

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE Al ESASLI PARÇACIK
TAKVİYELİ SANDVIÇ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hanifi ÇİNİCİ

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2012
ANKARA**

Hanifi ÇİNİCİ tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE AL ESASLI PARÇACIK TAKVİYELİ SANDVIÇ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
(Metalurji Ve Malzeme Müh., Gazi Üniversitesi)
Prof. Dr. Halil ARIK
(Metalurji Ve Malzeme Müh., Gazi Üniversitesi)
Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ
(Metalurji Ve Malzeme Müh., Gazi Üniversitesi)
Doç. Dr. Halil İbrahim BAKAN
(Malzeme Enstitüsü, TÜBİTAK-MAM)
Doç. Dr. Zafer EVİS
(Mühendislik Bilimleri, ODTÜ)

Tarih: 30/07/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hanifi ÇİNİCİ

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM ESASLI PARÇACIK
TAKVİYELİ SANDVIÇ METALİK KÖPÜK ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**
(Doktora Tezi)

Hanifi ÇİNİCİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
Temmuz 2012

ÖZET

Bu tez, toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı parçacık takviyeli sandviç metalik köpük üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılmasını içermektedir. Sandviç metalik köpüğün üretimi için karıştırılan Al, Si, Mg, titanyum hidrür (TiH_2) tozları ve seramik parçacıkları (SiC , Al_2O_3 , B_4C) kalıp içerisinde sabit basınç altında sıkıştırılarak blok numuneler hâline getirilmiştir. Elde edilen blok numuneler $500\text{ }^\circ C$ sıcaklıkta ekstrüze edildikten sonra Al levhalar arasında $500\text{ }^\circ C$ sıcaklıkta haddeleme işlemi yapılarak köpürtme öncesi ön şekil numuneler oluşturulmuştur. Daha sonra ön şekil numuneler 650 , 670 , 690 ve $700\text{ }^\circ C$ 'de farklı köpürtme sürelerinde (6-16 dakika arasında) köpürtme işlemine tabi tutularak atmosferik ortamda soğumaya bırakılmıştır. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığının artması ile gözenek boyutları, gözeneklilik oranları ve lineer uzamanın arttığı tespit edilmiştir. Gözenek boyutları ve lineer uzamanın artması Al köpük yoğunluğunun düşük olmasına sebep olmuştur. Köpürtme sıcaklığının artması sandviç metalik köpük üretimi için gerekli olan köpürtme süresinin azalmasına neden olmuştur. Partikül ilavesinin basma dayanımını artırdığı, eğme dayanımını ise azalttığı tespit edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının

artmasıyla alüminyum sandviç köpüklerin üç nokta eğme dayanımlarının ve basma dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 710.3.022
Anahtar Kelimeler: Sandviç köpük, Alüminyum, Mekanik özellikler
Sayfa Adedi : 205
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

**PRODUCTION OF PARTICLES REINFORCED AL BASED SANDWICH
METALLIC FOAMS BY POWDER METALLURGY TECHNIQUES AND
INVESTIGATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES
(Ph. D. Thesis)**

Hanifi CINICI

**GAZI UNIVERSTY
THE INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
July 2012**

ABSTRACT

This thesis comprises of the production of particles reinforced Al based sandwich metallic foams by using powder metallurgy techniques and investigation of their mechanical properties. In order to produce sandwich foam, aluminum, silicon, magnesium, titanium hydride (TiH₂) powders and some ceramic particles (SiC, Al₂O₃, B₄C) were mixed homogeneously and compacted under a constant pressure and some powder blanks were produced. Blanks were extruded at 500°C and then hot rolled in between Al plates at 500 °C. Preform samples were foamed at 650, 670, 690, 710 °C for various foaming duration (6-16 minutes) and then cooled to room temperature in air. It was determined that, increasing the foaming temperature and foaming duration resulted in an increase in pore size, the volume fraction of porosity and linear expansion rate. Increasing pore size and linear expansion rate resulted in a decrease in foam density of aluminum. High foaming temperature caused the reduction of the foaming duration. Addition of ceramic particles to the matrix increased the compressive strength of the foams whereas it was found to be detrimental to the three-point bending

strength. High foaming temperature reduced the three-point bending strength and compressive strength of aluminum sandwich foams.

Science Code : 710.3.022

Key Words : Sandwich Foam, Aluminium, Mechanical properties

Page Number : 205

Adviser : Prof. Dr. Mehmet TURKER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım tez izleme komitesi üyeleri hocam Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ ve Prof. Dr. Fehim FINDIK'a, ayrıca deneysel çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Halil KARAKOÇ, Öğr. Gör. Ersin BAHÇECİ, Öğr. Gör. Arif UZUN, Öğr. Gör. Uğur GÖKMEN, Yard. Doç. Dr. Ulaş MATİK, Yard. Doç. Dr. Tefik DEMİR, Öğr. Gör. Sinan AKÖZ, Yasin PELİT, Zemzem ALTUNOLUK, Hakan GÖKMEŞE ve Ruziye ÇAMKERTEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Tezimin yazım aşamasında yardımcı olan Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU'ya teşekkür ederim.

Ayrıca 106M513 ve 107A014 nolu proje kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a ve 07/2010-27 nolu proje ile bu çalışmayı destekleyen Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan sevgili eşim Ümmü Gülsüm ve oğullarım Muhammet Efe ile Ahmet Yağız'a gösterdikleri sabır, anlayış ve fedakârlıktan dolayı çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
2. METALİK KÖPÜKLER.....	3
2.1. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri	4
2.1.1. Açık Gözenekli Metalik Köpük Üretim Yöntemleri	4
2.1.2. Kapalı Gözenekli Metalik Köpük Üretim Yöntemleri.....	8
3. ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI	14
3.1. Lineer Elastik Deformasyon, Plastik Çökme ve Yoğunlaşma	14
3.2. Uygulama Alanları	16
3.2.1. Alüminyum Köpüklerin Zırh Malzemesi olarak kullanımı	20
4. SANDVIÇ METALİK KÖPÜKLER.....	25
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
5.1. Malzeme ve Metot	43
5.2. Tozların karıştırılması.....	44
5.3. Karışım tozlarının preslenmesi.....	44

Sayfa

5.4. Preslenmiş TM blok numunelerin ön ısıtma işlemi	45
5.5. Numunelerin ekstrüzyon işlemi	45
5.6. Haddelme işlemi	46
5.7. Köpürtme işlemleri	47
5.8. Yoğunluk ölçümü ve gözeneklilik oranının belirlenmesi	48
5.9. Lineer uzama oranlarının belirlenmesi	49
5.10. Makro inceleme ve metalografik muayene	49
5.11. Mekanik özelliklerin belirlenmesi	49
5.11.1. Basma deneyi	49
5.11.2. Eğme deneyi	50
6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	51
6.1. Ham Yoğunluğunun Köpürebilirliğe Etkileri	51
6.2. 1 mm Kalınlıkta Al Levha Kullanılarak Elde Edilen Sandviç Metalik Köpükler	55
6.3. 2 mm Kalınlıkta Al Levha Kullanılarak Elde Edilen Sandviç Metalik Köpükler	64
6.4. 3 mm Kalınlıkta Al Levha Kullanılarak Elde Edilen Sandviç Metalik Köpükler	70
6.5. Levha Kalınlığının Köpürme Özelliklerine Etkileri	79
6.6. Partikül İlavesinin Sandviç Yapı ve Köpürme Özelliklerine Etkileri	89
6.6.1. Partikül İlavesinin Gözenek Yapısına Etkileri	89
6.6.2. Partikül İlaveli ASK'lerin Mikroyapısal Karakterizasyonu ...	100
6.6.3. Partikül İlavesinin Lineer Uzama Oranına Etkileri	116

	Sayfa
6.6.4. Partikül İlavesinin Yoğunluğa Etkileri.....	121
6.6.5. Partikül İlavesinin Gözenek Boyutuna Etkileri	125
6.6.6. Partikül İlavesinin Gözenekliliğe Etkileri	139
6.6.7. Partikül İlavesinin Şekil Faktörüne Etkileri.....	132
6.7. SiC, Al ₂ O ₃ ve B ₄ C ilavesinin ASK'ların köpürebilirliğine etkilerinin karşılaştırılması	137
6.8. ASK'lerin Mekanik Özellikleri	143
6.8.1. ASK'lerin Basma Dayanımları	143
6.8.2. ASK'lerin Üç Nokta Eğme Dayanımları	154
6.8.3. Partikül İlavesinin ASK'lerin Basma dayanımlarına Etkilerinin Karşılaştırılması	160
6.8.4. Partikül İlavesinin ASK'lerin Üç Nokta Eğme dayanımlarının Etkilerinin Karşılaştırılması.....	164
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	166
7.1. Sonuçlar.....	166
7.2. Öneriler	167
KAYNAKLAR	168
ÖZGEÇMİŞ.....	178

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4. 1. Darbe yükleri altında üst yüzeyde maksimum değerler.....	33
Çizelge 5. 1. Çalışmada kullanılan seramik ve metal tozların özellikleri	43
Çizelge 5. 2. Ticari saflıktaki alüminyum levhaların kimyasal analizi.....	44
Çizelge 6. 1. Sandviç yapının elde edildiği köpürtme süreleri ve özellikler ..	88
Çizelge 6. 2. ASK'lerin ortalama yoğunluk değerleri	143
Çizelge 6. 3. ASK'lerin ortalama yoğunluk değerleri	154

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2. 1. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi.....	5
Şekil 2.2. Hassas döküm yöntemi	6
Şekil 2.3. Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi	7
Şekil 2. 4. Gaz enjeksiyonla doğrudan köpürtme işlemi.....	8
Şekil 2. 5. Ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme.....	9
Şekil 2. 6. FORMGRIP yönteminin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2. 7. Toz metalurjisi ile köpük üretiminin şeması	11
Şekil 3. 1. Basma yüklemeleri altında gözeneklerin plastik çökmesi.....	15
Şekil 3. 2. Metal köpüklerin gerilim-birim şekil değişim miktarı grafiği.....	16
Şekil 3. 3. Gözeneklilik oranına göre metalik köpüklerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları	17
Şekil 3. 4. Zırh malzemesinin tarihi gelişimi boyunca ağırlık değişimi	21
Şekil 3. 5. Al köpük kullanılarak yapılan çeşitli zırh tasarımları	23
Şekil 4. 1. Sandviç köpük üretim yöntemleri	27
Şekil 4. 2. Sandviç metalik köpük üretim aşamaları	28
Şekil 4. 3. Delme kuvveti ve yerdeğiştirme eğrisi	32
Şekil 4. 4. ASK'lerin farklı destek mesafesinde yapılan eğme dayanımları..	35
Şekil 4. 5. ASK'lerin köpürtme yönüne göre değişen basma dayanımları	36
Şekil 4. 6. Farklı yüksekliğe Al köpüğe sahip ASK'lerin eğme dayanımı grafikleri.....	37
Şekil 5. 1. Ekstrüzyon işleminde kullanılan nozul ölçüleri	45
Şekil 5. 2. Al-Si faz diyagramı	48

Şekil	Sayfa
Şekil 6. 1. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranları	62
Şekil 6. 2. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığının yoğunluğa etkisi.....	63
Şekil 6. 3. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen gözenek boyutları.....	64
Şekil 6. 4. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen yoğunluk ve gözeneklilik	69
Şekil 6. 5. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak Değişen, a) Lineer uzama b) Gözenek boyutu.....	70
Şekil 6. 6. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen; a) Lineer uzama b) Gözenek boyutu	75
Şekil 6. 7. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen; a) Lineer uzama b) Gözenek boyutu	75
Şekil 6. 8. A357 Alüminyum alaşımına ait Vulcan malzeme özellikleri.....	77
Şekil 6. 9. Maxwell-Boltzman grafiği	78
Şekil 6. 10. 650 ve 670 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri	80
Şekil 6. 11. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri	81
Şekil 6. 12. 650 ve 670 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen lineer uzama oranları	82
Şekil 6. 13. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen lineer uzama oranları	83
Şekil 6. 14. 650 ve 670 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözenek boyutları.....	84
Şekil 6. 15. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözenek boyutları.....	85

Şekil	Sayfa
Şekil 6. 16. 650 ve 670 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözeneklilik oranları	86
Şekil 6. 17. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözeneklilik oranları	87
Şekil 6. 18. a)Ön şekil numuneye, b)arayüzey ve c)Al levhaya ait EDX analizi	102
Şekil 6. 19. B ₄ C ilaveli önşekil numunye ait EDX analizleri	104
Şekil 6. 20. SiC ilaveli önşekil numunye ait EDX analizleri	106
Şekil 6. 21. AlSi7Mg0,6 ön şekil numunye ait EDX analizleri	108
Şekil 6.22. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme Sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranı.....	117
Şekil 6.23. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranı	118
Şekil 6.24. B ₄ C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranı	120
Şekil 6.25. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	122
Şekil 6.26. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	123
Şekil 6.27. B ₄ C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	125
Şekil 6. 28. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	126
Şekil 6. 29. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	127
Şekil 6. 30. B ₄ C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen gözenek boyut oranı	129
Şekil 6. 31. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	130

Şekil	Sayfa
Şekil 6. 32. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	131
Şekil 6. 33. B ₄ C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen gözeneklilik oranı	132
Şekil 6. 34. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	133
Şekil 6. 35. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı	134
Şekil 6. 36. B ₄ C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen şekil faktörleri	135
Şekil 6. 37. Alüminyumda hidrojen çözünürlüğünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi	136
Şekil 6. 38. Partikül ilavesinin şekil faktörüne etkileri	137
Şekil 6. 39. Gözeneklilik oranına partikül ilavesinin etkileri	138
Şekil 6. 40. Partikül ilavesinin gözenek boyutuna etkileri	139
Şekil 6. 41. Partikül ilavesinin lineer uzamaya etkileri	141
Şekil 6. 42. Partikül ilavesinin yoğunluğa etkileri.....	142
Şekil 6. 43. AlSi7Mg0,6 esaslı metalik köpüklere ait basma dayanımı grafikleri	144
Şekil 6. 44. AlSi7Mg0,6 esaslı metalik köpüklere elastikiyet grafikleri.....	146
Şekil 6. 45. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri	148
Şekil 6. 46. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lere elastikiyet grafikleri.....	149
Şekil 6. 47. SiC ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri	150
Şekil 6. 48. SiC ilaveli ASK'lere elastikiyet grafikleri	151
Şekil 6. 49. B ₄ C ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri	153
Şekil 6. 50. B ₄ C ilaveli ASK'lere elastikiyet grafikleri	154

Şekil	Sayfa
Şekil 6.51. AlSi7Mg0,6 esaslı ASK'lere ait üç nokta eğme dayanımı grafikleri.....	154
Şekil 6.52. Al ₂ O ₃ ilaveli ASK'lere ait üç nokta eğme dayanımı grafikleri	157
Şekil 6.53. SiC ilaveli ASK'lere ait üç nokta eğme dayanımı grafikleri	158
Şekil 6.54. B ₄ C ilaveli ASK'lere ait üç nokta eğme dayanımı grafikleri.....	160
Şekil 6. 55. Partikül ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri.....	161
Şekil 6. 56. Partikül ilaveli ASK'lere ait elastikiyet grafikleri	163
Şekil 6. 57. Partikül ilaveli ASK'lere ait üç nokta eğme dayanımı grafikleri.	165

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2. 1. Kapalı gözenekli ve açık gözenekli metalik köpük	3
Resim 2.2. Gasar yöntemi ile üretilmiş köpüğün gözenek yapısı	5
Resim 2. 3. a) <i>DUACEL</i> köpüğün SEM görüntüsü.....	7
Resim 2. 4. TM yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı	13
Resim 3. 1. Metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerler	18
Resim 3. 2. Kalıp içerisinde köpürtülmüş metalik köpükler	19
Resim 3.3. Profil içerisinde köpürtülmüş metalik köpükler	19
Resim 3. 4. Sandviç köpükler.....	20
Resim 3. 5. Küresel metalik köpükler.....	20
Resim 3. 6. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı.....	24
Resim 4. 1. Sandviç metalik köpük	25
Resim 4. 2. Lokalize yüke maruz kalmış sandviç metalik köpük.....	26
Resim 4. 3. Burulma ile şekillendirilmiş sandviç köpük	28
Resim 4. 4. Sandviç metalik köpük üretiminin radyoskopik görüntüleri.....	30
Resim 4. 5. İndenter altında farklı yüzey levhalarına sahip köpüklerin çentik görüntüleri	31
Resim 4. 6. Yarı statik delme	32
Resim 4. 7. Farklı kalınlığa sahip sandviç köpüklerin eğme dayanımı sonrasında meydana gelen deformasyon.....	33
Resim 4. 8. Farklı yükseklikte Al köpüğe sahip ASK'lerin eğme dayanımı deformasyonu.....	37
Resim 4. 9. Sandviç metalik köpüklerin makine sektöründe kullanımı	39
Resim 4. 10. ASK'lerin araçların taşıyıcı kollarında kullanımı	40

Resim	Sayfa
Resim 4. 11. Ariane 65 isimli rokette kullanılan bir adaptörün genel Görüntüsü	41
Resim 4. 12. Sandviç köpüklerin farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi ..	41
Resim 4. 13. Sandviç metalik köpüklere uygulanan ikincil işlemler.....	42
Resim 5. 1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı	44
Resim 5. 2. Preslenmiş ham yoğunlukta T/M blok numune	45
Resim 5. 3. a)Ekstrüzyon ünitesi b)Ekstrüzyon sonrası edilen numune.....	46
Resim 5. 4. Köpürtme işlemi için özel tasarlanan fırın	47
Resim 5. 5. Basma testleri için hazırlanan düzeneç.....	50
Resim 5. 6. Üç nokta eğme deney aparatı	50
Resim 6. 1. %70 ve %90 ham yoğunlukta blok numuneler ve ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş numuneler	51
Resim 6. 2. a) %70 ve %90 ham yoğunlukta blok numuneler b) Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş numuneler c) Köpürtme öncesi sandviç numunelerin mikroyapı resimleri...53	53
Resim 6. 3. a) %90 ham yoğunluğa sahip numunenin haddeme sonrası b) %70 ham yoğunluğa sahip numunenin haddeme sonrası Fast Map görüntüleri	54
Resim 6. 4. Farklı ham yoğunluğa sahip blok numunelerden elde edilen sandviç metalik köpükler.....	55
Resim 6.5. 650 °C köpürtme süresinde üretilen sandviç metalik köpükler ...	56
Resim 6.6. 670 °C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde üretilen sandviç köpükler	57
Resim 6. 7. 690 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen sandviç metalik köpüklerin gözenek yapıları	58
Resim 6. 8. 710 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen sandviç metalik köpüklerin gözenek yapıları	59

Resim	Sayfa
Resim 6. 9. Farklı köpürtme sıcaklıkları ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen sandviç metalik köpükler.....	60
Resim 6.10. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	65
Resim 6. 11. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	66
Resim 6.12. 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	67
Resim 6.13. 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	68
Resim 6.14. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	71
Resim 6.15. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	72
Resim 6.16. 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	73
Resim 6.17. 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler	74
Resim 6.18. 650 °C'de B ₄ C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	90
Resim 6.19. 670 °C'de B ₄ C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	91
Resim 6.20. 690 °C'de B ₄ C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	92
Resim 6.21. 710 °C'de B ₄ C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	93
Resim 6.22. 650 °C'de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	94
Resim 6.23. 670 °C'de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	95

Resim	Sayfa
Resim 6.24. 690 °C'de B ₄ C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	96
Resim 6.25. 710 °C' de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	96
Resim 6.26. 650 °C'de Al ₂ O ₃ ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	98
Resim 6.27. 670 °C'de Al ₂ O ₃ ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	99
Resim 6.28. 690 °C'de Al ₂ O ₃ ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	99
Resim 6.29. 710 °C' de Al ₂ O ₃ ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.....	100
Resim 6. 30. a)Ön şekil numune ve Al levha arayüzeyi, b)Matris içerisinde Al ₂ O ₃ dağılımı.....	101
Resim 6. 31. EDX yapılan ön şekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi.....	101
Resim 6. 32. a)B ₄ C parçacık dağılımı, b)Al levha ve parçacık arayüzeyine ait SEM resimleri.....	103
Resim 6. 33. B ₄ C ilaveli önşekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi	103
Resim 6. 34. a)SiC parçacık dağılımı, b)Al levha ve parçacık arayüzeyine ait SEM resimleri.....	105
Resim 6. 35. SiC ilaveli önşekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi ve EDX analiz bölgeleri.....	105
Resim 6. 36. AlSi7Mg0,6 önşekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi, b) EDX analiz bölgeleri	107
Resim 6. 37. B ₄ C ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri	109
Resim 6. 38. SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri	111

Resim	Sayfa
Resim 6. 39. Al ₂ O ₃ ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri	112
Resim 6. 40. B ₄ C ilave edilerek üretilen ASK'lerin köpük-levha arayüzey mikroyapı resimleri	114
Resim 6.41. SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin köpük-levha arayüzey mikroyapı resimleri	115
Resim 6. 42. Al ₂ O ₃ ilave edilerek üretilen ASK'lerin köpük-levha arayüzey mikroyapı resimleri	116

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
ρ^*	Köpüğün yoğunluğu
m^*	Köpüğün havadaki ağırlığı
m_s	Su içerisindeki ağırlığı
V^*	Köpüğün hacmi
L_s	Köpüğün maksimum yüksekliği
L_i	Köpürtme öncesi numunenin yüksekliği
γ	Yüzey gerilimi
T	Sıcaklık
f	Şekil faktörü
σ_k	Merkezdeki köpüğün basma dayanımı
P	Kırılma yükü
A	Kesit alanı
E	Sandviç yapıdaki köpüğün basma modülü
S	Yük-şekil değişim eğrisinde ilk bölümün Lineer eğimi
t_k	Sandviç yapıdaki köpüğün kalınlığı
σ	Yüzey eğme dayanımı
P	Kuvvet
d	Sandviç kalınlığı
c	Köpük kalınlığı
b	Sandviç genişliği
t_l	Yüzey levha kalınlığı
L	Destekler arası uzaklık

Kısaltmalar**Açıklama****ASK**

Alüminyum sandviç köpük

ÜNED

Üç nokta eğme dayanımı

TM

Toz metalurjisi

1. GİRİŞ

Metalik köpükler, iyi enerji sönümlene özelliği, yüksek basma dayanımı, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile bilinir [1]. Çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, kapalı hücre yapısı ve çok hafif olması ile göze çarpmaktadır. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilir ve birçok metalden daha fazla enerji sönümleyebilir [2,3]. Bu özelliklerinden dolayı ses ve enerji absorbesinin gerekli olduğu alanlarda alüminyum köpükler fonksiyonel olarak kullanılmaktadır. Kullanım alanları arasında, hafifliğin ve mukavemetin bir arada bulunması gereken otomotiv, uzay sanayi, demir yolu taşımacılığı ve imalat makineleri gibi alanlar bulunmaktadır [4]. Ayrıca metalik köpük malzemelerin çeşitli mekanik özellikleri benzer yapıya sahip polimerik köpük malzemelere oranla çok daha üstündür. Özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklarda yapısını koruması buna örnek olarak verilebilir.

Metalik köpüklerin döküm, toz metalurjisi ve metalik ayrışma olmak üzere birçok üretim yöntemi vardır [5]. Metalik köpükler %70 ile %90 oranında gözenekli yapıya sahip, gaz ve katı hâlde bulunan maddelerin bileşimidir ve genellikle düzensiz yapıya sahiptir. Morfolojik düzensizlikler, hücre elipsliği, homojen olmayan hücre kalınlığı ve hücre boyutu dağılımının mekanik özellikleri etkilediği tespit edilmiştir [6]. Bu nedenle ergiyik metalin köpürtülmesi sırasında gözeneklerin morfolojisi mutlaka kontrol edilmelidir [7]. Özellikle homojen dağılımın ve dolayısı ile yeteri kadar gaz kabarcığının oluşturulması gerekir.

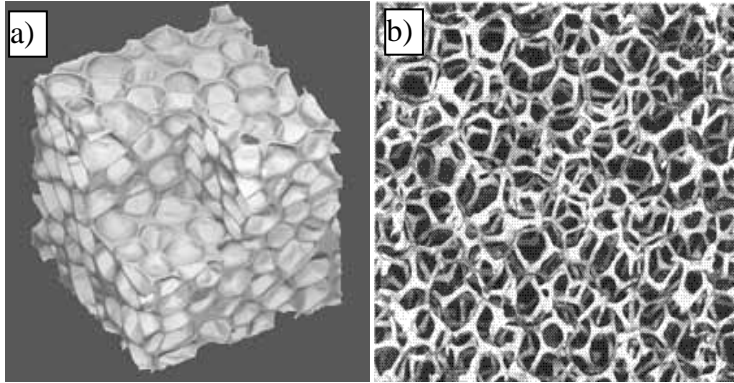
Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle parçacık takviyeli Al esaslı sandviç metalik köpüklerin köpürtme üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada sandviç köpük üretiminde köpürtme sıcaklığına bağlı olan köpürtme süresi belirlenmiştir. Ayrıca farklı kalınlıklara sahip Al levhalar kullanılarak sandviç

köpük üretiminde levha kalınlığının etkileri araştırılmıştır. Levha kalınlığı belirlendikten sonra üretilen B_4C , Al_2O_3 ve SiC partikül ilaveli sandviç metalik köpükler karakterize edilmiştir. Köpürtme sıcaklığına bağlı olarak sandviç yapının elde edildiği köpürtme süreleri kullanılarak üretilen sandviç metalik köpüklerin basma ve eğme dayanımları belirlenmiştir.

