault P., Godard D., High Temperature Precipitation Kinetics and TTT Curve of a 7xxx Alloy By In-Situ Electrical Resistivity Measurements and Differential Calorimetry, *Scripta Materialia*, 2000, **42**, 675-680.
- [115] Li S., Huang Z., Chen W., Liu Z., Qi W., Quench Sensitivity of 6351 Aluminum Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, **23**, 46-52.
- [116] Isadare A. D., Aremo B., Adeoye M. O., Olawale O. J., Shittu M. D., Effect of Heat Treatment on Some Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy, *Materials Research*, 2013, **16**(1), 190-194.
- [117] Pedersen K. O., Borvik T., Hopperstad O. S., Fracture Mechanisms of Aluminum Alloy AA7075-T651 Under Various Loading Conditions, *Materials and Design*, 2011, **32**, 97-107.
- [118] Srivatsan T. S., Sriram S., Veeraraghavan D., Vasudevan V. K., Microstructure, Tensile Deformation Fracture Behaviour of Aluminum Alloy 7055, *Journal of Materials Science*, 1997, **32**, 2883-2894.

- [119] Dumont D., Deschamps A., Brechet Y., On the Relationship Between Microstructure, Strength and Toughness in AA7050 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2003, **356**, 326-336.
- [120] Robinson J.S., Hossasin S., Truman C. E., Paradowska A. M., Hughes D. J., Wimpory R. C., Fox M. E., Residual Stress in 7449 Aluminum Alloy Forgings, *Materials Science and Engineering A*, 2010, **527**, 2603-2612.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Koç F. G.**, Çöl M., Çeliker T., Effect of Cooling Rate on Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stress of 7075 Aluminum Alloy, *Materials Testing*, 2018, **60** (10), 989-996.
- [2] Çöl M., **Koç F. G.**, Öktem H., Kır D., The Role of Boron Content in High Alloy White Cast Iron (Ni-Hard 4) on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance, *Wear*, 2016, **348-349**, 158-165.
- [3] Karakulak E., **Koç F. G.**, Yamaoğlu R., Zeren M., Mechanical Properties of Hypoeutectic Al-Ni Alloys with Al₃Ni Intermetallics, *Materials Testing*, 2016, **58**, 117-121.
- [4] Kır D., Öktem H., Çöl M., **Koç F. G.**, Erzincanlı F., Determination of the Cutting Tool Performance of High-Alloyed White Cast Iron (Ni-Hard Using the Taguchi Method, *Materials and Technology*, 2016, **50** (2), 239-246.
- [5] Çöl M., **Koç F. G.**, Effect of Homogenization Heat Treatment on Toughness and Wear Resistance of Plastic Mold Steel, *Materials Testing*, 2015, **57** (11-12), 942-946.
- [6] Yamaoğlu R., Karakulak E., Zeren M., **Koç F. G.**, Effect of Nickel on the Microstructure and Wear Behaviour of Pure Aluminium Against Steel and Alumina Counterfaces, *International Journal of Cast Metals Research*, 2013, **26**, 289-295.
- [7] **Koç F. G.**, Çöl M., Çeliker T., Al-Zn-Mg-Cu Alaşımlarının Su Verme Hassasiyeti, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2017, **23** (8), 963-966.
- [8] **Koç F. G.**, Çöl M., Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirde Titanyum Katkısının Mikroyapı ve Sertlik Üzerine Etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2018, **6**, 669-675.
- [9] Çöl M., **Koç F. G.**, Yamaoğlu R., Geri Kazanılmış Ti Partikül Takviyeli Alüminyum Kompozit Malzemelerin Toz Metalurjik Yöntemler ile Üretimi ve Karakterizasyonu, *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC18)*, Karabük, Türkiye, 2018.
- [10] Erişir E., Makas T., Çöl M., **Koç F. G.**, Karayel G., Islah Çeliği-Takım Çeliği Kompozit Parçaların Dövme Koşullarının Belirlenmesi, *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC18)*, Karabük, Türkiye, 2018.