2. METALİK KÖPÜKLER

Metalik köpükler; odun, mercan ve sünger gibi hücreli yapıların bir türüdür. Doğal bir ürün değildir. Köpükten daha ziyade sünger şeklinde açık gözenekli yapıya sahip olmalarına rağmen genellikle “metalik köpük” şeklinde ifade edilir. Gözenekli yapı şeklini alabilmesi için farklı fonksiyonel malzemeler kullanılır [8].

Alüminyum, demir ve nikel gibi mühendislik alaşımları değişik üretim teknikleri kullanılarak farklı yoğunluklarda köpürtülebilir [9]. Üretim tekniğine bağlı olarak açık gözenekli veya kapalı gözenekli yapıda metalik köpükler elde edilebilir [10]. Resim 2. 1’ de açık ve kapalı gözenekli metalik köpük örnekleri gösterilmiştir. Alüminyum esaslı köpükler yüksek sağlamlık ve dayanım, iyi korozyon direnci, birbirine benzer ve homojen dağılımlı gözenek yapısında üretilebilmelerinden dolayı metalik köpükler arasında en fazla çalışılan ve en önemli köpüklerdir [11].



Resim 2. 1. a) Kapalı gözenekli b) Açık gözenekli metalik köpük [8,10].

Metalik köpüklerle ilgili çalışmaları Sosnik 1948 yılında, alüminyum içinde civa buharlaştırarak yapmıştır [12]. 1950’lerde sıvı metallerin, önceden viskozite artırıcı işleminden geçtiklerinde çok daha kolay köpükleştirilebileceğinin anlaşılmasıyla daha kolay üretim yöntemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Daha sonra Elliot [13] 1951 yılında bu çalışmayı tekrarlayarak alüminyum köpük üretmiştir. Bu çalışmaya göre, ergiyik metale

köpürtücü madde ilave edildikten sonra ergiyik metal içindeki gazın ayrışarak bileşenlerden birinin gaz haline geçmesi için ısıtılmakta ve oluşan gaz gözenek oluşturarak metalin köpürmesine neden olmaktadır. Köpürme işleminden sonra elde edilen madde, katı köpük yapısını oluşturmak amacıyla soğutulmuştur.

1980'lerin sonunda ise metalik köpük araştırmaları tüm dünyada yeniden canlılık kazanmıştır. Shinko Wire adlı şirketten Japon mühendisler, bugün "Alporas işlemi" olarak bilinen yöntemi geliştirmişlerdir [6]. 1990 yılında, Alman fizikçi Joachim Baumeister, 1950'li yıllarda Benjamin Allen'in geliştirdiği sıkıştırılmış toz köpükleştirme yöntemini yeniden incelemeye başlamıştır.

2.1. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

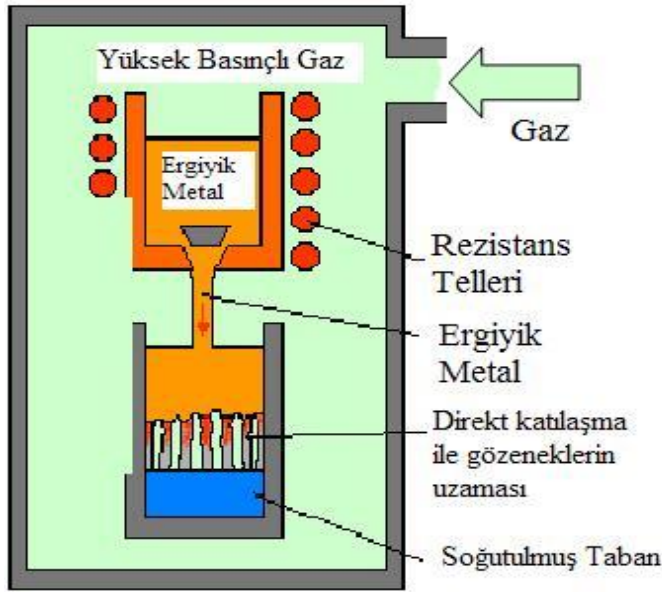
2.1.1. Açık gözenekli metalik köpük üretim yöntemleri

Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi ile metalik köpük üretimi

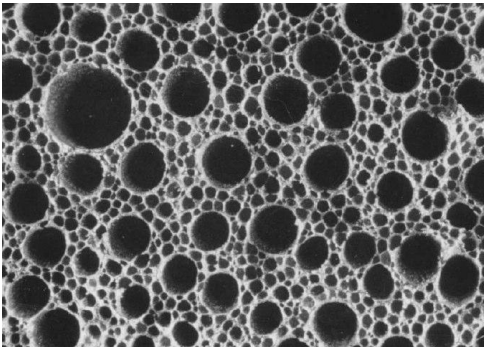
Katı-gaz ötektik katılaşma yöntemi, hidrojen gazı yardımı ile ötektik sisteme sahip bazı metalik yapıları köpürtmek için kullanılmıştır [10]. Elde edilen köpüklerin gözenek yapısı açık gözenekli yapılardır. GASAR diye adlandırılan bu yöntemde, metal üst kısımdaki tank içerisinde ergitilir. Haricen düzenek içerisine gönderilen hidrojen gazı ergiyik metal tarafından emilir. Emilen hidrojen gazı metali bozunmaya uğratarak, sıvı durumdaki metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Sıvı metal içerisinde mevcut olan hidrojen gazının çözme etkisi haricen uygulanan basıncın artması ile artar. Gazı sönümlemiş olan ergimiş sıvı, alt kısmı soğutulmuş olan başka bir tank içerisine aktarılır. Sıvı durumdaki metal, tankın soğutulmuş olan tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaşır. Düzenekğin hemen hemen her kısmı kontrol edile bilen basınç altındaki gaz ile sarılmıştır. Tipik katılaşma hızı 0,05 mm/s'

ile 5 mm/s kadardır. GASAR yönteminin şematik gösterilişi Şekil 2.1'de verilmiştir.

Bu yöntem ile üretilen metalik köpüklerin gözenekleri katılaşmaya paralel olarak şekillenir ve genel olarak küresel şekillidir. Gözenek şekli ve ebatları, kullanılan metal ve alaşımların kimyasal bileşimine, eriyik sıcaklığına, gaz basıncı ve soğutma hızına bağlı olarak kontrol edilebilir. Kullanılan yöntem ile köpük üretiminde alüminyum, nikel, bakır, demir, magnezyum ve çeşitli alaşımlar kullanılmıştır. Gözenek çapları 10 μm ile 10 mm arasında, gözeneklilik oranı ise %5-75 arasındadır [10]. Oluşan gözenekğin tipi genellikle yuvarlak ve dağılımı ise homojendir (Resim 2. 2).



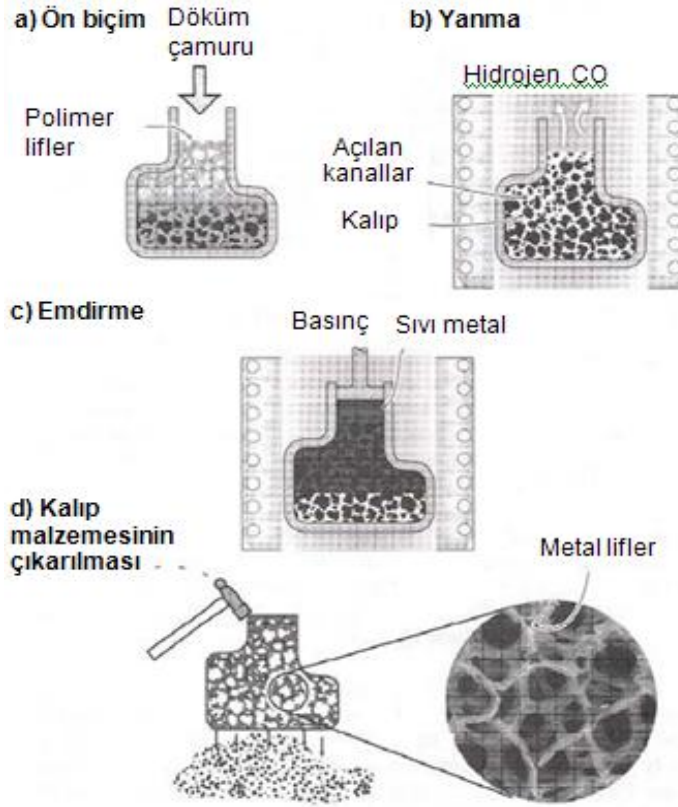
Sekil 2.1. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi [14].



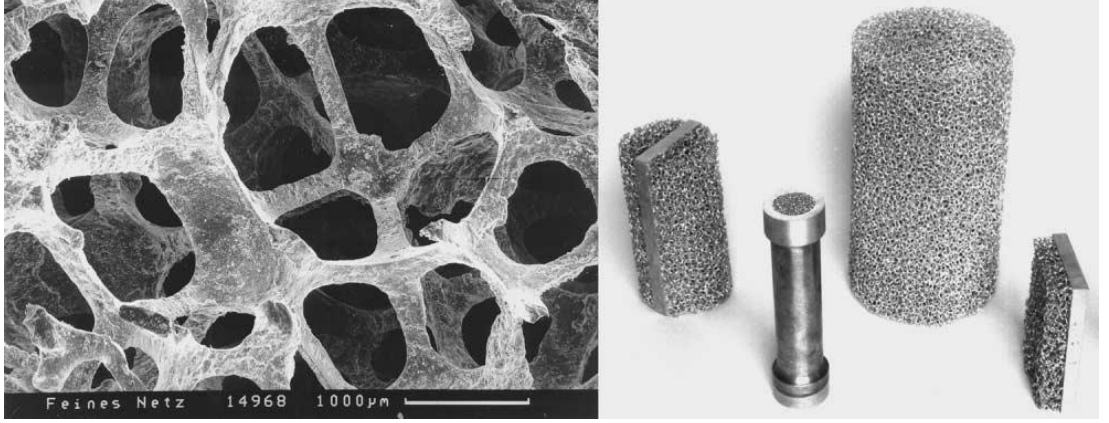
Resim 2. 2. GASAR yöntemi ile üretilmiş köpüğün gözenek yapısı [10].

İnfiltrasyon yöntemi

Hassas döküm yöntemi ile açık gözenekli köpüklerin üretim yöntemidir. Bu yöntem infiltrasyon olarak adlandırılır ve DUOCEL yöntemi olarak bilinir. Ergiyik metal bir tür katı kalıp içerisine dökülür ve gözenek şekli kalıpla oluşturulur. Metalik köpük üretimi için istenilen gözenek ebadı ve relatif yoğunlukta açık gözenekli polimer model hazırlanır. Daha sonra bu model kuma gömülür ve kurutulduğu zaman döküm kalıbı çamuru ile kaplanır. Kalıp polimer modeli ayrıştırmak ve döküm malzemeyi katılaştırmak için fırın içerisinde pişirilir. Sonuç olarak kalıp soğutulur metal alaşımı ile doldurulur. Soğutulduktan sonra orijinal polimer köpüğe benzeyen metal köpük ayrıştırılarak alınır [15]. Şekil 2. 2' de infiltrasyon yöntemi ile köpük üretimini şematik olarak gösterilmiştir. Resim 2. 3'te ise bu yöntemle üretilen köpüğün elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ve bu yöntemle üretilen bazı parçalar gösterilmiştir.



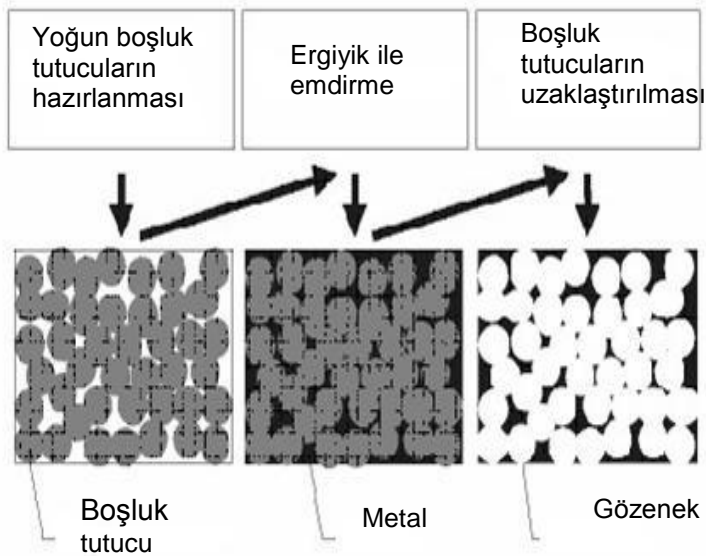
Sekil 2. 2. Hassas döküm yöntemi (DUOCEL yöntemi) [15].



Resim 2.3. a) *DUACEL* köpüğün SEM görüntüsü [10], b) Hassas döküm ile yapılmış bazı parçalar [16]

Boşluk tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm

Metalik köpükler inorganik hatta organik tanecikler veya küreler etrafına sıvı metal dökümü yoluyla üretilebilir. Tanecikler ya dökümden sonra metalik ürün olarak kalmakta ya da uygun bir çözücü veya asitle çıkarılmaktadır. Yöntem Şekil 2.3.'de sematik olarak gösterilmiştir. Bu yöntemin en önemli avantajı, verilen dolgu taneciklerinin boyut dağılımı ile gözenek boyutu dağılımının kontrol edilebilmesidir. Öte yandan, bu yöntem ile elde edilen maksimum gözeneklilik oranı %80 ile sınırlıdır [10].



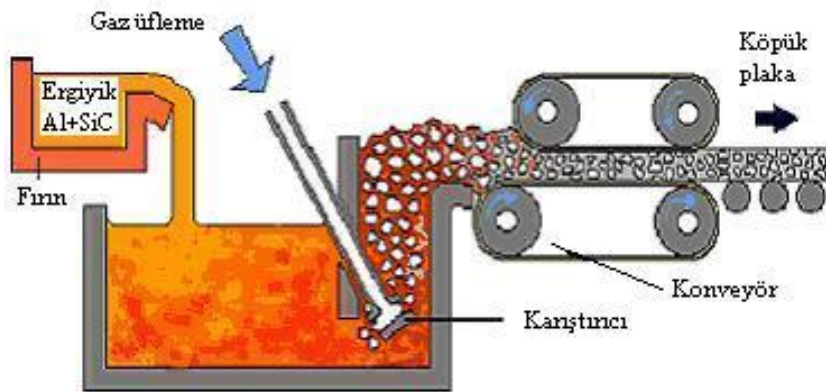
Sekil 2.3. Boşluk tutucu kullanılan üretim yöntemi [17].

2.1.2. Kapalı gözenekli metalik köpük üretim yöntemleri

Kapalı gözenekli metalik köpüklerin üretiminde ergitme yöntemi, döküm yöntemi ve toz metalurjisi yöntemi en yaygın kullanılan üretim yöntemleridir [17]. Bazı yöntemler belirli adlarla bilinir. Diğerleri imalatçı tarafından belirlenen ticari adlarını almıştır. Kapalı gözenekli metalik köpükler dışardan ergiyik içerisine gaz enjekte etmekle, ergiyik metal içerisinde gaz oluşturacak köpürtücü maddelerle veya ergiyik içerisine önceden ilave edilmiş köpürtücü maddelerin belirli ortamlarda köpük oluşturmasıyla üretilir [1, 5, 18].

Ergiyik metal içerisine gaz enjektisi ile metalik köpük üretimi

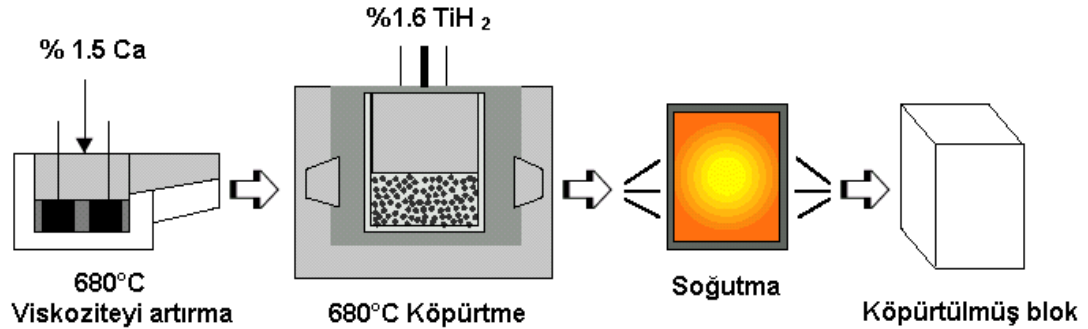
Bu yöntem Hydro Aluminium (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) firmaları tarafından güncel bir şekilde kullanılan yöntemdir [19]. Bu yöntemde silisyum karbür, alüminyum oksit ya da magnezyum oksit parçacıkları ergiyik viskozitesini artırmak için kullanılır. Bundan dolayı üretim aşamasında ilk adım bu ergiyiğin hazırlanmasıdır. İkinci adım hazırlanmış ergiyik içerisine özel bir pervane veya titreşim nozulu yardımıyla gaz (hava, azot, argon) enjekte edilmesidir. Böylece ergiyik içerisinde homojen olarak dağılmış çok ince gaz baloncukları oluşur. Balonların ve ergiyik metalin oluşturduğu karışım daha sonra bir konveyör yardımıyla çekilerek soğumaya bırakılır (Şekil 2. 4).



Şekil 2. 4. Gaz enjeksiyonla doğrudan köpürtme işlemi [10].

Ergiyik metal içerisinde köpürtücü madde ilave edilerek köpük üretimi

Ergiyik içerisinde köpürtücü madde ilave edilerek metal köpük üretimi, gaz enjekte edilerek yapılan üretime alternatif olarak geliştirilmiş bir yöntemdir [20,21]. Bu yöntemde, ergiyik içerisinde gaz enjekte etmek yerine direkt olarak TiH_2 , ZrH_2 ve $CaCO_3$ gibi köpürtücü madde ilave edilerek köpürtme yapılır [22]. Köpürtücü madde etkili sıcaklıkta çözünerek gaz açığa çıkarmakta ve köpük oluşumunu sağlamaktadır. Şekil 2.5'de ergiyik metal içerisinde köpürtücü madde ilavesi ile metalik köpük üretimi şematik olarak gösterilmiştir [22]. Japonya'da Shinko Wire Company şirketi 1986 yılından beri bu yöntemi kullanmakta ve günde 1000 kg üzerinde üretim yapmaktadır. Yöntemin ticari adı *ALPORAS* olarak bilinmektedir [20].



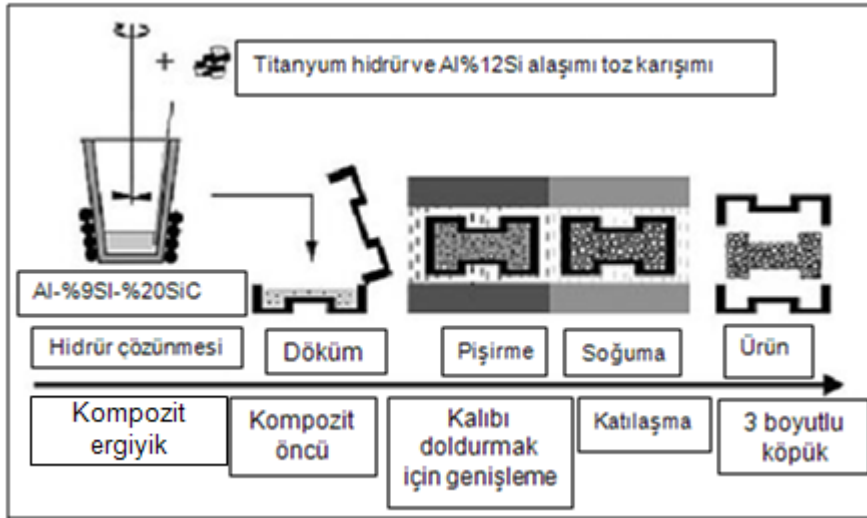
Şekil 2. 5. Ergiyik metal içerisinde köpürtücü madde ilavesi ile köpürtme [22].

Bu üretim yöntemi iki aşamadan meydana gelir. İlk aşamada köpürtülecek metal veya alaşım atmosfer ortamında ve sabit sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Bu esnada viskoziteyi ayarlamak için belli oranlarda Ca, Al_2O_3 , kalsiyum-alüminyum oksit ($CaAl_2O_3$) veya kalsiyum oksit (CaO) ergiyik içerisinde ilave edilerek belli bir hızda ve belli bir süre karıştırılır. İkinci aşamada ise viskozite istenilen değere ulaştığında ergiyik içerisinde, köpürmeyi sağlamak üzere parçacık şeklindeki köpürtücü madde (TiH_2 , $CaCO_3$) ilave edilir. İlave edilen TiH_2 ve $CaCO_3$ aşağıdaki şekilde ayrılarak H_2 ve CO_2 gazı açığa çıkarır. Açığa çıkan gaz köpürmeye neden olur.



Sıvı metal yolu ile köpük üretimi (FORMGRIP)

Bu yöntem, Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır [15]. İşlemin ilk aşamasında titanyum hidrür (TiH_2) tozları ısıtılmaktadır. Böylece yüzeyde titanyum oksit film tabakası oluşumu sağlanır (sadece hidrojen geçirgenliği ile sınırlı) ve bu tabaka çözünmeyi geciktirici bir bariyer rolü oynar. Daha sonra hidrür eriyik alüminyumla karıştırılır. İkinci aşamada ise karışım titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi için ısıtılmaktadır uygulanarak köpükler elde edilebilir (Şekil 2. 6).

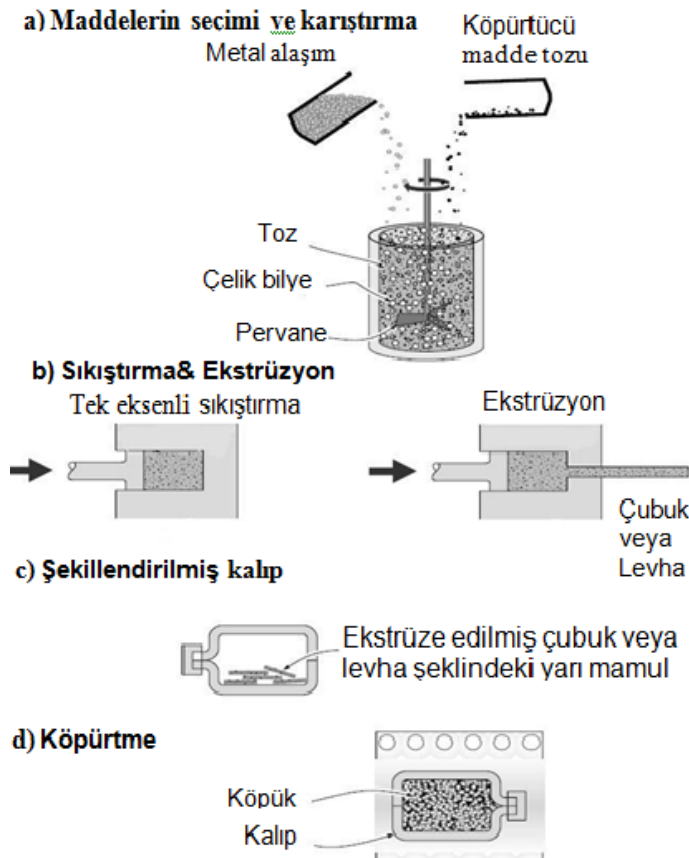


Şekil 2. 6. FORMGRIP yönteminin şematik gösterimi [23]

Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretimi

Toz metalurjisi (TM) yöntemi ile metalik köpük üretimi Allen ve arkadaşları tarafından çalışılmış ve patenti alınmıştır [24]. IFAM'da (Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials) metalik köpükler, önceden hazırlanmış metal tozlarından üretilmektedir [25]. Köpürtücü madde ile metal tozlarının (saf metal tozları, alaşım tozları veya metal toz karışımı)

karıştırılmasıyla işleme başlanır (Şekil 2.7). Daha sonra metal toz ve köpürtücü madde karışımı preslenir ve yarı mamul bir madde hâline getirilir. Bu yönteme örnek olarak tek eksenli veya izostatik sıkıştırma, ekstrüzyon ve toz haddeleme verilebilir. Üretimde çok dikkatli olmak gerekir. Çünkü artan gözenekler ve diğer hatalar, kalitesiz ürün oluşmasına sebep olur. İkinci aşamada numune matris malzemenin ergime noktasına yakın bir sıcaklığa ısıtılır. Köpürtücü madde, ergimeye başlayan malzemedan ayrışır ve gaz çıkışı olur. Bu gaz çıkışı ergiyik metalin genişlemesine ve oldukça gözenekli bir şekle dönüşmesine sebep olur.



Şekil 2. 7. Toz metalurjisi ile köpük üretiminin şeması [26].

Bu metot alüminyum ve alaşımlarıyla sınırlı değildir. Kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları, işlem parametreleri ve köpürtücü maddelerle ayrıştırılarak metalik köpük elde edilebilir. Köpürtücü madde olarak TiH_2 ve ZrH_2 gibi metal hidrürlerin yanında karbonatlar

(kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (alüminyum sülfat hidrat, alüminyum hidroksit) veya hızlıca buharlaşan maddeler (cıva bileşikleri veya pulverize edilmiş organik maddeler) kullanılmaktadır. Kalsiyum hidrür, kalsiyum-magnezyum karbonat, kalsiyum sülfat, demir sülfat, kurşun karbonat, kurşun oksit ve sodyum nitrit gibi diğer alaşımlar ise bazı sıcaklık ve basınç şartları altında kullanılabilir [18].

Toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük elde etmek, her biri ayrı birer araştırma konusu olabilecek beş aşamadan oluşur [27]. Bu aşamalar aşağıda kısaca verilmiştir.

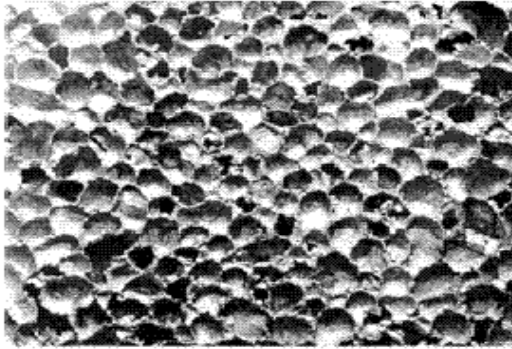
Karıştırma: Karışımın yapılması için metal tozuyla gaz oluşturacak köpürtücü madde tozları belli oranlarda hazırlanır. Hazırlanan tozlar homojenliği sağlamak için karıştırılır. Karıştırılan tozlar kalıp içerisine konularak preslenir. Karıştırma yapılmadan presleme işlemi yapılırsa, toz karışımı köpürtücü madde ve içerisinde köpürtücü olmayan metal tozlarından oluşacaktır. Köpürtmeden sonra bu köpükler yoğun veya daha az gözenekli bir içyapıya sahip olacaktır.

Gözenek Oluşumunun Başlangıcı: Preslenerek tablet haline getirilen karışım, fırın içerisine yerleştirilir. Fırın sıcaklığının artmasıyla, köpürtücü madde içerisindeki gaz ayrılarak gözeneklerin çekirdeğini oluşturur. Köpürtücü maddenin ayrıştığı ve alaşımın ergidiği sıcaklık değerlerine bağlı olarak çekirdek oluşumu, katı, yarı katı ya da sıvı hâlde gerçekleşebilir.

Gözeneklerin Büyümesi: Ayrışmakta olan köpürtücü maddeden çıkan gazın sürekliliği sayesinde çekirdekler büyür ve bir araya gelerek köpüğü oluşturur. Gözenek boyutu belli bir büyüklüğe gelince ısıtmanın durdurulması gerekmektedir. Isıtmanın devam etmesi gözeneklerde çökmenin meydana gelmesine neden olur.

Katılaşma: Hızlı soğutma, gözeneklerin bozulmasına ya da gözenek duvarlarında çatlaklar oluşmasına neden olabilir. Çok yavaş soğutma kararsız durumdaki köpüğün çökmesine sebep olur. Bu durumu önlemek için, metalin uygun zamanlama ve uygun hızda katılaştırılması gerekir. Gözeneklerdeki çökmeyi engellemenin bir diğer yolu ise viskoziteyi artırmaktır. Zaten ticari işlemlerde kullanılan maddelerin en önemli rolü viskoziteyi artırmaktır. Viskoziteyi artıran katkı maddeleri genellikle homojen dağıtılmış ve sıvının içinde katı olarak kalan oksitler veya karbürler gibi metal olmayan parçalardan oluşur.

Yarı mamul parçaların tam genişlemesi için gerekli olan zaman, sıcaklığa ve numunenin boyutuna bağlı olup birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişir [1]. İşlem parametrelerine dikkat edildiğinde elde edilen gözenek yapısı Resim 2. 4' te gösterilmiştir. Metalik köpüklerde, köpürtücü madde olarak TiH_2 kullanıldığı Al köpüklerde, köpüğün yoğunluğu alüminyum yoğunluğu ile orantılıdır. Bu orantı kullanılan tozların ağırlıkları ölçülerek yapılır. Al ve alaşımlarının köpürtülmesinde kullanılan köpürtücü madde miktarının % 0,5-2,5 gibi düşük olduğu bulunmuştur [18,26].



Resim 2. 4. TM yöntemi ile üretilmiş Al köpüğün gözenek yapısı [28].

Köpürtme işlemi, belli bir sıcaklıkta ve belli bir süre sonra kesilirse belli bir yoğunluk elde edilecektir. Köpürtme işlemine devam edilirse daha düşük yoğunluk hatta köpükte çökmeler görülecektir. Bu durumda gözenek yapısı bozulacaktır.

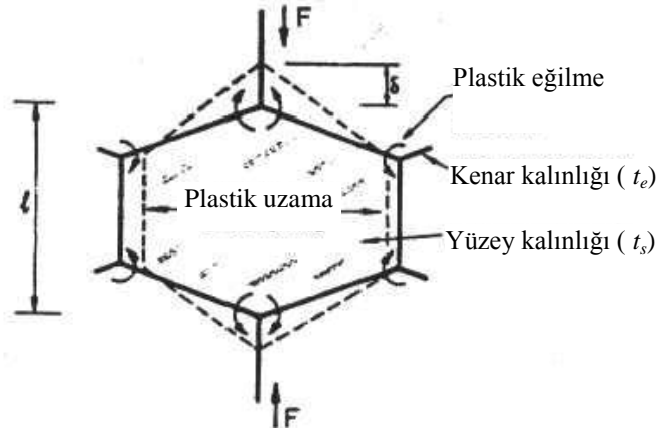
3. ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMA ALANLARI

Alüminyum köpüklerin düşük yoğunluk, yüksek dayanım ve iyi enerji sönümlemesi gibi özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanımı artmıştır [29,30]. Diğer özellikleri arasında basma yüklemeleri altında deformasyon, elastik deformasyon, aksel basmalarda katlanma ve çentik özellikleri çok önemlidir. Bu bölümde alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri ve uygulama alanları üzerinde durulacaktır.

3.1. Lineer Elastik Deformasyon, Plastik Çökme ve Yoğunlaşma

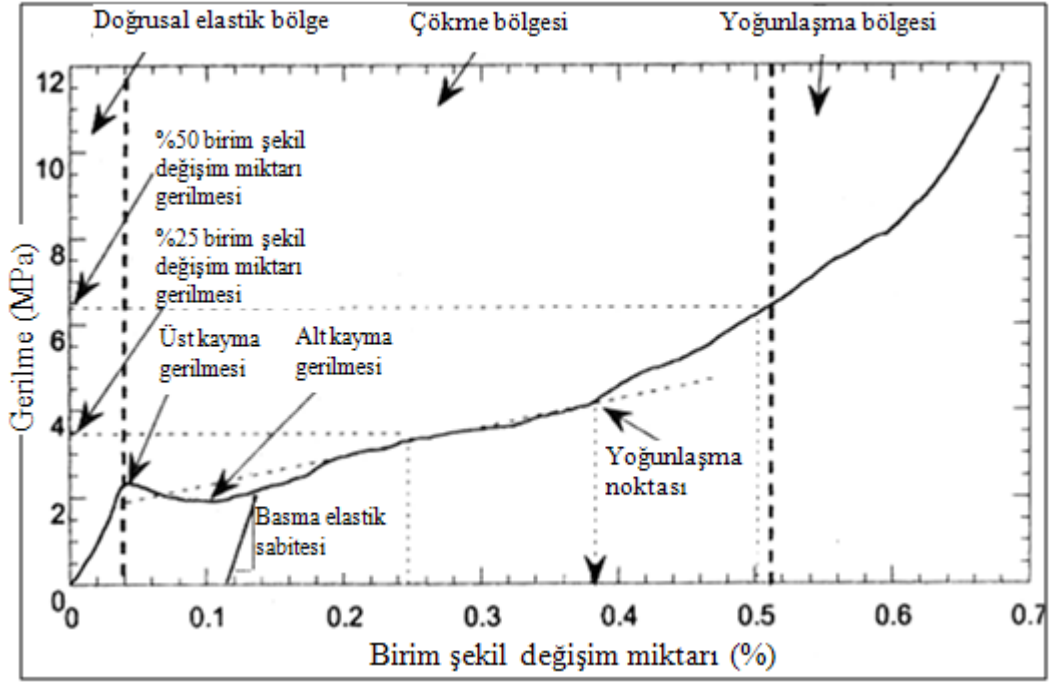
Metalik köpükler belli bir plastik şekil değiştirme bölgesine sahiptir. Bu plastik bölge lineer elastik bölge üstündeki yüklemelerde plastik çökme ile başlar. Köpüklerin lineer elastik deformasyon özellikleri Young modülü ve kayma ile hesaplanabilir [31]. Lineer elastik deformasyon mekanizması gözeneklerin açık veya kapalı olması durumuna göre değişir. Kapalı gözenekli köpükler daha karmaşıktır. Eğer gözenek zarlari ince olursa çatlama veya kırılma meydana gelebilir. Bu zarlarda bazı deformasyon gerilmeleri ortaya çıkar. Bu gerilme kuvvetini, köpük malzemesinin sahip olduğu gerilme kuvveti etki ederek artırır [32].

Kapalı gözenekli metalik köpüklerde, plastik çökme gözenek duvarları üzerinde meydana gelir. Plastik çökme, gözenek duvarlarının basma yönünde katlanmasıyla oluşur (Şekil 3.1). Katlanma için gerekli kuvvet miktarı düşüktür. Fakat basma esnasında gözenek duvarlarının katlanması için gerekli kuvvet, köpüğün akma noktasına önemli oranda katkıda bulunur.



Şekil 3. 1. Basma yüklemeleri altında gözeneklerin plastik çökmesi.

Alüminyum köpüklerin gerilme-birim şekil değişim eğrisi Şekil 3.2' de gösterilmiş ve Al 6061 metalik köpük için farklı üç bölgede anlatılmıştır [1,4]. Bu üç bölge sırasıyla lineer elastik bölge, çökme ve yoğunlaşma bölgeleridir. Metalik köpükler tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi gösterir ve lineer elastik bölgede elastik deformasyona uğrar. Lineer elastik bölgede gerilme ve gerinim gözenek duvarı ile kontrol edilir. Bu bölge gözenek duvarlarının bükülmesi ve yırtılması ile sona erer ve çökme bölgesi başlar. Çökme, deformasyonun çok iyi sınırlandırıldığı elastik bölgeden deformasyonun diğer deforme olmamış kısımlara sıçramasıyla ilerler. Kritik bir genişlemede gözenek duvarları birbirine değmeye başlar ve bunun sonucunda yoğunlaşma meydana gelir.



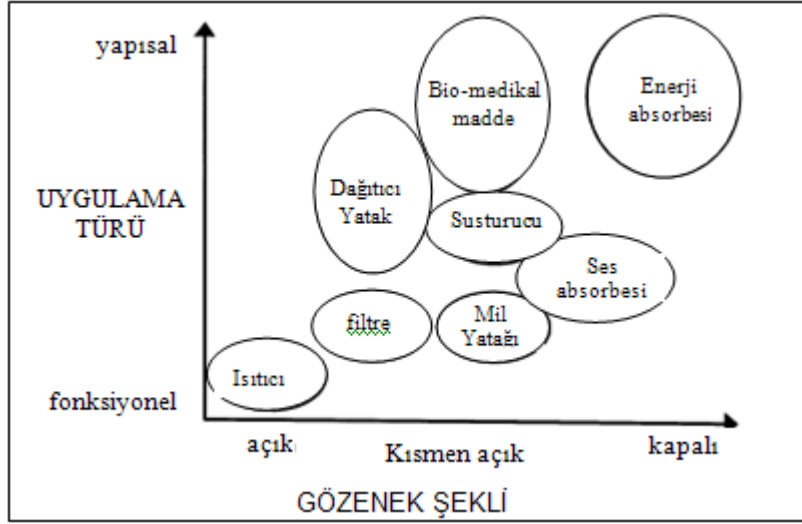
Şekil 3.2. Metal köpüklerin gerilim-birim şekil değişim miktarı grafiği [4].

Çökme bölgesinde oluşan gerilme dalgaları bölgesel deformasyonun yayılması esnasında oluşmaktadır. Yapısında homojen gözenek boyutu ve dağılımı bulunduran köpüklerin, çökme bölgesinde sabit bir deformasyon gerilmesi göstermesi beklenir. Gerçekte ise gözenek boyutu ve dağılımındaki farklılıklar, ince duvarına sahip gözeneklerin önce, kalın duvarlı gözeneklerin de sonradan çökmesine neden olur. Bu yüzden gerilme çökme bölgesinde artan bir özellik gösterir [33].

3.2. Uygulama Alanları

Günümüzde metal köpükler, birçok yeni uygulama alanında kendine yer edinmeye başlamıştır. Metalik köpükler iyi enerji absorbesi, ses absorbesi, yüksek sıkıştırma gücü, düşük özgül ağırlık ve yüksek rijitliğe sahip oldukları için geniş kullanım alanına sahiptir. Şekil 3.3' te görüldüğü gibi gözenek yapısına göre (açık, kapalı, yarı açık gibi) fonksiyonel ve yapısal kullanım alanına sahiptir [29, 34]. Yük taşıma gibi yapısal uygulamalar için "tam kapalı", yüksek oranda sıvı akışı için "çok açık" gibi değişik derecelerde

açıklığa ihtiyaç olabilir. Örneğin; sertlik-ağırlık oranı, titreşimi sönümleme kapasitesi ve ateşe dayanıklılık özelliği nedeni ile gemi yapımında, kapılar, ambar kapakları ya da duvarlarda alüminyum köpük panellerin kullanımı tercih edilebilir.

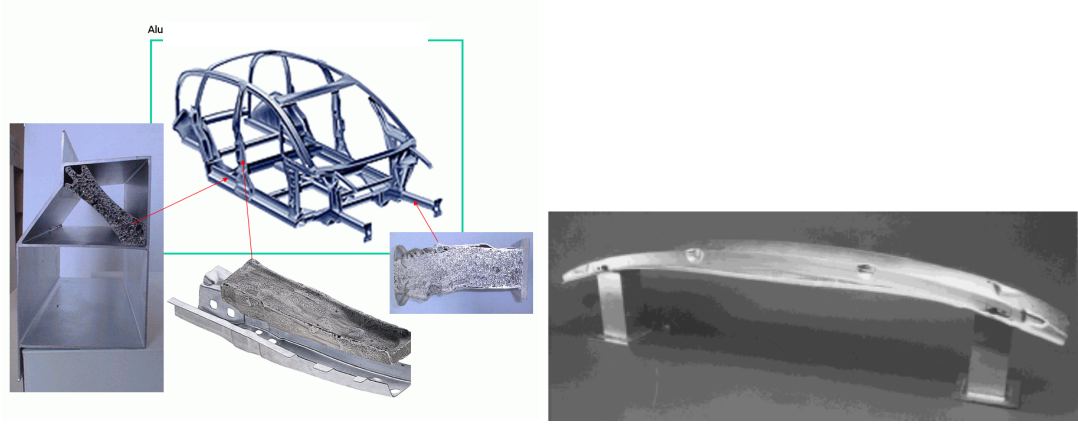


Şekil 3. 3. Gözenek yapısına göre metalik köpüklerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları [29].

Son zamanlarda otomobillerin güvenilirliği ön plana çıkmıştır. Bazı durumlarda taşıtların ağırlığı önem taşımaktadır. Taşıt ağırlığının düşürülmesi ile yakıt tüketimi azalacaktır [26]. Ayrıca özellikle Avrupa ve Japonya'da küçük otomobiller tercih edilmektedir. Bu küçülme yolcu bölmesindeki alanın daraltılmasını gerektirmeyecek şekilde tasarlanmaktadır. Otomobil parçaları veya diğer yapıların küçültülmesi yolu ile yolcu rahatlığının korunması ve güvenilirliğin artırılması yoluna gidilmektedir.

Enerji absorbe özelliği ele alındığında, otomobil ve trenlerde çarpışma ihtimali yüksek bölgelerdeki maksimum çarpma enerjisi dağıtılarak deformasyonu kontrol etmek mümkün olabilir. Uygulamanın olabilirliği çarpışma sırasında ön ve kenar bölgeleri korumayı amaçlar. Resim 3. 1' de metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerler gösterilmektedir [35]. Ses absorbesi ve ısı yalıtımı otomotiv endüstrisinde önemli özelliklerdir. Bu

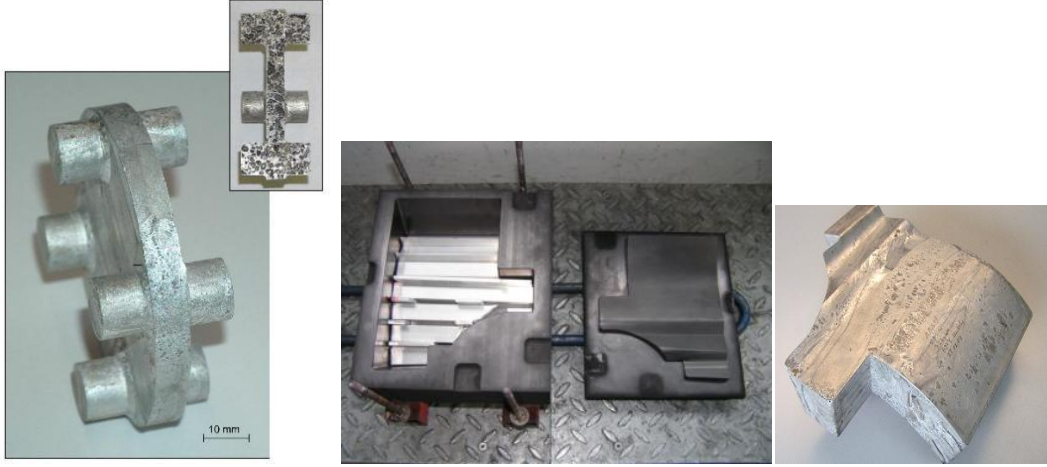
nedenle metal köpükler ses absorbe ve ısı yalıtımı özelliklerinden dolayı da otomotiv endüstrisinde tercih edilebilir.



Resim 3. 1. Metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerler [35].

Metal köpüklerin diğer uygulaması; beton kolon ile duvarlar arasında sıkıştırılmasıdır. Duvar ile beton kolon arasındaki boşluğun doldurulmasında köpük malzeme boşluk içerisine yerleştirilmiş ve bölgesel olarak ısıtılmıştır. Isıtma süresince köpük malzeme genişlemiş ve beton kolon ile duvar arasındaki alan dolmuştur [29].

Köpürtülecek bir malzeme, fırında köpürtülürse genişleme sınırlandırılmadığı sürece düzensiz ve yumru şeklinde köpük oluşacaktır. Bu köpürtme işlemi, yarı mamül malzeme içi boş kalıp içerisine konulup daha sonra ısıtılırsa yarı mamul genişleyerek içine konulduğu kalıbın şeklini alır (Resim 3.2). Bu işlem hemen hemen mamül parçaların kapalı dış yüzeyli ve içinde oldukça gözenekli bir yapı oluşmasını sağlar. Uygun ısıtma yapılarak kesit boyunca sürekli veya süreksiz yoğunluk değişimi sergileyen kütleler üretmek mümkündür [6].



Resim 3. 2. Kalıp içerisinde köpürtülmüş metalik köpükler [6].

Resim 3.3'de metalik köpüklerin profil içerisinde köpürtülmüş metalik köpüklere ait resimler verilmiştir. Metalik köpükle doldurulmuş profiller burkulma süresince ilginç şekil ve deformasyon özellikleri gösterir. Profiller içerisinde dolgu malzemesi olarak konulduklarında emilen toplam enerji köpük ve profilin ayrı ayrı emdiği enerjinin toplamından daha büyüktür [2,3].



Resim 3.3. Profil içerisinde köpürtülmüş metalik köpükler [3].

Metalik köpükler çok iyi kesme kuvvetiyle birlikte düşük yoğunluğa sahiptir. Bu yüzden iki levha arasında sıkıştırılmış metalik köpük (sandviç) konstrüksiyonlar için idealdir (Resim 3.4). Ayrıca metalik köpükler akustik özellikleri ile ses absorbesinin gerektiği bazı yerlerde kullanılır.



Resim 3. 4. Sandviç köpükler [3].

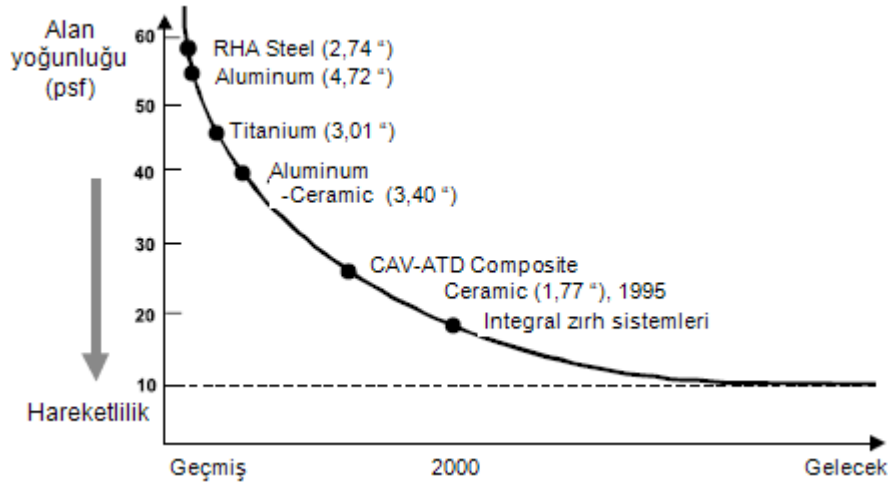
Metalik köpükler küresel şekilde de üretilebilir (Resim 3. 5). Küresel metalik köpükler basma yüklemelerine maruz kalan sandviç yapılarda kullanılabilir. Değişik çaplarda üretilen küresel metalik köpükler farklı kalınlıkta tasarlanan yapılarda kullanılır.



Resim 3. 5. Küresel metalik köpükler [36].

3.2.1. Alüminyum köpüklerin zırh malzemesi olarak kullanımı

Zırh malzemeleri ile ilgili yapılan çalışmalarda yapısal performans ve balistik entegrasyonda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Şekil 3. 4 zırhların tarihsel gelişimi boyunca ağırlık değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi zırh malzemesinin yoğunluğunun azaltılmasına yönelik çalışmalardan olumlu sonuçlar alınmıştır. Al esaslı metalik köpüğün integral zırh malzemesinde kullanımı hem balistik performans hem de hafiflik açısından önemli katkılar sağlamıştır [37].



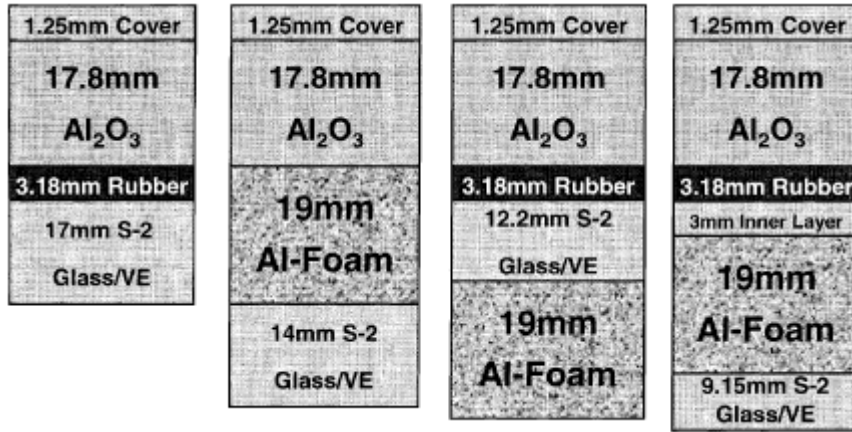
Şekil 3. 4. Zırh malzemesinin tarihi gelişimi boyunca ağırlık değişimi [37].