- [11] Seyahioğlu C., Berker M., Erişir E., öl M., Önen ., **Ko F.G.**, Investigation of the Effects of Intercritical Annealing on Phase Transformations in a 0.2C-2.3Mn-1Cr Steel by Dilatometry Experiments, *27nd. International Conference on Metallurgy and Materials (METAL2018)*, Brno, ek Cumhuriyeti, 2018.
- [12] öl M., Erişir E., **Ko F. G.**, Temiz A., The Effect of Isothermal Transformation Annealing on the Ultra High Strength Bainitic-Austenitic Steels, *3. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı, Kapodakya, (IMSTEC2018)*, Türkiye, 2018.
- [13] öl M., **Ko F. G.**, Arslan K., Türkan A., Balcı N., Hatman A. H., Makas T., The Effect of Cryogenic Treatment on Performance of Hot Forging Die, *3. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı, Kapodakya, (IMSTEC2018)*, Türkiye, 2018.
- [14] öl M., **Koç F. G.**, Sarı S. E., Optimization of Boron Coating Parameters in AISI1010 Steel, *3. Uluslararası Malzeme Bilimi ve Teknolojisi Konferansı, Kapodakya, (IMSTEC2018)*, Türkiye, 2018.
- [15] öl M., **Koç F. G.**, Yazar E., Angigün F., Türkan A., Makas T., Dövme eliklerde Üretim Parametrelerinin İşlenebilirliğe Etkisi, *2nd. International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC2017)*, Adana, Türkiye, 2017.
- [16] öl M., **Koç F. G.**, Yangaz M., Subaşı E., Akbaşoğlu C., Niyobyum Alaşımlama ve Isıl İşlem Koşullarının G18NiCrMo3-6 eliğinin Mikroyapı ve Tokluk Özelliklerine Etkisi, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS2017)*, Düzce, Türkiye, 2017.
- [17] **Koç F. G.**, öl M., Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirde Titanyum Katkısının Mikroyapı ve Sertlik Üzerine Etkisi, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS2017)*, Düzce, Türkiye, 2017.
- [18] **Koç F. G.**, öl M., eliker T., 7075 Alüminyum Alaşımında Su Verme Hızının Mikroyapı, Sertlik ve Kalıntı Gerilme Oluşumuna Etkisi, *II. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu (IDEFIS2017)*, Kırıkkale, Türkiye, 2017.
- [19] **Koç F. G.**, öl M., Sünnetçi S., Effect of Homogenization Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Toughness Properties of G18NiCrMo3-6 Steel, *3rd. International Iron & Steel Symposium (UDCSI7)*, Karabük, Türkiye, 2017.
- [20] **Koç F. G.**, öl M., eliker T., Al-Zn-Mg-Cu Alaşımlarının Su Verme Hassasiyeti, *16. International Material Symposium (IMSP2016)*, Denizli, Türkiye, 2016.

- [21] Çöl M., **Koç F. G.**, Dupleks Paslanmaz Çeliklerde Isıl İşlem Koşullarının Faz Dağılımı ve Sertliğe Etkisi, *16. International Material Symposium (IMSP2016)*, Denizli, Türkiye, 2016.
- [22] Kır D., Öktem H., **Koç F. G.**, Çöl M., Ötektiküstü Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Karbür Morfolojisi Üzerine Tungstenin Etkisi, *2. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'15)*, Karabük, Türkiye, 2015.
- [23] **Koç F. G.**, Karakulak E., Ymanoğlu R., Zeren M., Mechanical Properties of Al-Ni Cast Alloys, *23rd. International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Çek Cumhuriyeti, 2014.
- [24] Kır D., Çöl M., **Koç F. G.**, Öktem H., Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirde (Ni-Hard 4) Bor Katkısının Mikroyapı ve Sertlik Üzerine Etkisi, *15. International Material Symposium*, Denizli, Türkiye, 2014.
- [25] Çöl M., **Koç F. G.**, Ymanoğlu R., H. Wendel S40 Ray Çeliğinde Yorulma Çatlaklarının Mikroyapısal Karakterizasyonu, *2nd International Symposium on Railway System Engineering*, Karabük, Türkiye, 2013.
- [26] Karagöz Ş., Kahrıman F., **Demircan F. G.**, Sementasyon Yapılmış Dişli Malzemesinde Hasar Analizi, *15. International Metallurgy and Materials Congress*, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [27] Karagöz Ş., Atapek Ş. H., **Demircan F. G.**, Kaya A., Isıl İşlemler ile Sertleştirilmiş Bir Sac Çeliğinde Mikroyapısal İncelemeler ve Fraktografik Etüd, *3. Isıl İşlem Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 2009.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Adana'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana'da tamamladı. 2004-2005 eğitim-öğretim yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2007-2008 eğitim-öğretim yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi ünvanı olarak mezun oldu. 2008-2009 eğitim-öğretim yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2010-2011 eğitim-öğretim yılında Yüksek Lisans Eğitimini tamamlayarak Yüksek Mühendis ünvanını aldı. 2011-2012 eğitim-öğretim yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. 2009 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.