Hafif seramik-metal zırhların gelişimine Wilkins'in yaptığı çalışmalar öncülük etmiştir [38]. Wilkins seramik-alüminyum zırh sistemini geliştirmiş ve daha sonra bazı zırhların nüfuziyet mekanizması üzerine araştırma yapmıştır. Yüksek sertlikteki seramiklerin deformasyonu ve seramiklerin karmaşık gevrek kırılma mekanizmasından kaynaklanan aşınması son yirmi yıldır bilim insanları tarafından araştırılmaktadır. Seramiğin kırılma işlemi merminin enerjisinin düşük bir miktarını (~%0,2) absorbe ederken büyük bir kısmı (%20-40) arka plakanın deformasyonu neticesinde absorbe edilir. Kinetik enerjinin sonu merminin deformasyonunda (%10-15) harcanır ve çok büyük bir miktarı seramik parçaları tarafından alınır [38]. Seramik-kompozit zırha merminin çarpması ile seramik içerisinde gerilme/şok dalga yayılımı sıkışır ve seramik-arka plaka ara yüzeyinden çekme dalgası olarak arkaya yansır [39]. Çekme dalgasının büyüklüğü arka plaka ile özdirenç uyumluluğuna bağlıdır ve seramik kırılmada önemli rol oynar [37]. Seramik kırılması ince seramik parçacıklarını meydana getirir. Merminin ilerlemesi ve ufalanmış seramik parçacıkları yüksek iç sürtünmelere yol açabilir [40]. Bu olay sınırlandırılmış seramiklerin geçirgenlik özelliklerinin araştırılmasına neden olmuştur [41, 42]. Eğer seramik iyi desteklenir ve dalga hasarından korunursa yüksek dirençli geçirgenlik gösterir. Çarpma yüzeyi sınırlandırılırsa ara yüzey bozunumuna neden olunur.

Bazle ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda [37] Al köpük içeren ve içermeyen balistik hedefler tasarlamış ve alüminyum köpük içerisinde şok dalga yayılımı kıyaslanması için test edilmiştir. Bu çalışmada, alüminyum köpüksüz hedef $161,03 \text{ kg/m}^2$ ve alüminyum köpük içeren hedef $157,75 \text{ kg/m}^2$ yoğunluğa sahiptir. Yüksek sertlikteki çelik, alüminyum köpük, alümina seramik ve 7039 alüminyum plakalar ince tabaka epoksi yapıştırıcı ile birlikte bağlanmıştır. Her iki hedef 20 mm ve 1067 m/s hızda mermi ile vurulmuştur. Ölçülen gerilme değerlerinde köpüksüz sinyalin artış zamanı 1,0 mikro saniye köpükle 2,0 mikro saniyedir. Her iki deneyde de maksimum gerilme seviyesi yaklaşık 6,25 GPa olarak bulunmuştur. Deneysel çalışma ve sonlu elemanlar yöntemi sonucunda alüminyum köpüklerin gerilme dalga yayılımında iki önemli özelliği ortaya çıkmıştır; 1. Alüminyum köpükler gerilme dalga yayılımı zamanını artırmıştır 2. Alüminyum köpük kullanımı gerilme dalga yayılımında önemli gecikmelere neden olmuştur. Gerilme dalga deneylerinin ikinci adımı farklı kalınlıktaki alüminyum köpük ile (12,7 ve 30,48 mm) iki balistik hedef ile ilgilidir. İlave olarak seramik matrisli (AS109) tabaka hedef ile bağlanmıştır. 20 mm merminin hızı 915 m/s'dir. İlk hedefe çarpan mermi AS109 seramik levhayı parçalamış, yüksek sertlikteki çeliği deforme etmiş ve alüminyum köpüğü yoğunlaştırmıştır. Ölçülen gerilim 0,825 GPa olarak kaydedilmiştir. İkinci hedefe çarpmada (39,48 mm alüminyum köpük) AS109 seramik tabakanın kırılması benzer ve yüksek sertlikteki çeliğin deformasyonu benzer şekilde görülmüştür. Bununla beraber alüminyum köpük tamamen değil kısmen yoğunlaşmıştır ve gerilme ölçümü hiç kaydedilememiştir. Bu iki deneyden önemli sonuçlar çıkmıştır. Eğer köpük bir taraftan diğer tarafa tamamen yoğunlaşmazsa içerisinden geçen gerilme dalgalarının ölçümüne izin vermez. Alüminyum köpüğün hava/gaz dolu gözenekli yapısı gerilme dalga yayılımını zorlaştırır. Gözenek duvarı gerilme dalgalarının yayılımında önemli rol oynar. Kapalı gözenekli köpüğün deformasyonu gözenek duvarı eğilmesi ve plastik çökmesiyle meydana gelir. Bu durum bölgesel yoğunlaşmaya yol açar. Gerilme dalga yayılımı etkisi kapalı gözenekli köpük tamamen yoğunlaştığında meydana gelir. Eğer gerilme dalgası köpük tamamen yoğunlaşmıyorsa kadar arka plakaya ulaşmazsa arka plakada hasar

ve deformasyonu büyümesini geciktirir. Bu şekilde köpük zırhların balistik etkisini geliştirir.

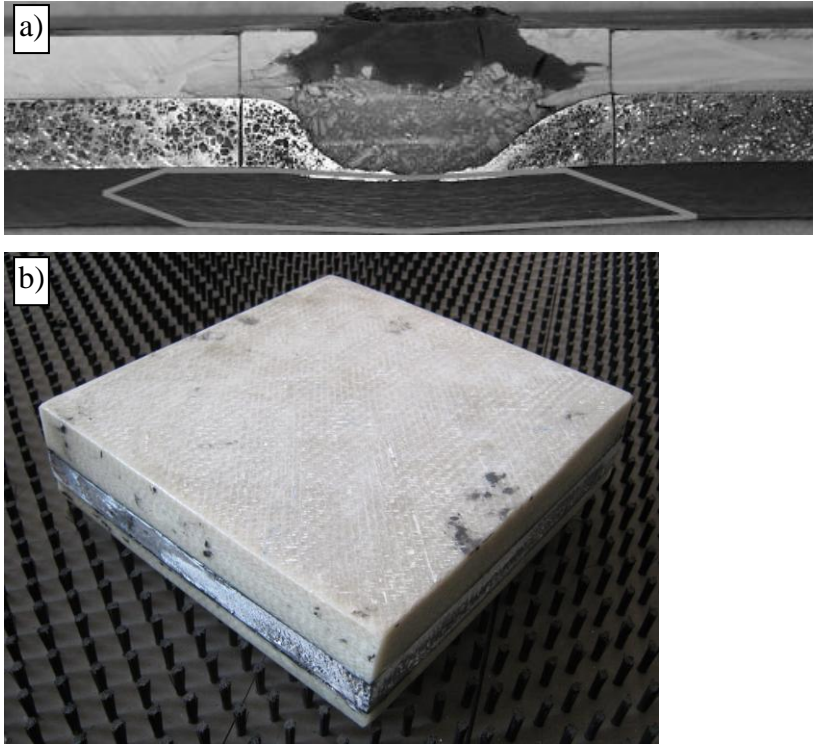
Alüminyum köpüklerin integral zırh malzemesi olarak kullanımı amacıyla farklı tasarımlar yapılmış ve Al köpük içermeyen integral zırhlarla balistik özellikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 3. 5). Al esaslı metalik köpüklerin dinamik deformasyonu çarpma yüzeyinde başlamış ve yoğunluk tamamlanıncaya kadar kalınlık içerisinde yayılmıştır. Alüminyum köpüğün gözenekli yapısı gerilme dalgalarını dağıtır ve ince dalgalar olarak hareket ettirir. Alüminyum köpük içerisinde gerilme dalgalarının dağılım etkisi sadece yoğunluk tamamlandıktan sonra meydana gelmektedir. Al bazlı metalik köpüğün kullanılmadığı bir tasarımda ilk başta görülmektedir [37] .



Şekil 3. 5. Al köpük kullanılarak yapılan çeşitli zırh tasarımları [37].

Köpükte kısmi yoğunlaşma meydana geldiğinde gerilme dalgaları filtre edilerek hareket edebilir. Bu sayede alüminyum köpüğün arka plakaya iletilen gerilmenin etkisini azalttığı tespit edilmiştir. Son zamanlarda özellikle ABD de Al esaslı metalik köpüğün darbe emme özelliği sebebi ile integral zırh malzemesi üretiminde kullanılması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır [37]. Bu konuda yapılan çalışmalar iki nokta üzerinde yoğunlaşmaktadır; Al esaslı metalik köpüğün dayanımını artırmak ve integral zırh malzemesinde farklı tasarımlar uygulayarak zırhın performansını

yükseltmek. Alüminyum köpüklerin integral zırh malzemesi olarak kullanımı Resim 3.6'da görülmektedir. Resim 3.6a'dan da anlaşılacağı gibi alüminyum köpüklerin lokal deformasyonu integral zırh sisteminde seramik parçacıklarını tutmaktadır [37]. Resim 3.6b'de ise Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi tarafından üretilen integral zırh malzemesi görülmektedir.



Resim 3. 6. Al köpüğün integral zırh malzemesi olarak tasarımı [37].

4. SANDVIÇ METALİK KÖPÜKLER

Sandviç metalik köpükler iki metal levha arasında köpürtülmüş metal içeren yapılardır (Resim 4.1). Bu yapılar genelde köpürtülecek metal alüminyum, çelik ve titanyum gibi geleneksel metal levhalarının arasında haddelenerek veya yapıştırılarak elde edilebilir. Son işlem olarak uygulanan ısıl işleme sandviç yapılar meydana geldiğinde sadece merkezdeki köpürtülecek malzeme genişler ve yüzey levhalarının yoğunluğu değişmez [43].

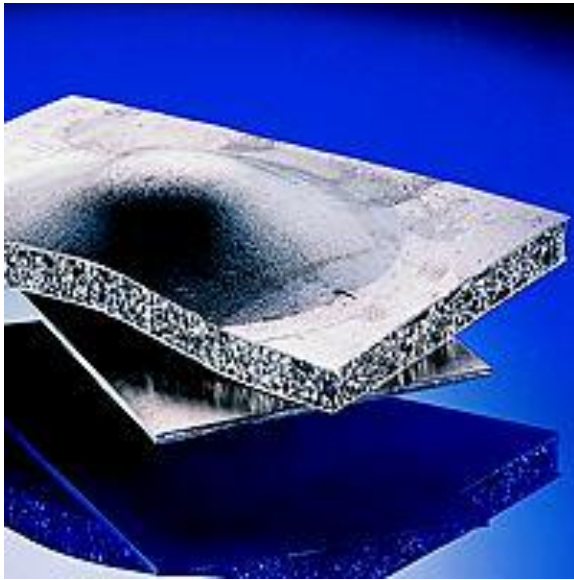


Resim 4. 1. Sandviç metalik köpük [43].

Alüminyum köpük sandviç teknolojisi 1994 yılında Almanya'da Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü'nde (IFAM) geliştirilmiştir [44,45]. Burada 1997 yılında sandviç köpük üretimi J. Banhart ve J. Baumister tarafından patentlenmiştir [46]. Daha sonra 1998 yılında Slovakya'da Malzeme ve Makine Mekaniği Enstitüsü (IMMM), Avusturya şirketi olan MEPURA için alüminyum sandviç köpük üretimini geliştirmiştir [24]. Sandviç köpükler üç boyutlu şekillendirilebilir ve çok dayanıklı ve düşük yoğunluğa sahiptir.

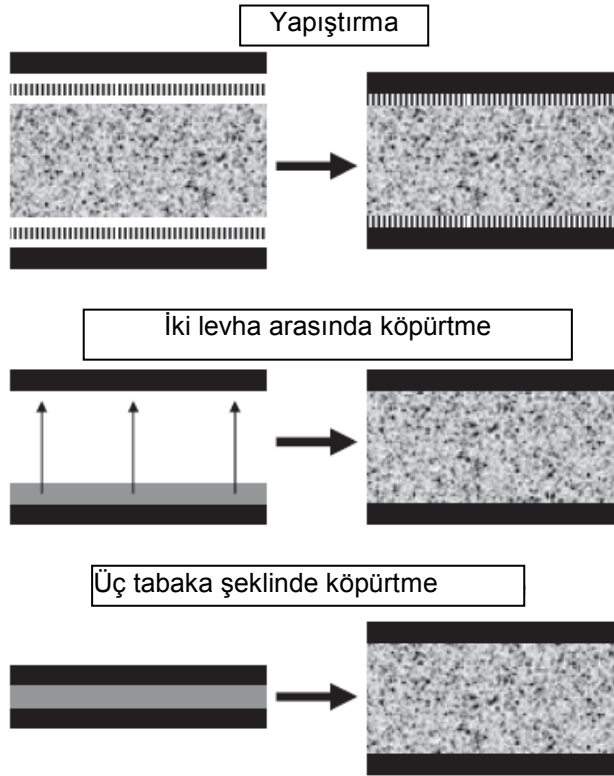
Alüminyum köpüklerin performansı sert ve katı yüzey levhalarından oluşan sandviçlerde merkez malzemesi olarak kullanılarak geliştirilebilir. Bu, sandviç yapının hafif ve yüksek dayanımlı olmalarına yol açar. Merkezdeki metalik köpük alüminyum, paslanmaz çelik, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) esaslı kompozit ve alümina levhalar gibi levhalar arasında sandviç yapılırsa

sandviç yapının özellikleri değişir [47]. Bununla birlikte, bu yapılar Resim 4.2'de görüldüğü gibi lokal yüklemelere maruz kaldığında ince yüzey levhasının düşük eğme dayanımı ve merkezin düşük dayanımından dolayı çentiğe benzeyen hasara uğrar [48]. Sandviç yapılarla ilgili daha önce yapılan çalışmalar merkezi metalik köpükleri kapsamaktadır. Bu çalışmalarda araştırmacılar değişik yükleme koşulları altında çökme mekanizması için modelleme ve hasar mekanizması üzerinde odaklanmışlardır [49-52]. Bu köpükler için, düz, küresel ve koniksel zımbalama ve çentik yükleri altında gözenek duvarı parçalanarak ezilmesi baskın mekanizma olarak bulunmuştur.



Resim 4. 2. Lokalize yüke maruz kalmış sandviç metalik köpük [48].

Metalik levha ve alüminyum köpük kombinasyonlu sandviç köpük üretimi için çeşitli yaklaşımlar önerilmektedir. Önerilen yaklaşımlardan bazıları Şekil 4. 1' de verilmiştir [53]. Metal köpük ve yüzey levhaları arasında bağ oluşturmak için yapıştırma, lehim veya difüzyon bağı oluşturmak en belirgin yaklaşımlardır. Ashby ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, yapıştırma ve seçilen parametrelere bağlı olarak oluşan köpük-levha etkileşiminin sandviç köpüğün özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir [27].

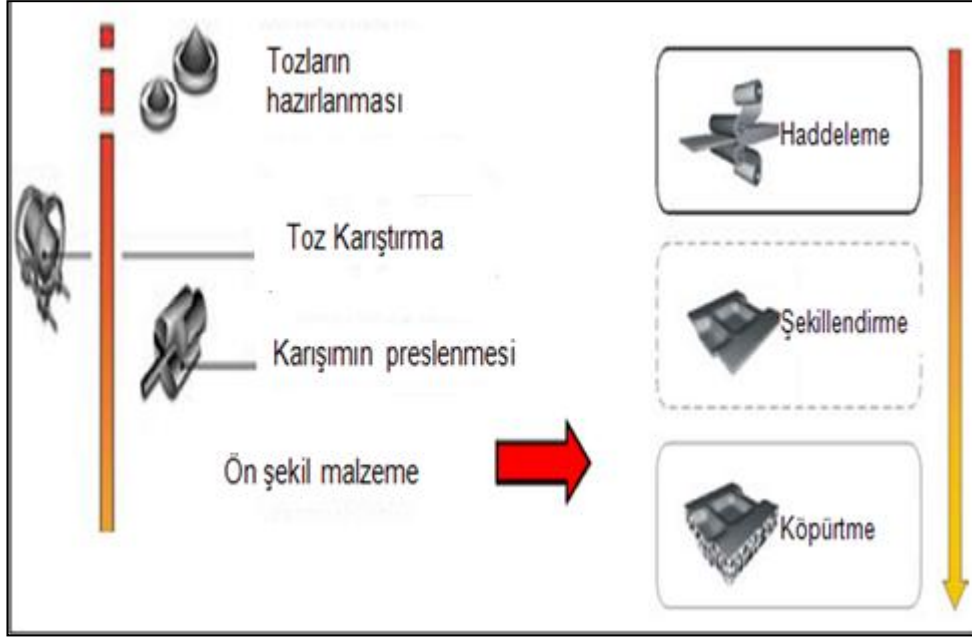


Şekil 4. 1.Sandviç köpük üretim yöntemleri [53].

Yapıştırma tekniğinde üretilen metalik köpükler ile yüzey levhaları arasında Redux 322, FM 300, XAF 2311, Rohacell WF51 ve Divinycell H60 gibi epoksi bazlı yapıştırıcılar kullanılarak sandviç köpük üretilmektedir. Bu yöntem ile sandviç köpük üretiminde rijitliğin azalması, yüksek maliyet, ve ağırlık artışına neden olunması dez avantajlar arasındadır [27].

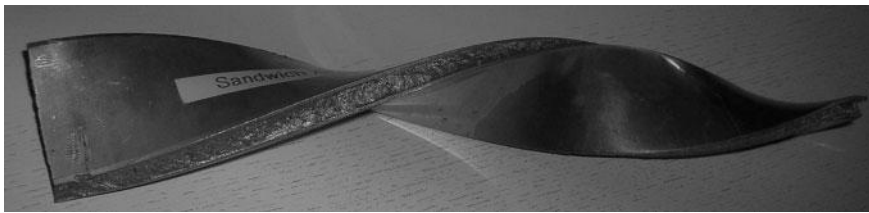
Üç tabakalı kompozit malzeme olan alüminyum köpük sandviçlerin yüzey tabakaları geleneksel alüminyum alaşımları ve çelik levhalardan oluşur. Merkezdeki köpükle yüzey levhaları arasında metalik bağ vardır. Alüminyum köpük sandviç için üretim işlemi iki temel adımdan oluşur (Şekil 4. 2). Toz karışımı sıkıştırıldıktan sonra köpürtülecek malzeme geleneksel malzemelerden oluşan iki levha arasında haddelenir. Merkezdeki köpürtülebilir malzeme ile yarı ürün hâlindeki kompozit eğme, presleme ve derin çekme gibi geleneksel şekillendirme teknikleri kullanılarak şekillendirilir. Son geometrik şekil elde edildikten sonra köpürtülecek parçalar köpürtme

sıcaklığına ısıtılır ve merkezdeki köpürtülecek malzeme genişler. Daha sonra oda sıcaklığına soğutulurak üç boyutlu alüminyum köpük sandviç malzeme üretimi tamamlanır.



Şekil 4. 2. Sandviç metalik köpük üretim aşamaları

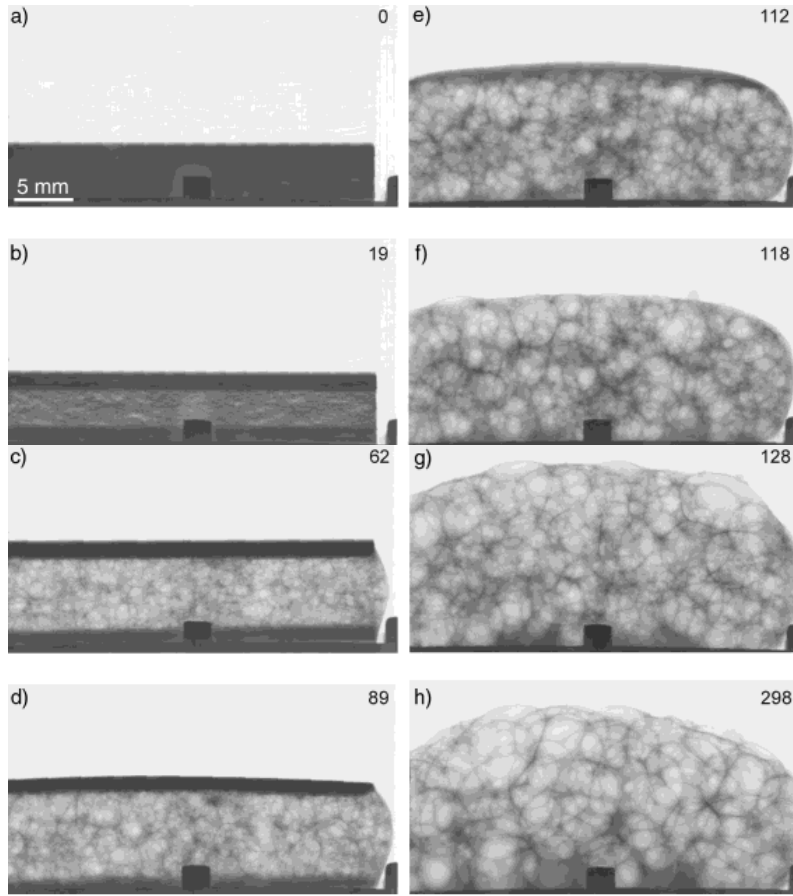
Sandviç tasarımlarda katı yüzey levhaların kullanılmasıyla basınç, gerilme, burulma veya bükülme özellikleri optimize edilebilir (Resim 4. 3). Banhart ve Seeliger [53] yaptıkları çalışmalarda merkezde alüminyum alaşımlı köpük ve bu köpükle arayüzey bağı olan iki metal levhadan oluşan kompozit alüminyum sandviç köpüğü incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, alüminyum sandviç köpük teknolojisi ile düz ve eğimli alüminyum köpük merkezli sandviç paneller üretilebildiğini ve bunların dövme ile daha karmaşık şekilde şekillendirilebileceğini belirtmişlerdir.



Resim 4. 3. Burulma ile şekillendirilmiş sandviç köpük [53].

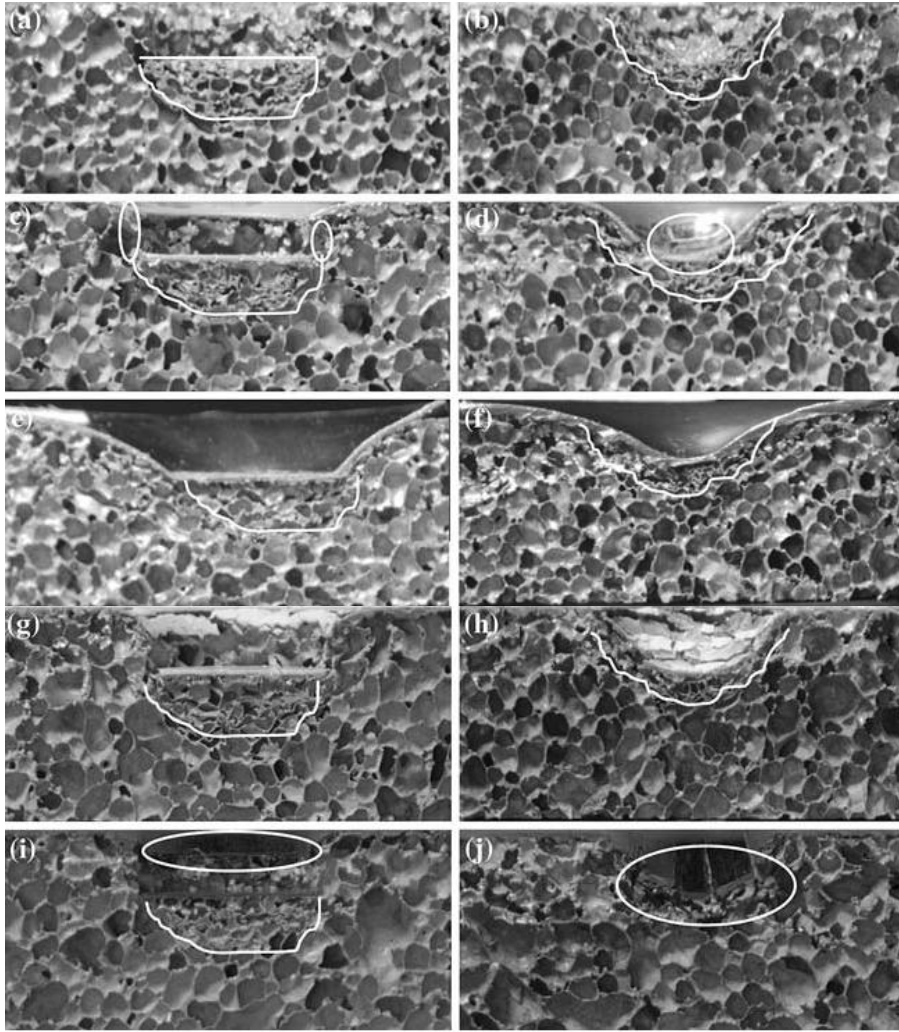
Yukarıda sunulan üretim ve işlem teknikleri gelecekte seri üretime geçilebileceğini göstermektedir. Gelecekte önşekil parçaların maliyetindeki gelişmeler alüminyum sandviç köpüklerin (ASK) düşük maliyetine bağlı olarak çelik üretiminde de kullanılabileceğini göstermektedir. Güvenilir kalitede ASK'nin yüksek miktarda üretimi ve malzeme için konstrüksiyon tasarımı daha verimli uygulamalar gerektirmektedir. İleri düzeyde gelişmiş ASK üretimi için bütün üretim parametrelerinin bilinmesi çok önemlidir [54].

ASK teknolojisi, eğimli levha ve alüminyum köpük merkezli sandviç yapıların ve bunların dövme yönüyle daha karmaşık şekilli üretimine imkan sağlar. Geliştirilmiş köpük teknolojisi, yüzey ve merkezin her ikisi içinde uygulanabilir alaşımlar yelpazesini genişletmiştir. Köpürtme işlemindeki araştırmalar köpürebilirlik ve alaşım kombinasyonu arasındaki ilişkinin anlaşılması açısından gereklidir. Isıl işlem, kaplama veya diğer yöntemlerle köpürtücü maddenin geliştirilmesi ergiyik metali genişlemesine neden olan gazın ayrışması için önemlidir. Merkezdeki köpük alaşımının geliştirilmesi üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve diğer özelliklerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak ASK'lerin mekanik özelliklerinin yeteri kadar bilinmemesinden dolayı bu malzemelerin üretim ve karakterizasyonu çok önemlidir [53]. Banhart ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada sandviç köpük üretiminde üretiminde köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak sandviç yapının bozulduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri radyoskopik görüntüleri Resim 4. 4'te verilmiştir [55].



Resim 4.4. Sandviç metalik köpük üretiminin zamana bağlı olarak değişiminin radyoskopik görüntüleri [55]

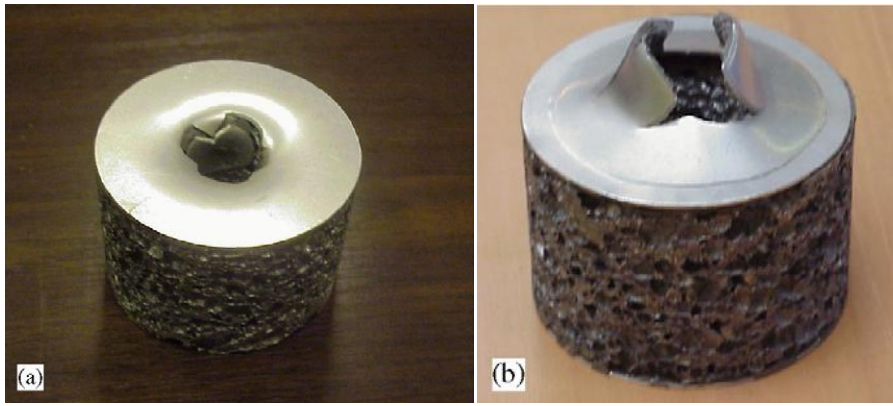
Mohan ve arkadaşları [56] yaptıkları çalışmalarda 0,5 mm kalınlıklarında alümina levha, paslanmaz çelik levha ve karbon fiber takviyeli polimer levhaları epoksi yapıştırıcı ile alüminyum köpüklere yapıştırarak elde ettikleri sandviç köpüklerin çentik etkisi ile alüminyum köpüğün çentik etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda küresel ve düz indenter ile yaptıkları çentik deneyinde merkezdeki köpüğün çökme ve yırtılma indenterin geometrisine benzer hata mekanizmasına maruz kaldığı bulunmuştur. Çentik yükleri altında farklı yüzey levhalarına sahip köpük bloklarda değişik hata mekanizmaları meydana gelmiştir (Resim 4. 5). Bu hata mekanizmalarının yüzey levhalarının özelliklerine, indenterün geometrisine ve kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir.



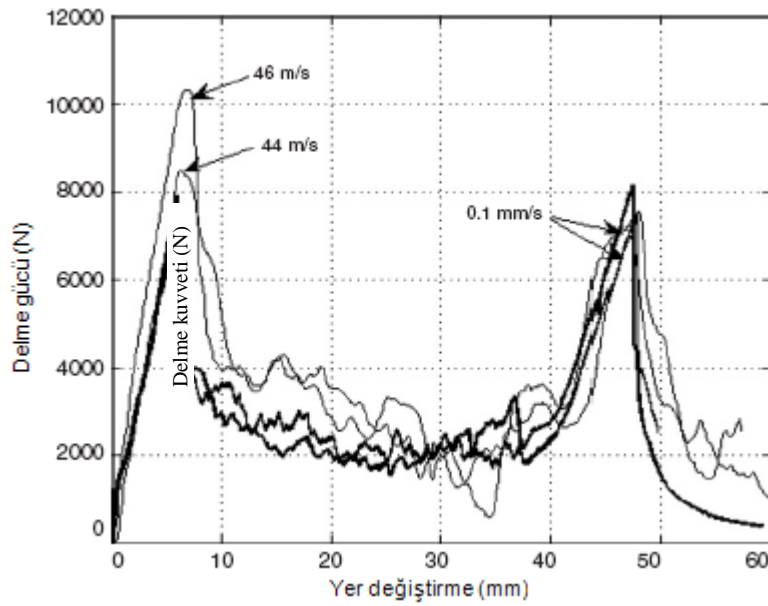
Resim 4. 5. İndenter altında farklı yüzey levhalarına sahip köpüklerin çentik görüntüleri [56],
 (a) Düz indenter altında köpük (b) Küresel indenter altında köpük,
 (c) Düz indenter altında Al levhalı köpük (d) Küresel indenter altında Al levhalı köpük, (e) Düz indenter altında SS levhalı köpük (f) Küresel indenter altında SS levhalı köpük, (g) Düz indenter altında Al_2O_3 levhalı köpük (h) Küresel indenter altında Al_2O_3 levhalı köpük, (i) Düz indenter altında CFRP levhalı köpük (j) Küresel indenter altında CFRP levhalı köpük

Zhao ve arkadaşları [57] darbe yükleri altında köpük merkezli sandviç yapılarda meydana gelen delinme mekanizmasını incelemiştir (Resim 4. 6). Yaptıkları çalışmada 40 mm kalınlığında $AlSi7Mg0,5$ esaslı köpük ve 0,8 mm kalınlığında alüminyum levhadan oluşan sandviç yapı kullanmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, artan darbe yükleri altında üst yüzeyde maksimum

yük değerinde önemli oranda artış olduğunu bulmuşlardır (Şekil 4. 3). Bu durumun olası nedeninin, farklı yüzey levhası-köpük etkileşim mekanizmasının olabileceğini belirtmişlerdir. Çünkü darbe yüklerinin üst yüzeydeki levha delinmeden önce merkezdeki köpüğe ulaşması basma gerilimi değerinin artmasına yol açmaktadır. Merkezdeki köpükte bölgesel gerilmenin artması üst yüzeydeki maksimum yük değerinin artmasına yol açar.



Resim 4. 6. Yarı statik delme (a) Üst yüzey (b) Alt yüzey [57].

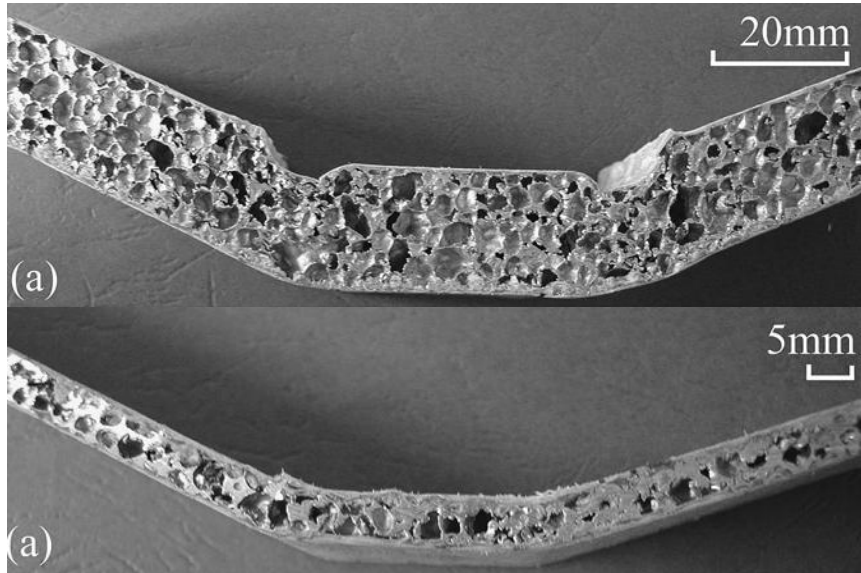


Şekil 4. 3. Delme kuvveti ve yerdeğiştirme eğrisi [57].

Çizelge 4. 1. Darbe yükleri altında üst yüzeyde maksimum değerler [57].

Çarpma hızı (m/s)	0,0001	0,0001	23	27	44	46
Numune kaybı (g)	43,5	44,9	43,7	41,6	43,7	46
Köpük yoğunluğu (kg/m ³)	233	246	235	215	235	256
Üst yüzey yükü (N)	7193	7925	8236	7670	8461	10321

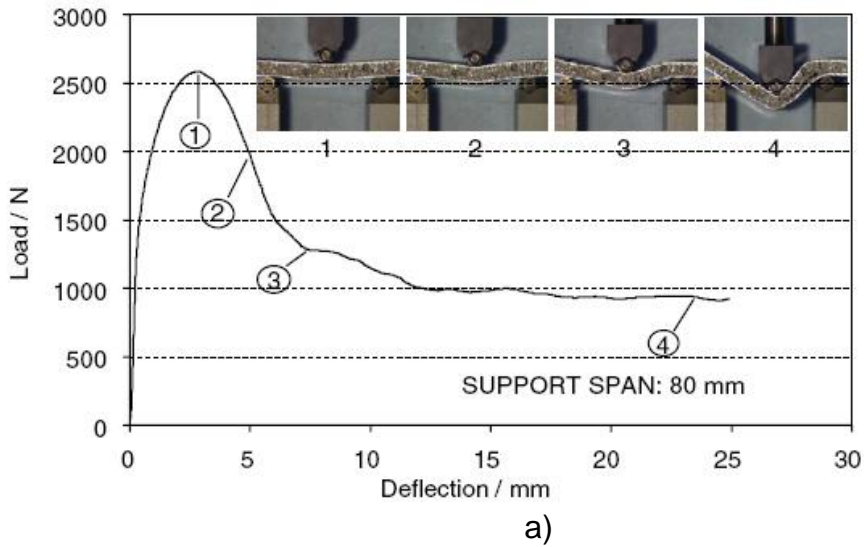
Styles ve arkadaşları [58] farklı kalınlıklardaki alüminyum köpük merkezli ve termoplastik yüzey levhasına sahip sandviç köpüklerde gözenek boyutlarının eğme dayanımlarına etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda, ince numunelerin dış yüzeyinde bulunan levhada deformasyon meydana gelirken merkezde bulunan metalik köpükte deformasyon meydana gelmediği ve kalınlığın artmasıyla merkezdeki metalik köpükte deformasyonun meydana geldiği sonucuna varmışlardır (Resim 4. 7). Ayrıca bu çalışmada sandviç yüzey kalınlığının artmasıyla indentör şekline benzer deformasyon meydana gelmediğini bu numunelerde kayma mekanizmasının etkin olduğu belirtilmiştir.



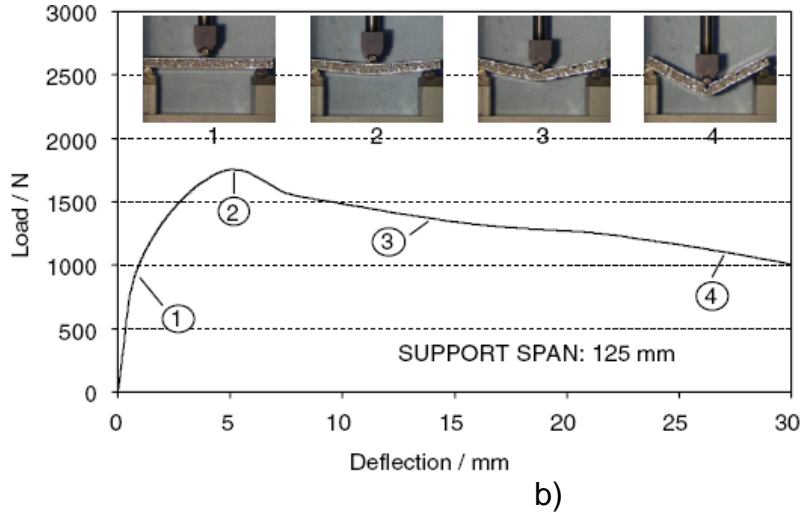
Resim 4. 7. Farklı kalınlığa sahip sandviç köpüklerin eğme dayanımı sonrasında meydana gelen deformasyon [58].

Kesler ve Gibson [59] alüminyum köpük ve alüminyum yüzey levhasından oluşan farklı boyutlardaki sandviç köpüklerin üç nokta eğme dayanımını çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada sandviç köpüğün uzunluk, genişlik ve yüksekliğinin üç nokta eğme dayanıma etkisinin olduğunu belirtmişlerdir [59].

Curipi ve Montanini'ye [60] göre dinamik ve statik yükler altında yapılan eğme dayanımını performansının span mesafesine bağlı olarak farklı çökme mekanizmaları göstermektedir. Yaptıkları çalışmada, 125 mm olan destekler arası mesafede sandviç köpüğün orta bölgeden kıvrılan iki eşit parça şeklinde olduğu, destekler arası mesafenin 80 mm olması durumunda sandviç köpüğün orta bölgesinden asimetrik çökme mekanizması gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde destekler arası mesafesi arttıkça elde edilen maksimum eğme dayanımı değerinin arttığı sonucuna varmışlardır (Şekil 4. 4).

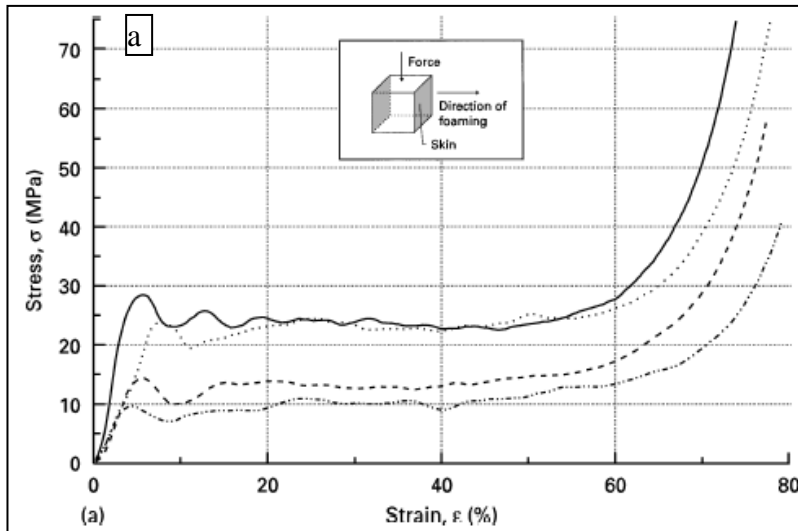


Şekil 4. 4. ASK'lerin farklı destek mesafesinde yapılan eğme dayanımları [60]
a) 80 mm, b) 125 mm

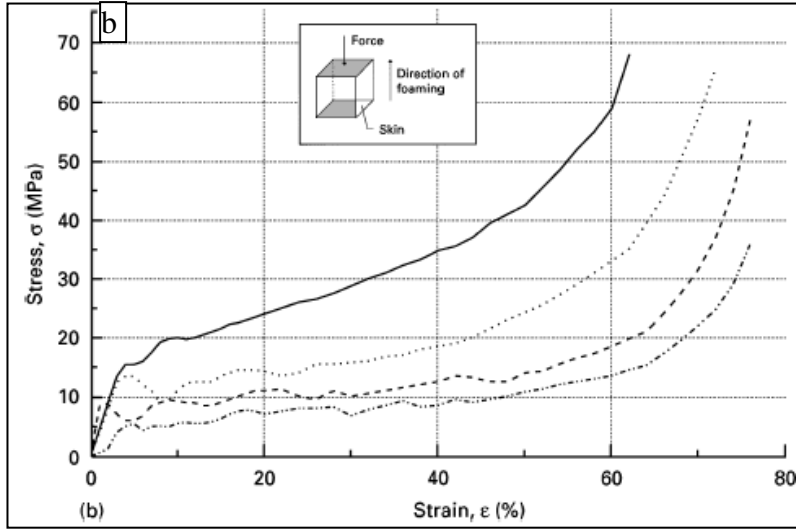


Şekil 4. 4. (Devam)ASK'lerin farklı destek mesafesinde yapılan eğme dayanımları [60], a) 80 mm, b) 125 mm

Banhart ve Baumister farklı yoğunluğa sahip olan yüzey tabakalı köpükler hazırlamış ve köpürtme yönünün basma dayanımlarına etkilerini araştırmışlardır (Şekil 4. 5). Yaptıkları çalışmalarda köpürtme yönüne dik olarak basma dayanımının köpürtme yönünde yapılan basma dayanımından yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada her iki basma dayanımı deneylerinde de yoğunluğun artmasına bağlı olarak basma dayanımının artmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır [28].

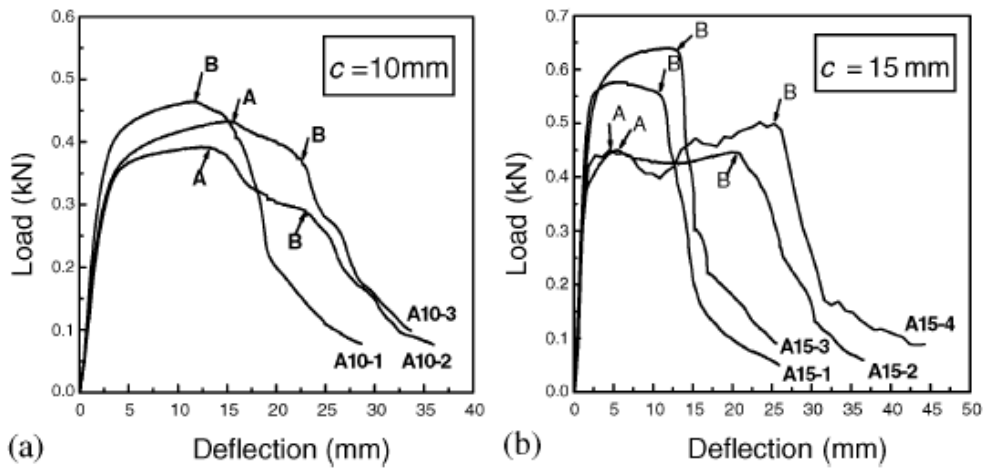


Şekil 4. 5. ASK'lerin köpürtme yönüne göre değişen basma dayanımları [28]
a) Köpürtme yönü zıt yönü, b) Köpürtme Yönü

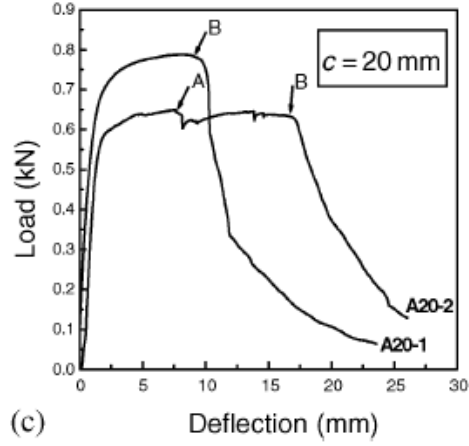


Şekil 4. 5. (Devam) ASK'lerin köpürtme yönüne göre değişen basma dayanımları [28], a) Köpürtme yönü zıt yönü, b) Köpürtme Yönü

Yu ve arkadaşları [61] açık gözenekli alüminyum köpükleri akrilik yapıştırıcı kullanarak 0,5 mm kalınlığındaki iki alüminyum levha arasında yapıştırmak suretiyle sandviç köpük üretmişlerdir. Ürettikleri sandviç köpüklerin merkezindeki alüminyum köpüğün yüksekliğini değiştirerek statik ve dinamik testler yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada merkezdeki alüminyum köpüğün yüksekliğinin artmasının maksimum eğme dayanımı değerinin artmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır (Şekil 4. 6).



Şekil 4. 6. Farklı yükseklikte Al köpüğe sahip ASK'lerin eğme dayanımı grafikleri [61].



Şekil 4. 6. Farklı yükseklikte Al köpüğe sahip ASK'lerin eğme dayanımı grafikleri [61].

Ayrıca bu çalışmada, alüminyum köpük merkezli sandviç köpüklerde gerilmelere bağlı olarak önce yüzey levhalarında buruşmalar oluşmuş ve daha sonra merkezdeki köpüğün alt tarafında çatlaklar oluştuğu belirtilmiştir (Resim 4. 8).



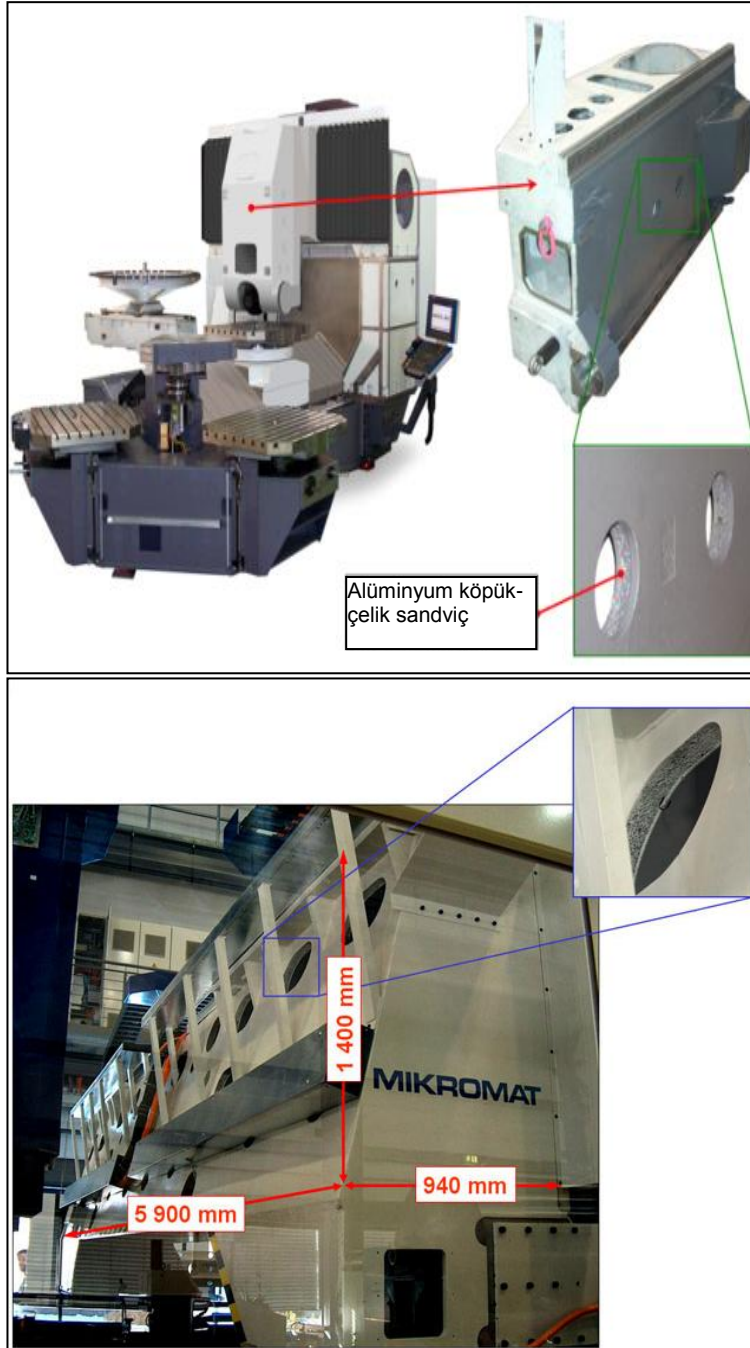
Resim 4. 8. Farklı yükseklikte Al köpüğe sahip ASK'lerin eğme dayanımı deformasyonu [61]

Yüksek sertlik ve dayanıma sahip olan köpük bazlı sandviç yapılar havacılık ve denizcilik sektörünü içeren çeşitli mühendislik endüstrilerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Polivinilklorür, polietermid ve poliüretan gibi polimerik malzeme bazlı merkezdeki köpükler düşük sıcaklıkta katılaştıran termoset bazlı kompozit tabakalar ile birlikte kullanılmaktadır [62]. Merkezdeki malzemenin mekanik özellikleri sıcaklığa duyarlı olduğu için bu sistemler termal şartlarda kullanım için uygun değildir. Bu malzemelerin sıcaklık sınırları fiber takviyeli polipropilen gibi termoplastik esaslı kompozitlerle kullanımlarını imkânsız kılar. Diğer taraftan, hafif olan alüminyum köpüklerin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanım alanları genişlemektedir. Kapalı gözenekli alüminyum köpükler mükemmel ses geçirmezlik özelliği, elektromagnetik dalga koruma, düşük termal iletkenlik, düşük toksiklik özelliğinin yanında mükemmel dayanıklılık karakteristiği göstermektedir [63].

Köpürtülebilir ön şekil sandviç köpük yapı deforme edilerek tamamen karmaşık şekilde üretilebilir. Bu yönü bal peteği ve katmanlı yapı gibi diğer yapılardan avantajlı yönüdür. Yeni konstrüksiyonel prensipleri ile birlikte otomobillerde geleneksel çelikler yerine kullanılabilir ve ağırlığın önemli oranda azalmasına yol açar. Alüminyum sandviç köpükler tasarımlarda parça sayısını azaltabilir. Ayrıca performansı artırırken diğer taraftan montajı kolaylaştırır ve maliyeti azaltır. Sandviç köpükler özellikle taşıtlar için ağırlığın azaltılması ve dayanımın artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Örneğin; kaporta, radyatör kapağı, bagaj kapağı ve açılır tavan sağlamlık ve ağırlık yönünden önem taşımaktadır [29,64].

İmalat makinelerinin yüksek performansta, hızlı hareket edebilmeleri için oldukça sağlam ve hafif olmaları gerekir. Fakat çalışma esnasında genellikle titreşime veya dinamik yüklere maruz kalırlar. Bu problemleri minimize edebilmek için alüminyum sandviç köpükler hafif ve yüksek enerji sönümlenme kabiliyetlerinden dolayı makine imalatında yerini almıştır. Resim 4.9'da sandviç köpüklerin ses ve titreşim azaltma özelliklerinden dolayı titreşimli ve

gürültülü çalışan makinelerde kullanılabildiğini gösteren resimler verilmiştir [65].



Resim 4. 9. Sandviç metalik köpüklerin makine sektöründe kullanımı [65].

Köpük sandviç metaller ve alüminyum köpükten yapılmış hafif ve sağlam yapılar taşıtlar için ağırlığın azaltılması ve sağlamlığın artırılmasına katkıda

bulunmaktadır (Resim 4. 10). Alman üretici Karman üç boyutlu sandviç panelleri yarış otomobillerinin ön ve arka tampon bölgelerde kullanılabilirliğini test etmiştir. Çünkü bu bölgeler ağırlık ve dayanım açısından araçlar için ciddi problemlere neden olmaktadır. Yapılan test sonucunda sandviç panellerin diğer çelik panellere oranla %25 ağırlık tasarrufu, %700'de dayanım artış sağladığı görülmüştür [66].



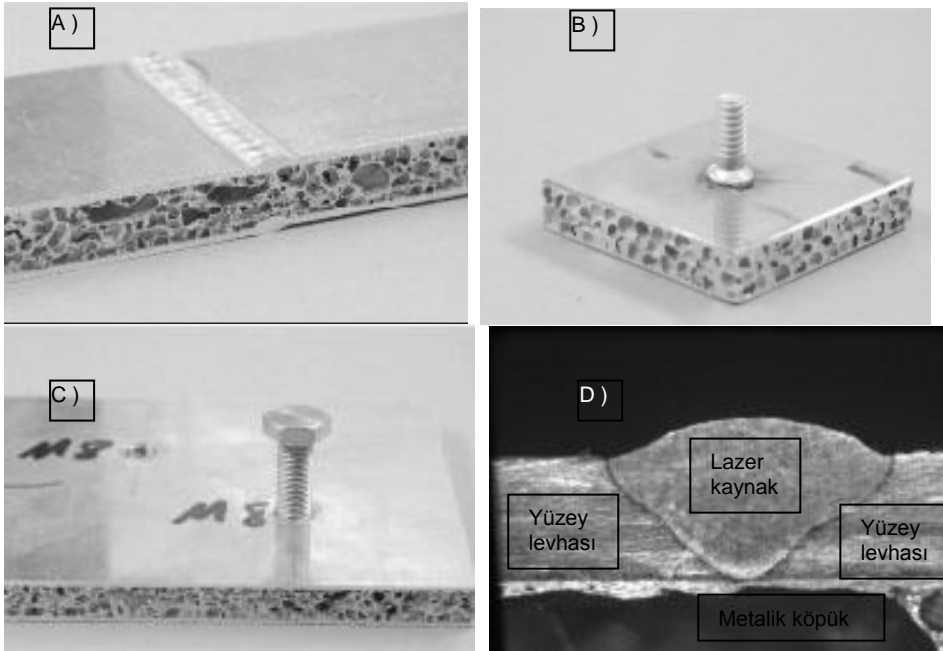
Resim 4. 10. ASK'lerin araçların taşıyıcı kollarında kullanımı [66].

Köpük metallerin ve hafif yapıların hava-uzay endüstrisindeki kullanımı otomotiv endüstrisindeki ile benzerlik göstermektedir. Uzay endüstrisinde kullanılan petek şeklindeki yapıların maliyeti, alüminyum köpük levhalara veya metal köpük sandviç panellere oranla daha yüksektir [67]. Dolayısıyla uzay endüstrisi gözenekli malzemeler arasında yer alan alüminyum sandviç köpüklere yönelmiştir. Resim 4. 11'de Ariane 65 isimli rokette kullanılan alüminyum köpükten yapılmış koni biçimli bir adaptörün genel görüntüsü ve bazı bölgelerinin kesiti verilmiştir [67].



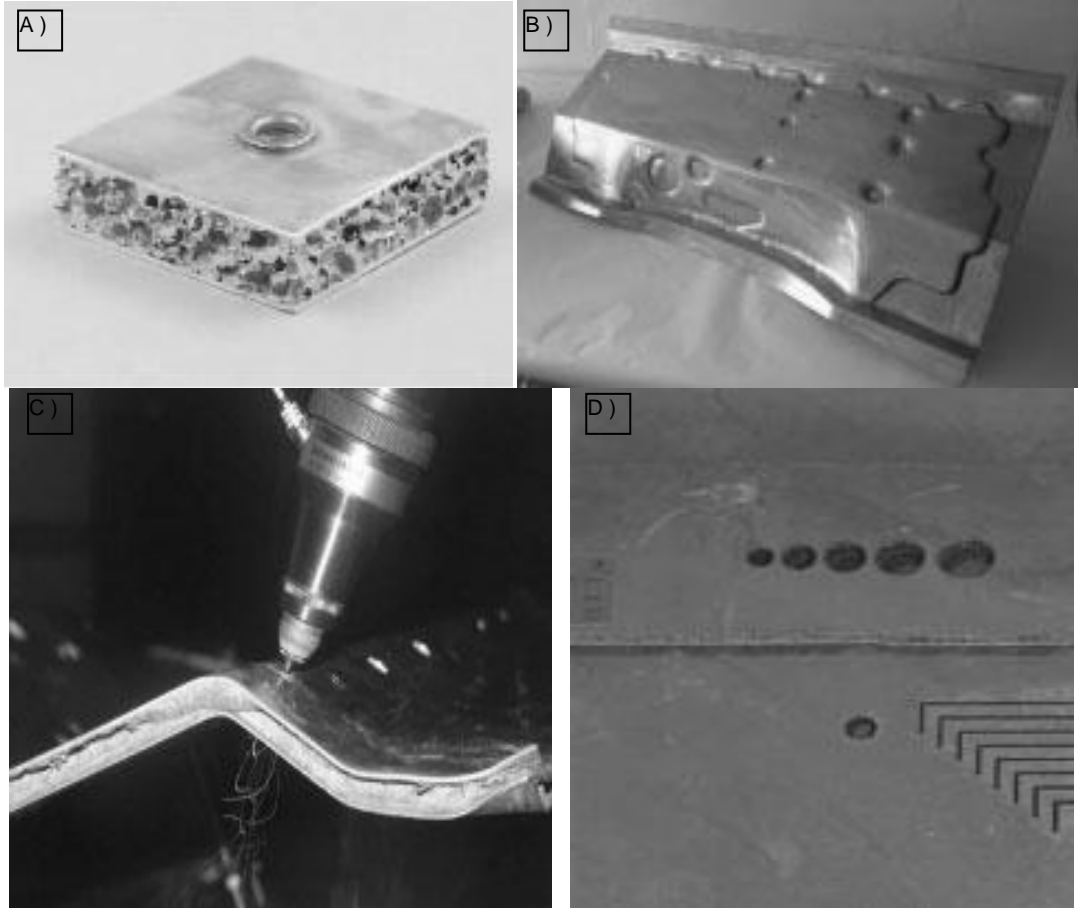
Resim 4.11 Ariane 65 isimli rokette kullanılan bir adaptörün genel görüntüsü ve belirli bölgelerin kesit görüntüleri [67]

Metalik köpüklerin çeşitli birleştirme yöntemleri ile birleştirilmeleri zordur. Özellikle kaynaklı birleştirmelerde kaynak bölgesinde gözenekli yapı bozulur. Resim 4. 12' de sandviç şeklinde üretilen metalik köpüklerin değişik kaynak ve birleştirme teknikleri kullanılarak birleştirilebildiği görülmektedir [54].



Resim 4. 12. Sandviç köpüklerin farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi [54]
a) TIG kaynağı; b) Saplama kaynağı c) Sürtünme kaynağı; d) Lazer kaynağı

Sandviç köpükler kaynakla birleştirme dışında değişik yöntemlerle şekillendirilebilirler. Bu yöntemlerden bazıları su jeti, testere ile kesme, lazer kesme, punch ve perçindir. Sandviç köpüklerin ikincil işlemlerden bazıları Resim 4.13'te verilmektedir.



Resim 4. 13. Sandviç metalik köpüklere uygulanan ikincil işlemler [54]
a) Perçin; b) Punch; c) Lazer kesim; d) Su jeti

Köpürtülmüş sandviç metaller asansörlerde ağırlığın azaltılmasında dolayısı ile enerji tüketiminin azaltılmasında kullanılacak malzemelerdir. Asansörlerin yüksek hızda hızlandırılması ve yavaşlatılmasında ağırlığın en önemli faktörlerden biri olduğu düşünülürse metalik köpüklerin bu alandaki önemide anlaşılabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada EN AC 42200 ile ifade edilen [68] ve A357' ye eşdeğer olan AlSi7Mg0,6 karışımı ve bu karışıma seramik parçacıkları ilave edilerek ticari saflıktaki alüminyum levhalar arasında köpürtmek suretiyle sandviç metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ECKA firması tarafından üretilen AS 91/S kodlu % 99,7 saflıktaki alüminyum tozları, Atlantic Equipment Engineers firmasından temin edilen %99,9 saflıktaki silisyum tozları ve Magnezyum ve Metal Tozları Endüstri A.Ş.'nden temin edilen %99,9 saflıkta magnezyum tozları kullanılmıştır. Köpürtücü madde olarak Aldrich firmasından temin edilen %98 saflıktaki TiH₂ tozları kullanılmıştır. Parçacık takviyeli sandviç köpük üretimi için ise Aldrich firmasından temin edilen B₄C, Aldour firmasından temin edilen Al₂O₃ ve SiC tozları kullanılmıştır. Metalik köpük üretiminde kullanılan tozların genel özellikleri ve toz boyutları Çizelge 5. 1'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1. Çalışmada kullanılan seramik ve metal tozların özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Toz Boyutu (µm)
Al	2,7	660	<160
Si	2,33	1410	<10
TiH ₂	3,91	<400	<45
Al ₂ O ₃	3,97	2040	<12
B ₄ C	2,50	2350	<10
SiC	3,10	2730	<8

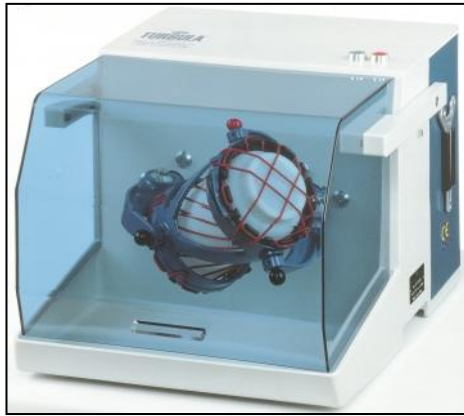
Alüminyum esaslı ve parçacık ilaveli sandviç köpük üretimi için kullanılan ve Yıldırım Alüminyum Levha A.Ş. tarafından üretilen ticari saflıktaki alüminyum levhaların kataloglarında yer alan kimyasal analizi Çizelge 5. 2' de verilmiştir.

Çizelge 5. 2. Ticari saflıktaki alüminyum levhaların kimyasal bileşimi.

Element	Al	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ti	Cu
%	99,50	0,25	0,05	0,07	0,4	0,05	0,05	0,05

5.2. Tozların Karıştırılması

Sandviç metalik köpük üretimine başlamadan önce, Sartorius marka 0,1 mg hassasiyetteki terazi ile Al, %7 Si, %0,6 Mg, %0,8 TiH₂ tozları ve %5 oranlarında da Al₂O₃, B₄C ve SiC parçacıkları tartılmıştır. Daha sonra tartılan bu tozlar Turbula marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcıda 30 dakika boyunca karıştırılmıştır (Resim 5. 1).



Resim 5. 1. Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı.

5.3. Karışım Tozlarının Preslenmesi

Yaklaşık 1600 g ağırlığındaki karışım tozlar 260 ton basma kapasitesine sahip özel yapım hidrolik pres yardımıyla 300 MPa basınçta kalıp içerisinde tek yönlü olarak preslenerek 100 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde TM

blok numuneler hâline getirilmiştir. Bu sayede %75 yoğunluğa sahip silindirik blok numuneler elde edilmiştir (Resim 5. 2).



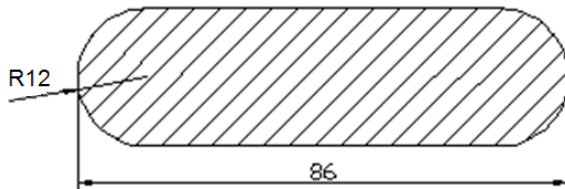
Resim 5.2. Preslenmiş ham yoğunlukta TM blok numune.

5.4. Preslenmiş TM Blok Numunelerin Ön Isıtma İşlemi

Preslenmiş ham yoğunluktaki TM blok numuneler sıcak olarak ekstrüze edebilmek ve sıcak haddeleme yapabilmek için ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Ön ısıtma işlemi için numuneler Protherm marka PLF 120/12 tipindeki 1000 °C kapasiteli fırın içerisinde 500 °C sıcaklıkta bekletilmiştir.

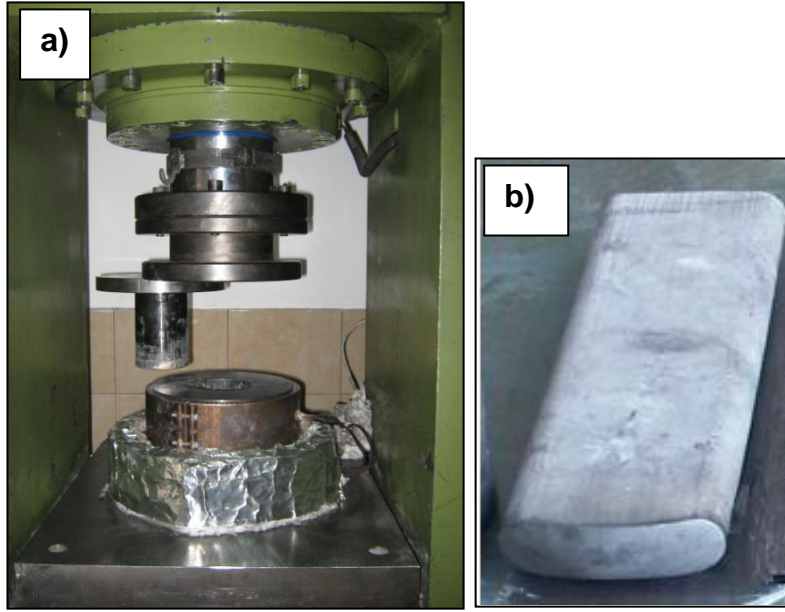
5.5. Numunelerin Ekstrüzyon İşlemi

Ön ısıtma işlemine tabi tutulmuş TM blok numuneler Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında bulunan 260 ton kapasiteli özel yapım hidrolik pres yardımıyla ve ekstrüzyon kalıbı kullanılarak 500 °C sıcaklıkta 1/4 oranında ekstrüze edilmiştir. Ekstrüzyon işleminde kullanılan nozul ölçüleri Şekil 5. 1' de verilmiştir.



Şekil 5. 1. Ekstrüzyon işleminde kullanılan nozul ölçüleri.

Presleme sonucu $\text{Ø}100 \times 100$ mm boyutlarında ve %75 yoğunluğa sahip olan numunelerin ekstrüzyon işlemi sonucunda boyutları $285 \times 24 \times 86$ mm ve yoğunluğu %95'e yükselmiştir. Resim 5. 3'te ekstrüzyon ünitesi ve ekstrüze edilen numunenin resimleri verilmiştir.



Resim 5. 3. a) Sıcak ekstrüzyon ünitesi; b) Ekstrüzyon sonrası elde edilen numune.

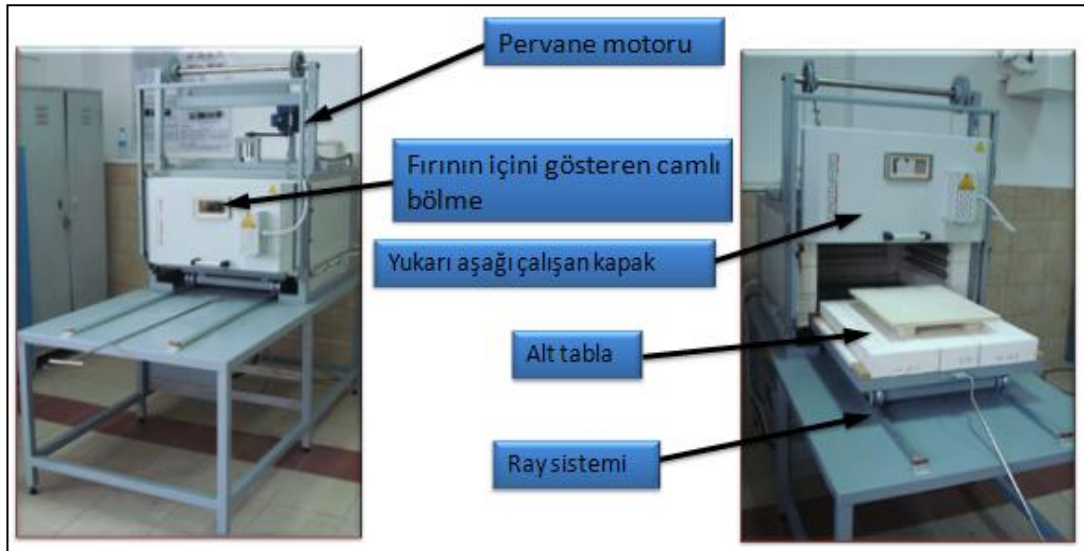
Presleme sonrası 1600 g olan numune ağırlığında ekstrüzyon işlemi sonucunda 150 g malzeme kaybı meydana gelmiş ve 1450 g olmuştur. Bu durum ekstrüzyon işlemi esnasında, ekstrüzyon kalıbı içerisinde kalan parçadan kaynaklanmıştır.

5.6. Haddelme İşlemi

$\frac{1}{4}$ oranında ekstrüze edilen numuneler ticari saflıktaki alüminyum levhalar arasında $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 1 saat ön ısıtma işlemine tabi tutulduktan sonra haddelenerek %50 sıcak deformasyon işlemine tabi tutulmuştur. Haddelme işlemi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında bulunan ve özel yapım olan haddelme cihazında yapılmıştır.

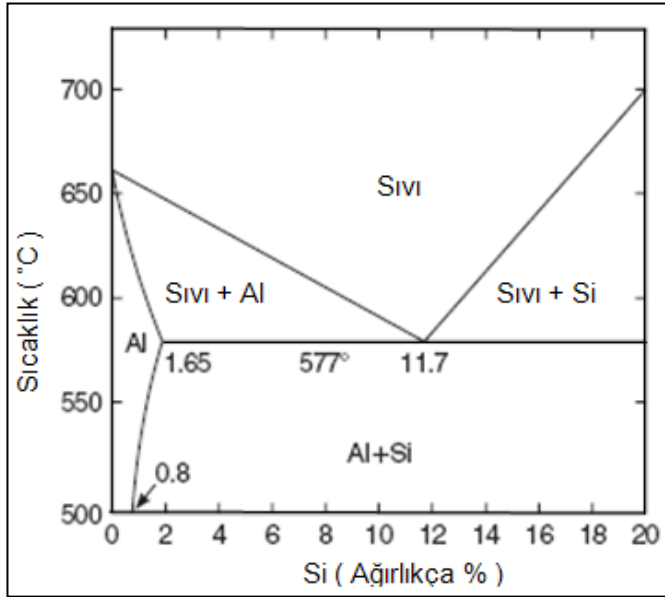
5.7. Köpürtme İşlemleri

Haddeleme işleminden sonra köpürtmeye hazır hâle getirilen ön şekil numuneler Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında bulunan ve özel tasarlanan 1000 °C kapasiteli Protherm marka fırın (Resim 5. 4) içerisinde köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem serbest halde ve kalıp içerisinde koruyucu gaz kullanmadan gerçekleştirilmiştir.



Resim 5. 4. Köpürtme işleminde kullanılan arabalı, kamaralı tip tav fırını.

Silisyum ilavesi alüminyumun ergime sıcaklığını düşürmekte ve alüminyum, %12 silisyumla 578 °C sıcaklıkta ötektik yapıyı oluşturmaktadır (Şekil 5. 2). Silisyumun, alüminyumun ergime sıcaklığını ötektik sıcaklık olan 578 °C'ye kadar düşürmesi nedeniyle alüminyum esaslı sandviç köpük üretiminde köpürtme sıcaklığı olarak 650°C, 670°C, 690°C ve 710°C sıcaklıkları kullanılmıştır. Özellikle Al gibi düşük sıcaklıkta ergiyen malzemelerle yüzey tabakası oluşturan metalik köpüklerde düşük ergime sıcaklığı önemlidir. Köpürtme işlemi için ön şekil numuneler köpürtme sıcaklığında bekletilen fırın içerisine yerleştirilmiş ve 6-18 dakika aralığındaki sürelerde köpürtme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürtme işlemi sonrası elde edilen metalik köpük numuneler fırın dışında kendi halinde soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 5. 2. Al-Si faz diyagramı [41].

5.8. Yoğunluk Ölçümü Ve Gözeneklilik Oranının Belirlenmesi

Elde edilen alüminyum sandviç köpükler (ASK) 0,1 mg hassasiyetindeki Sartorius marka terazide kuru ve su içerisinde tartılmış ve Arşimet formülü yardımıyla yoğunlukları hesaplanmıştır. Yoğunluk hesabı için kullanılan Arşimet prensibi Eşitlik 5.1’de verilen formüle göre yapılmıştır [9].

$$\rho^* = \frac{m^*}{m^* - m_s} \quad (5.1)$$

ρ = Köpüğün yoğunluğu (g/cm^3),

m^* = Köpüğün havadaki ağırlığı (g),

m_s = Köpüğün su içerisindeki ağırlığı (g)

Gözeneklilik miktarı ise Eşitlik 5. 2’ de verilen formüle göre yapılmıştır [42]. Bu formülde V^* köpüğün hacmini, V ise köpürtme öncesi numunenin ilk hacmini ifade etmektedir.

$$\text{Gözeneklilik} = \left(1 - \frac{V}{V^*}\right) \times 100 \quad (5.2)$$

5.9. Lineer Uzama Oranlarının Belirlenmesi

Sandviç metalik köpüklerin lineer uzama oranları (L_u) literatürden [10] yararlanılarak aşağıdaki Eşitlik 5.3'e göre hesaplanmıştır. Bu eşitlikte, L_s köpüğün maksimum yüksekliğini (mm) ve L_i köpürtme öncesi ön şekil numunenin yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.

$$L_u = \frac{L_s - L_i}{L_i} \times 100 \quad (5.3)$$

5.10. Makro İnceleme Ve Metalografik Muayene

Serbest halde köpürtme sonucu elde edilen metalik köpüklerin metalografik incelemeler için ortadan enine kesitleri alınmıştır. Numunelerin enine kesit yüzeyleri sırasıyla 240, 400, 800, 1200 numaralı zımparalarda su altında zımpara yapıldıktan sonra, 3 μm 'lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Elde edilen numunelerin aynı ölçekteki makro fotoğrafları üzerinde gözenek boyutları belirlenmiştir. Sandviç metalik köpüklerin Al_2O_3 , B_4C ve SiC parçacıkları ile matris ara yüzeyleri Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Bu çalışmada yapılan bütün köpürtme deneyleri ve metalografik incelemeler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

5.11. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

5.11.1. Basma deneyi

Sandviç köpük malzemelerin basma deneyleri TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan 10 ton kapasiteli Instron marka çekme/basma cihazı ile yapılmıştır. Basma deneyi

için ASTM C 363-03 standardına göre numuneler hazırlanmış ve gerekli hesaplamalar standartta belirtilen formüllere uygun olarak yapılmıştır (Resim 5. 5).



Resim 5. 5. Basma testleri için hazırlanan düzenek.

5.11.2. Eğme deneyi

Sandviç köpük malzemelerin eğme deneyleri Hitit Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında bulunan, Shimadzu Autograph marka AG 100 model 100 kN kapasiteli universal test cihazı ile yapılmıştır (Resim 5. 6). Eğme deneyi için 20x20x150 mm ölçülerinde alüminyum sandviç köpükler hazırlanmış ve gerekli hesaplamalar ASTM C 393 standardına göre yapılmıştır.

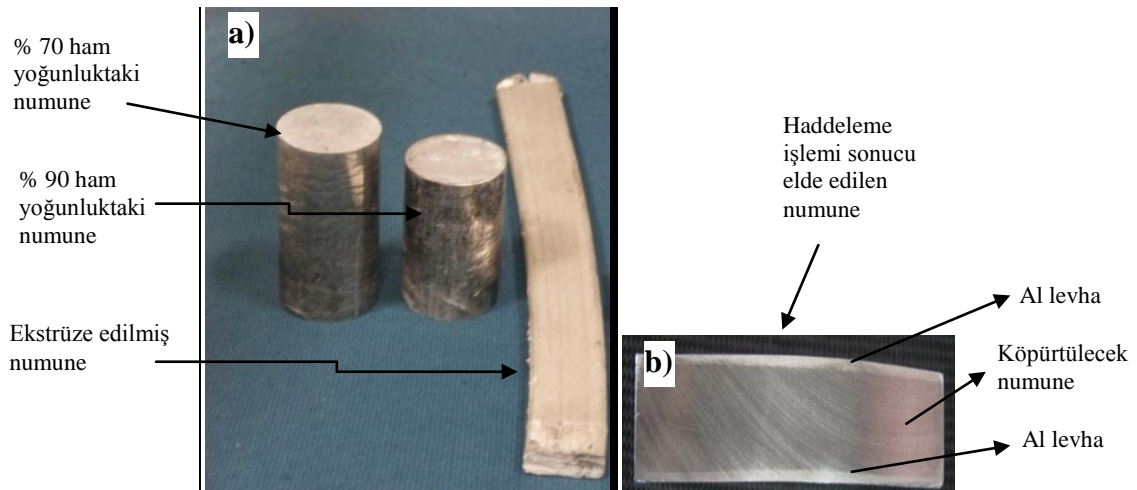


Resim 5. 6. Üç nokta eğme deneyi.

6. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

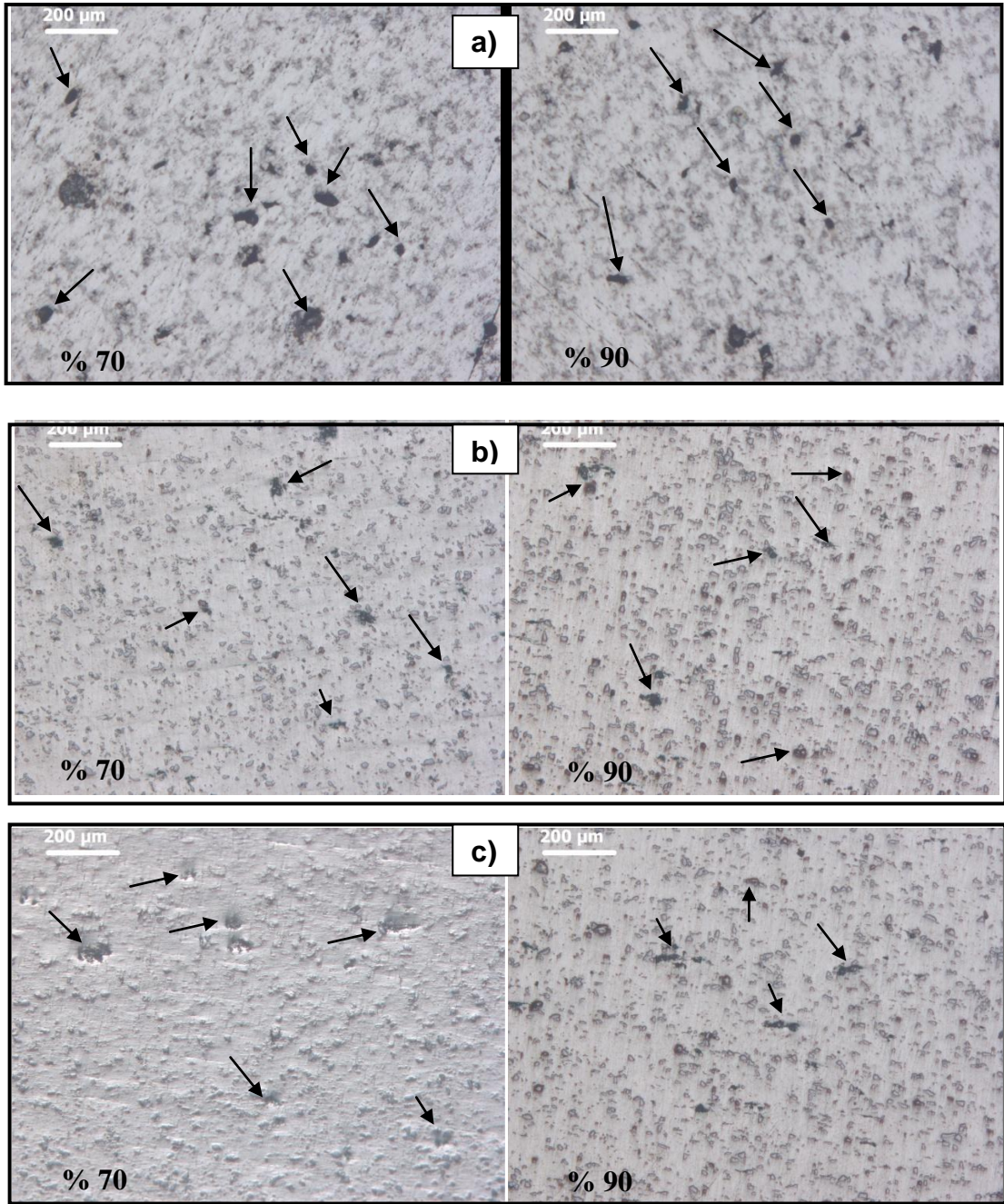
6.1. Ham Yoğunluğun Köpürebilirliğe Etkileri

Alüminyum esaslı sandviç köpük üretiminde ham yoğunluğun köpürme özellikleri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada Al, %7 Si, % 0,6 Mg tozları ve %0,8 TiH₂ tozları hassas terazide tartılarak üç boyutlu karıştırma yapabilen turbulada 30 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım tozlar çelik kalıp içerisinde tek yönlü olarak 300 MPa ve 500 MPa basınç altında preslenerek %75 ve %90 ham yoğunlukta silindirik blok numuneler elde edilmiştir. Elde edilen blok numuneler 500 °C sıcaklıkta ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Ekstrüze edilen numuneler, ticari saflıkta ve 1 mm kalınlığındaki Al levhalar arasında 500 °C sıcaklıkta haddelenerek ön şekilli numuneler elde edilmiştir (Resim 6. 1). Ön şekilli numuneler 690 °C köpürtme sıcaklığında ve 12 dakika köpürme süresinde köpürtülerek sandviç metalik köpükler üretilmiştir. Köpürtme sonrasında lineer uzama, yoğunluk ve gözenek yapıları incelenmiştir.



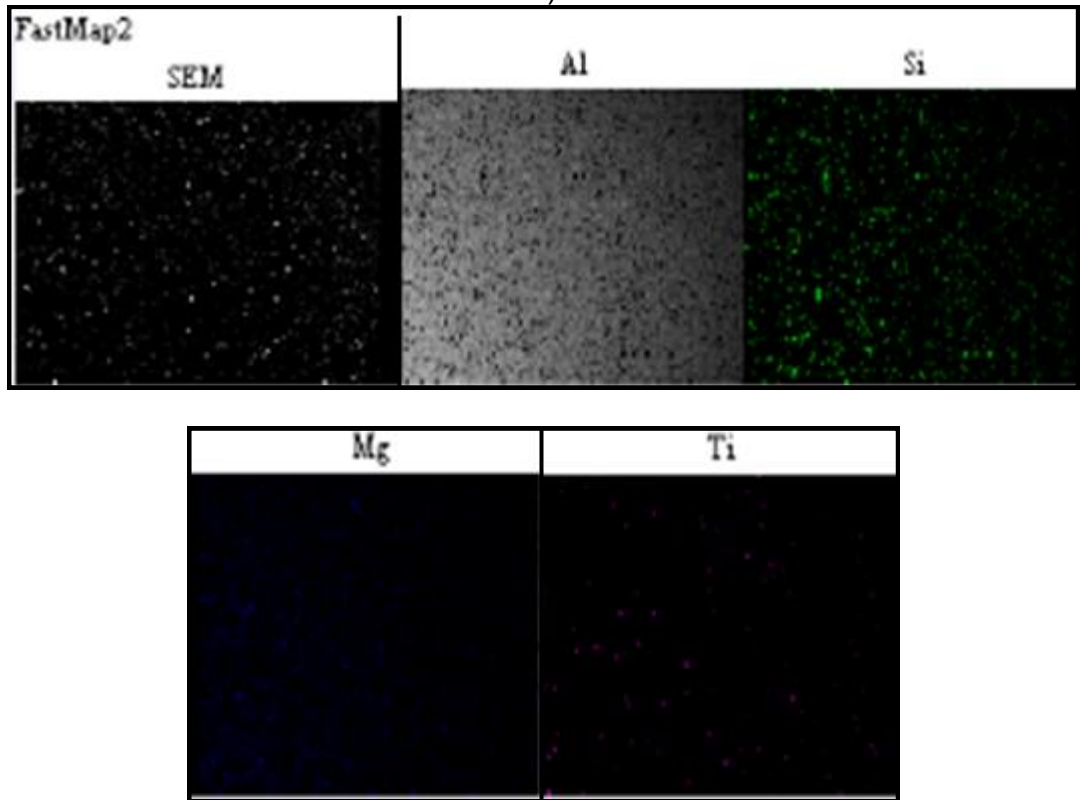
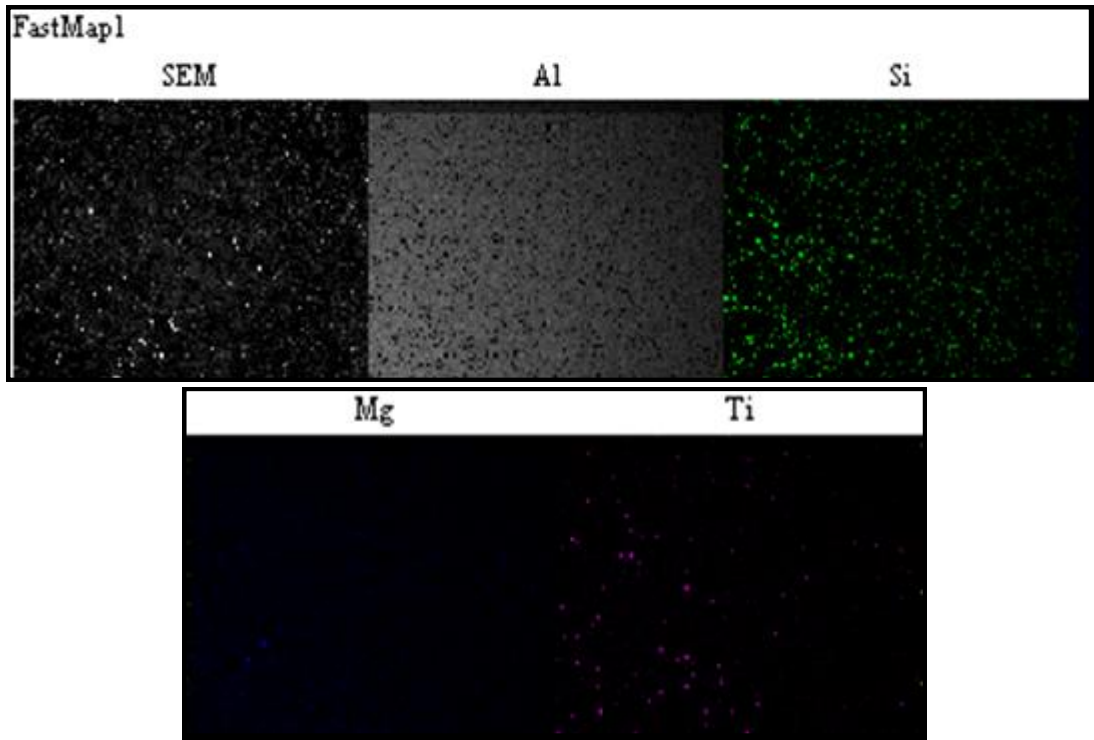
Resim 6. 1. a) %70 ve %90 ham yoğunlukta blok numuneler ile ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş numuneler; b) Köpürtme öncesi sandviç numune.

Ham yoğunluğa sahip blok numuneler ile ekstrüzyon ve haddeleme işlemi yapılmış numunelerin mikroyapı resimleri Resim 6. 2'de sırasıyla verilmiştir. Farklı presleme basıncı kullanılarak elde edilen farklı yoğunluktaki numunelerde oluşan gözenekler homojen dağılım sergilemiştir. Her iki numunede de oluşan gözeneklerin genel olarak toz metalurjisinde karşılaşılan keskin kenarlı olmadıkları görülmüştür. Presleme sonrası %70 ham yoğunluğa sahip numunenin yapısında oluşan gözeneklerin, %90 ham yoğunluğa sahip numunede oluşan gözeneklerden daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Resim 6.2a). Ekstrüzyon işleminden sonra yapıda bulunan gözeneklerin küçüldüğü gözlenmiştir (Resim 6. 2b). Haddeleme işleminden sonra ise hem %75 ham yoğunluktaki numunede hem de %90 ham yoğunluğa sahip numunede oluşan gözeneklerin mekanik işlemlere bağlı olarak yönlenmişlerdir. % 90 ham yoğunluğa sahip numunede oluşan boşluklar daha küçük olduğu için haddeleme işlemi sonucunda bu boşlukların hemen hemen kapandıkları görülmüştür (Resim 6. 2c).



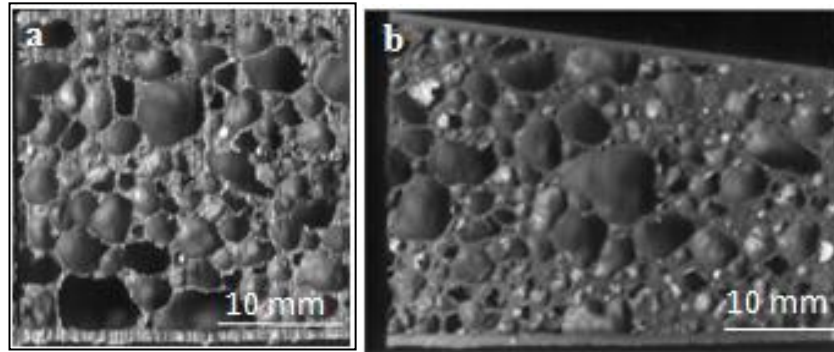
Resim 6. 2. a) %75 ve %90 ham yoğunlukta numunelere ait gözenek dağılımı (okla gösterilen bölgeler);
 b) Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş numuneler.
 c) Haddelme sonrası sandviç numunelerin mikroyapı resimleri.

Haddelme işlemi esnasında azalan yüzey alanı Si ve Mg parçacıklarının birbirlerine daha da yaklaşmalarına neden olmuştur. Her iki numunede de Si ve Mg parçacıklarının homojen dağılım sergilediği gözlenmiştir. Bu durum SEM'de yapılan fast map analizinden de tespit edilmiştir (Resim 6. 3).



Resim 6. 3. a) %90 ve %70; (b) ham yoğunluklara sahip numunelerin haddelenme sonrası Fast Map görüntüleri.

Resim 6. 4'te %75 ve %90 ham yoğunlukta üretilen ASK'lere ait makroyapı resimleri görülmektedir. Her iki sandviç metalik köpükte de gözenek dağılımının kısmen homojen ve gözenek morfolojisinin benzer olduğu görülmüştür. %75 ham yoğunluğa sahip ASK'de ortalama gözenek boyutunun 2,4 mm, lineer genişleme oranının %254 ve yoğunluğunun 0,89 g/cm³ olduğu tespit edilirken %90 ham yoğunluktaki numuneden elde edilen ASK'de ortalama gözenek boyutunun 2,8 mm, lineer genişleme oranının %280, yoğunluğunun 0,86 g/cm³ olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ekstrüzyon öncesi elde edilen blok numunelerin ham yoğunluğunun köpürmeye önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır ve bu nedenle bundan sonra yapılan çalışmalarda %75 ham yoğunlukta numuneler kullanılmıştır. Bulunan bu sonuç metalik köpük üretiminde kalıp ömrü ve maliyeti açısından önemlidir.

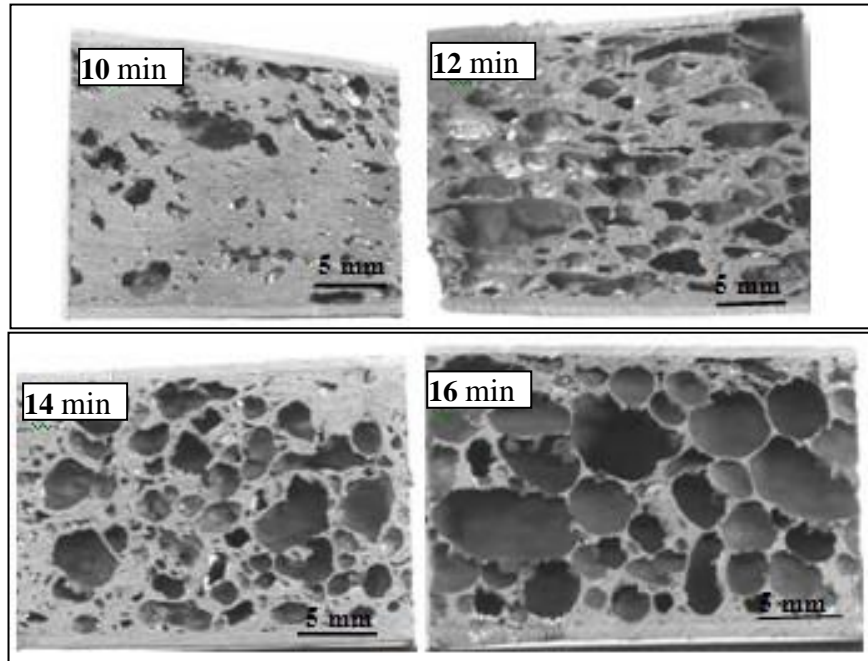


Resim 6. 4. Farklı ham yoğunluğa sahip blok numunelerden elde edilen sandviç metalik köpükler: a) %90 yoğunluk; b) %70 yoğunluk.

6.2. 1 mm Kalınlıkta Al Levha Kullanılarak Üretilen Sandviç Metalik Köpükler

Sandviç metalik köpük üretimi için yapılan çalışmalarda, AlSi7Mg0,6 ve %0,8 TiH₂ toz karışımları sıkıştırılıp ekstrüze edildikten sonra ticari saflıktaki 1 mm kalınlığındaki Al levhalar arasında haddelenerek köpürmeye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra bu numuneler 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında ve 6-16 dakika aralığında köpürtme süreleri kullanılarak köpürtme işlemine tabi tutulmuştur.

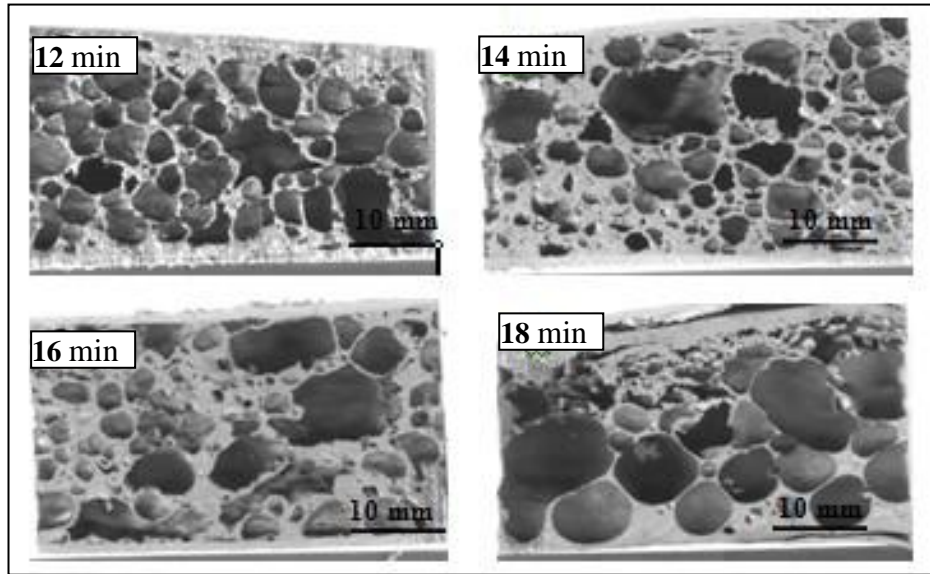
Aşağıda Resim 6.5' te 650°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde [10,12,14 ve 16 dakika) köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir. Sandviç metalik köpüklerde homojen dağılıma sahip gözenekler oluşmuş ancak oluşan bu gözeneklerin farklı boyutlarda olduğu görülmüştür. 10 dakika köpürtme süresinde gözeneklilik hemen hemen yokken 12 dakika köpürtme süresinde gözeneklilik oluşmuş ancak oluşan gözeneklerde daha önce uygulanan mekanik işlemlere bağlı olarak yönelme meydana gelmiştir. Bunun nedeninin gözeneği oluşturan gazın iç basıncının küresel yapı oluşturmaya yetmediği dolayısı ile haddeme veya ekstrüzyon yönünde büyüme gösterdiği düşünülmektedir. 14 dakika köpürtme süresinde belirgin şekilde gözeneklilik oluşmuştur. Özellikle 16 dakika köpürtme süresinde daha düzgün geometrik şekilli gözenekler meydana gelirken gözenek duvar kalınlıklarında incelleme ve gözeneklerde kısmen birleşme meydana gelmiştir.



Resim 6. 5. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpüklerin makro görünüşleri.

Yukarıdaki resimlerde görüldüğü üzere 650°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresinde gözeneklilik oluşmadığı için 670°C köpürtme

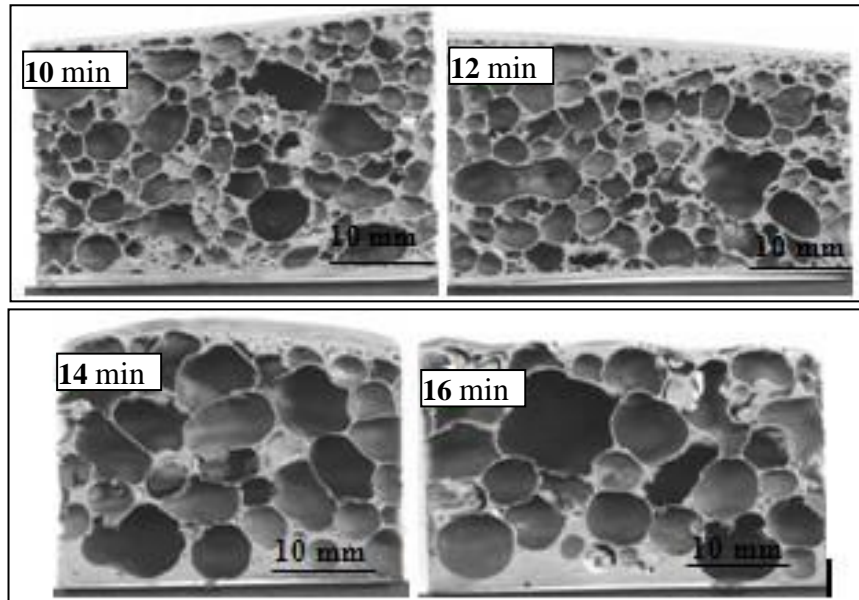
sıcaklığı için 10 dakika köpürtme süresi kullanılmamıştır. Resim 6. 6' da 670°C köpürtme sıcaklığında 12, 14, 16 ve 18 dakika köpürtme sürelerinde köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler verilmiştir. 12 dakika köpürtme süresinde, gözeneklerin belirli bölgelerde homojen dağıldığı, gözenek boyutlarının ve gözenek yapılarının benzer olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde gözenek yapıları bozulmuş, bazı bölgelerde büyük gözenekler oluşurken bazı bölgelerde küçük gözenekler oluşmuştur. 18 dakika köpürtme süresinde ise gözenek yapısı küresele yakın oluşmuş ancak numunenin üst yüzeye yakın tarafındaki gözeneklerde çökme görülmüştür. Artan köpürtme süresine bağlı olarak iri gözeneklerin küçük gözeneklerle birleşmesi nedeniyle gözenek duvarlarında incelmeler ve yırtılmalar meydana gelmiştir. Meydana gelen bu yırtılmalar gözenek içerisindeki gazın kaçmasına neden olmakta dolayısıyla da gözeneklerde çökme meydana gelmektedir.



Resim 6. 6. 670 °C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde üretilen sandviç köpükler.

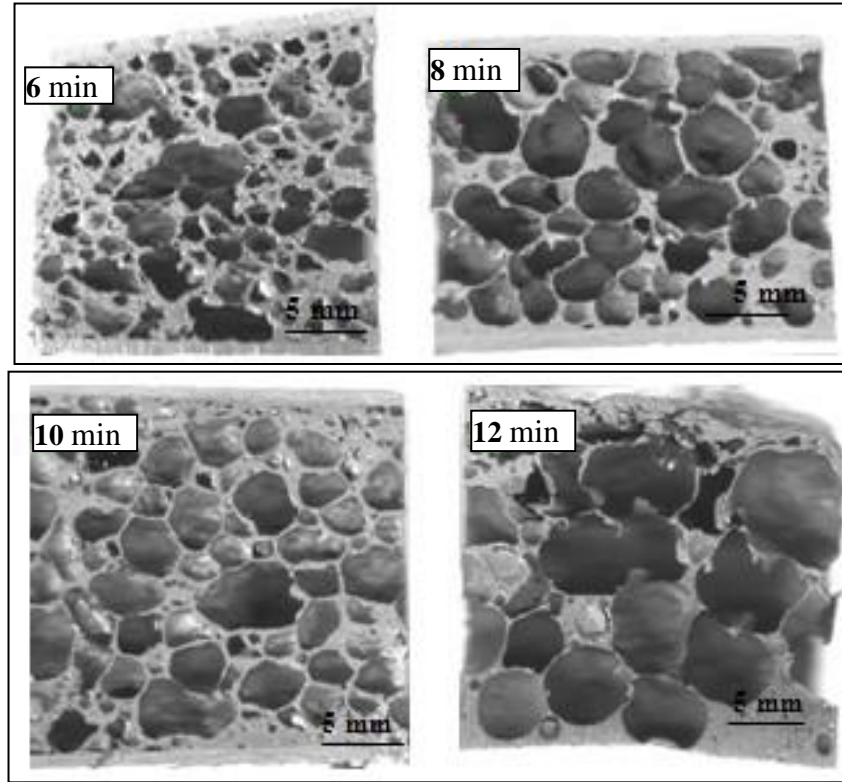
Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkarılarak 10, 12, 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen sandviç metalik köpüklerin makroyapı resimleri aşağıda Resim 6. 7' de verilmiştir. Numunelerin makro boyuttaki resimleri incelediğinde artan köpürtme süresiyle birlikte gözenek boyutlarının da arttığı

dikkat çekmektedir. Bununla birlikte 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde sandviç yapı için kullanılan Al levhaların ergiyerek köpük yapıyla birleştiği görülmüştür. Köpürtme işlemlerinde, köpürtme sıcaklığı olarak Al ergime derecesinin üzerindeki sıcaklıklar seçildiğinde kısa köpürtme sürelerinde Al levhalar tekrar katılırken uzun sürelerde Al levhalarda bozulmalar görülmektedir. Bu nedenle sandviç yapıdaki yüzey levhalarının ergime derecesinin üzerindeki sıcaklıklarda köpürtme işlemi yapılması durumunda köpürtme süresi kısa tutulmalıdır.



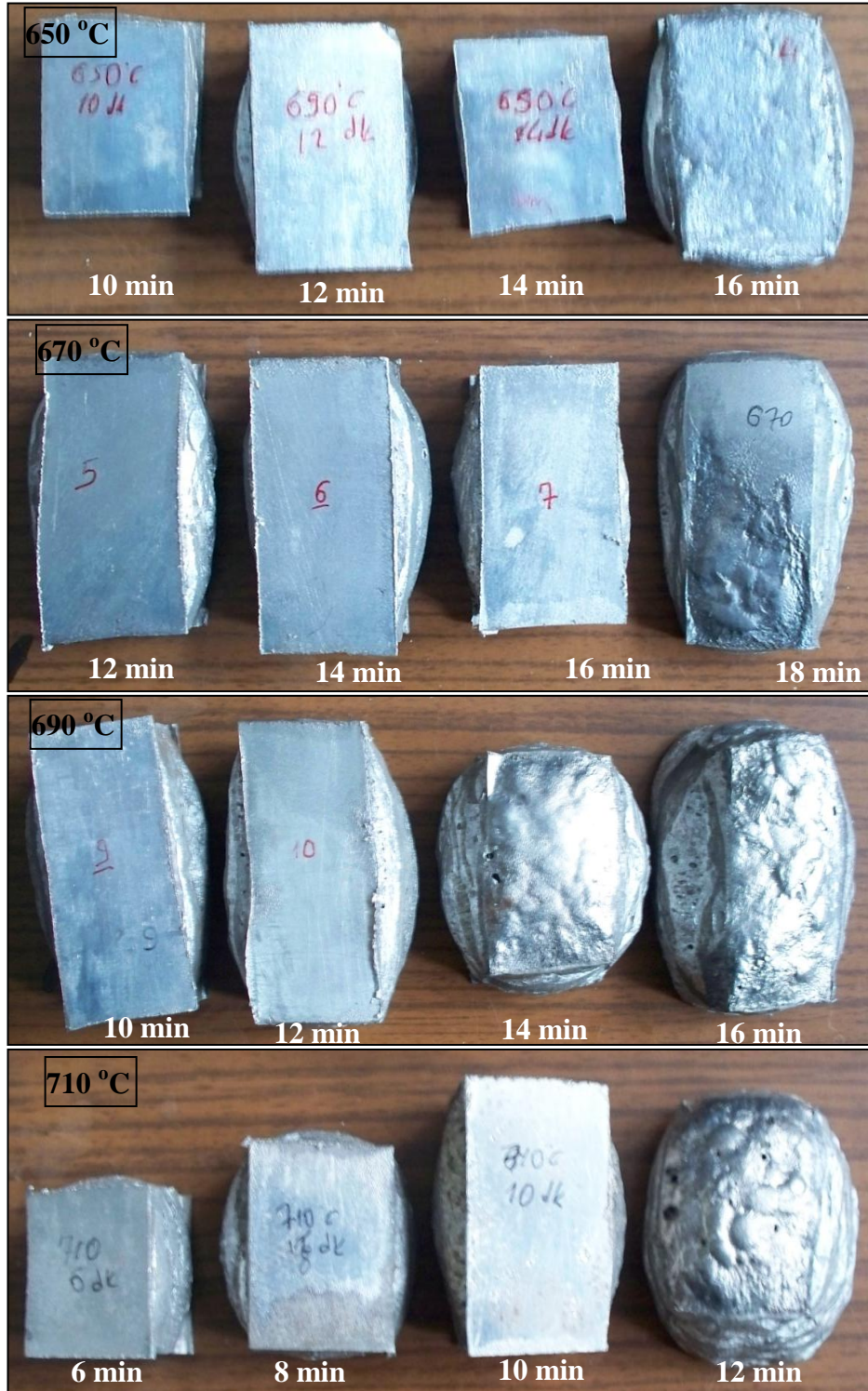
Resim 6. 7. 690 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen sandviç metalik köpüklerin gözenek yapıları.

710 °C köpürtme sıcaklığında, köpürmenin erken başlayacağı düşünülerek 6, 8, 10 ve 12 dakika köpürtme süreleri seçilmiştir. Resim 6.8 incelendiğinde 6 dakikada köpürmenin başladığı ancak gözenek yapısının düzgün olmadığı görülmüştür. Köpürtme süresinin 8 ve 10 dakikaya çıkarılmasıyla gözenek yapısı küresele yakın görünüm sergilemiştir. Bu sürelerde sandviç yapının bozulmadığı ve Al levhalarda ergime olmadığı dikkat çekmektedir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılmasıyla gözenek boyutlarında artma, gözenek duvarlarında ise bozulma meydana gelmiştir. Ayrıca, 12 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı için kullanılan Al levhaların ergidiği de görülmüştür.



Resim 6. 8. 710 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen sandviç metalik köpüklerin gözenek yapıları.

Resim 6. 9' da farklı köpürtme sıcaklığı ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen sandviç köpüklerin yüzey levhalarının görüntüleri verilmiştir. Resimlerden 650 °C köpürtme sıcaklığında 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde sandviç yapı için kullanılan Al levhaların ergimedığı 16 dakika köpürtme süresinde ise ergidiğı görölürken 670 °C köpürtme sıcaklığında 18 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı için kullanılan Al levhaların ergidiğı görölmüştür. Al levhaların ergimesi 690 °C köpürtme sıcaklığında 14 dakika köpürtme süresinde meydana gelirken 710 °C köpürtme sıcaklığında ise 12 dakika köpürtme süresinde meydana gelmiştir.

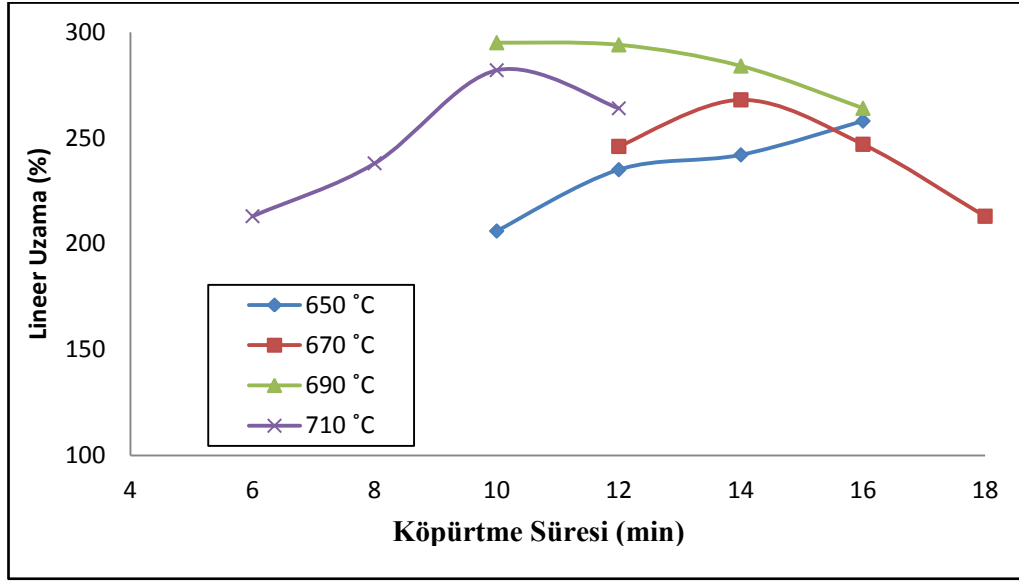


Resim 6. 9. Farklı köpürtme sıcaklıkları ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen sandviç metalik köpükler.

Yapılan çalışmalarda sabit sıcaklıkta yüzey levhalarının ergimesi için belli bir sürenin geçmesi gerektiğini ve köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak

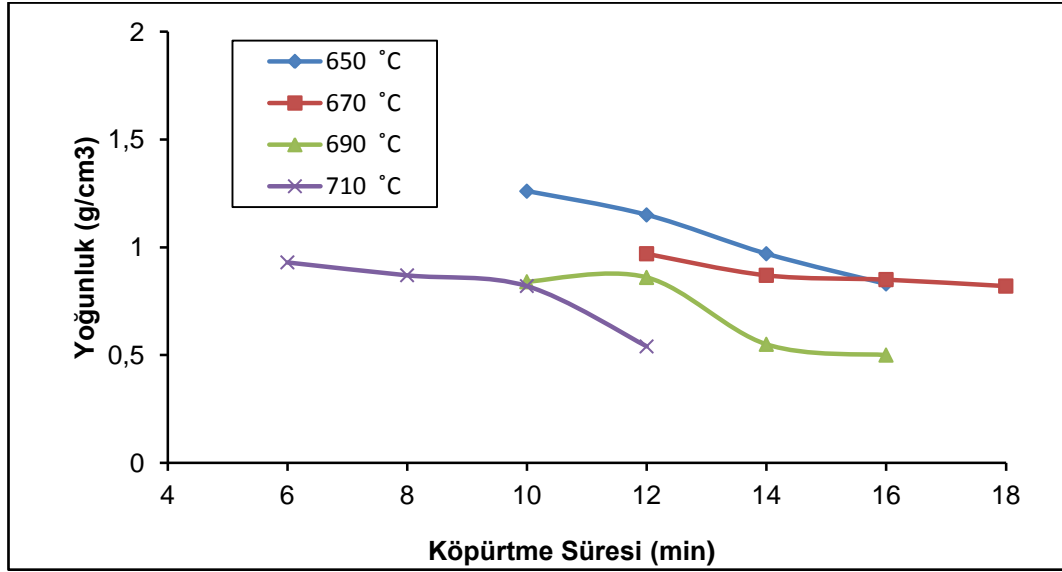
da yüzey levhalarının ergimesi için gerekli olan sürenin azaldığı görülmüştür. Sıvı-katı dönüşümlerinde dönüşümün tamamlanabilmesi için malzemenin ısı iletkenliğine bağlı olarak zamana ihtiyaç vardır. Sıcaklığın artmasıyla malzemenin ısı iletkenliği artacağından dönüşümün tamamlanabilmesi için gerekli zaman aralığı kısılacaktır. Bundan sonraki çalışmalarda bu durum dikkate alınmıştır.

Şekil 6. 1'de köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranları grafik hâlinde verilmiştir. Bu grafikte 650 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen sandviç metalik köpüklerde 16 dakika köpürtme süresinde maksimum lineer uzama elde edilmişken 670°C köpürtme sıcaklığında 14 dakika köpürtme süresinde maksimum lineer uzama elde edilmiş ve daha sonra önemli bir düşüş görülmüştür. 690°C köpürtme sıcaklığında ise 10,12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde meydana gelen lineer uzama oranları yakın değerlerde iken 16 dakika köpürtme süresinde bu değer azalmıştır. 710°C köpürtme sıcaklığında 6,8, 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde yapılan çalışmalarda maksimum lineer uzamanın 10 dakikada elde edildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda, 650°C köpürtme sıcaklığında maksimum %260 oranında lineer uzama meydana gelirken 670°C köpürtme sıcaklığında %270 oranında maksimum lineer uzama elde edilmiştir. Düşük köpürtme sıcaklıklarında malzeme direncinin yüksek olmasının köpürtücü maddeden ayrılan H₂ gazının genişmesine engel teşkil edeceğinden lineer uzama oranının da düşük olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Köpürtme sıcaklığının 690°C'ye çıkartılmasıyla lineer uzama oranı %290 iken köpürtme sıcaklığının 710°C'ye çıkartılmasıyla bu oran kısmen azalarak % 280 olmuştur. Düşük köpürtme sıcaklıklarında lineer uzama oranlarının da düşük olduğu literatürde de belirtilmiştir [17,28].



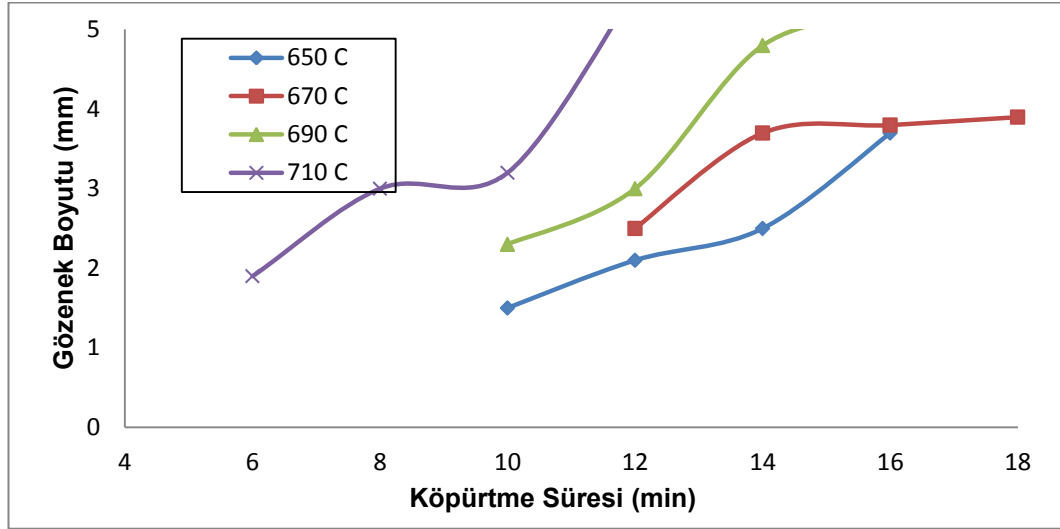
Şekil 6. 1. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranları.

Şekil 6.2' de sandviç metalik köpüklerde artan köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerine bağlı olarak yoğunlukta meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Elde edilen deneysel çalışmalar sonucunda, artan köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığı ile yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi en yüksek yoğunluk 650°C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresinde elde edilirken, en düşük yoğunluk değerleri 690°C köpürtme sıcaklığında ve 16 dakika köpürtme süresinde elde edilmiştir. Dolayısıyla köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi arttıkça yoğunlukta azalma meydana gelmektedir. Artan köpürtme sıcaklığına ve köpürtme süresine bağlı olarak numunelerin yoğunluklarında görülen azalma gözenek duvarlarının incilmesi, gözeneklerde birleşmenin olması ve daha büyük gaz boşluklarının oluşması ve yüzeye yakın bölgelerdeki gazın yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. 2. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığının yoğunluğa etkisi.

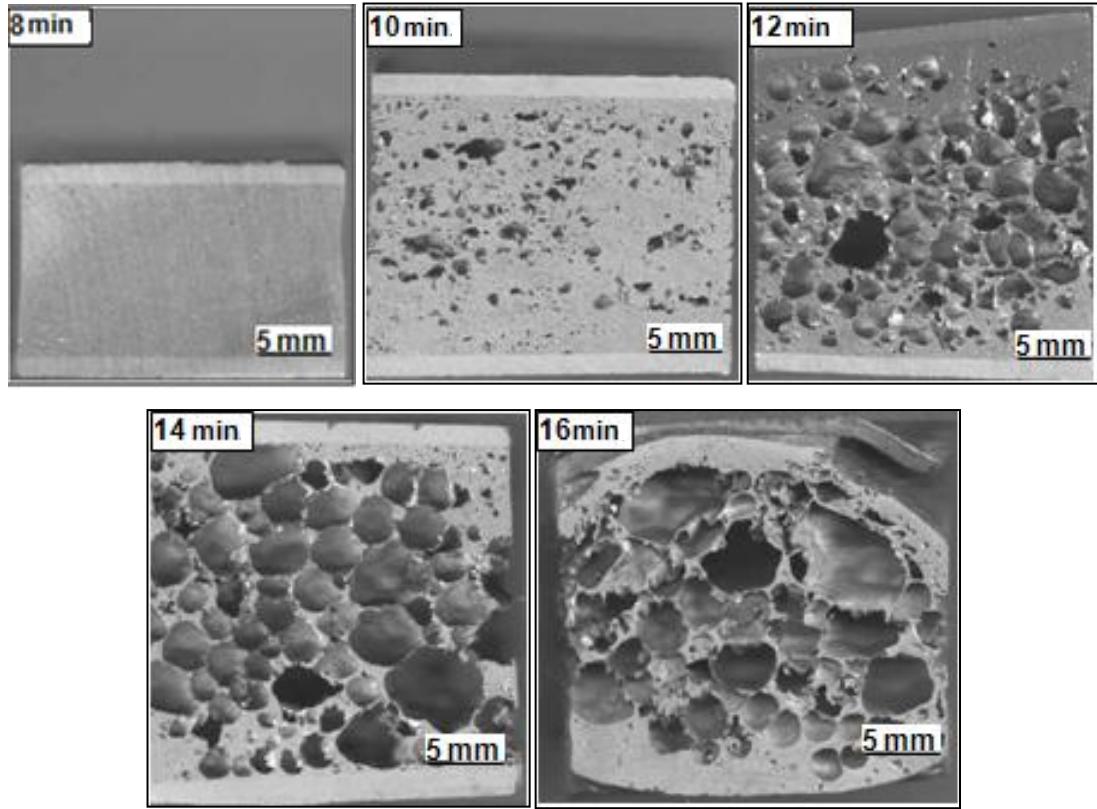
Köpürtme süresinin ve köpürtme sıcaklığının gözenek boyutuna etkisi Şekil 6.3' te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi gözenek boyutlarında artmaya neden olmuştur. Sıcaklığın düşük olmasına bağlı olarak gözenek boyutunun düşmesinin sebebi, köpürme sırasında köpürtücü maddenin (TiH_2) ayrışma hızının yavaş olmasına bağlı olarak ayrışma sürecinde hidrojen gazının iç basıncının malzeme direncinden düşük olmasıdır. Köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak fırın içerisinde bulunan numunenin sıcaklığı artmakta ve ergiyik metalin direnci azalmaktadır [17,69]. Ergiyik metalin direncinin azalmasıyla gözenek içerisindeki hidrojen gazının basıncı numune direncinden fazla olmakta ve gözenekler daha kolay büyümektedir. Köpürtme süresinin artmasına bağlı olarak da ergiyik haldeki gözenek duvarları yırtılarak gözeneklerin birleşmesine dolayısıyla gözeneklerin daha da büyümesine neden olmaktadır.



Şekil 6. 3. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen gözenek boyutları.

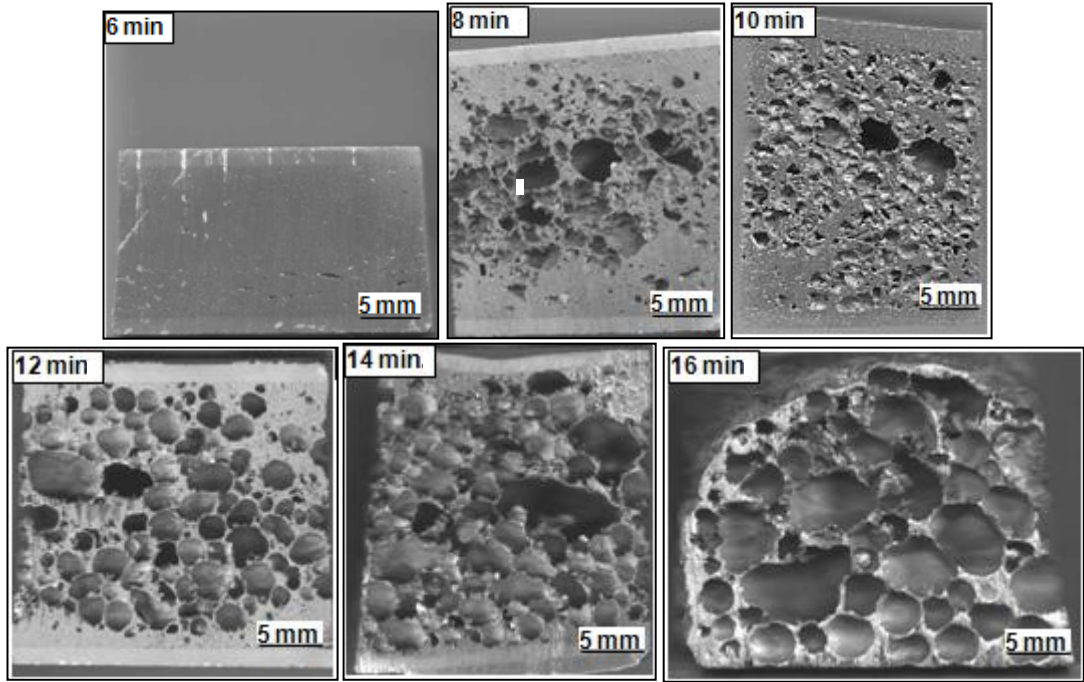
6.3. 2 mm Kalınlıkta Al Levha Kullanılarak Elde Edilen Sandviç Metalik Köpükler

Aşağıda Resim 6. 10'da 650°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde [8, 10, 12, 14 ve 16 dakika) köpürtme işlemine tabi tutulmuş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler verilmiştir. Yapılan makro incelemelerde 8 dakika köpürtme süresinde gözenek oluşmazken 10 dakika köpürtme süresinde gözeneklerin kısmen oluştuğu görülmüştür. 12 dakika köpürtme süresinde belirgin şekilde gözeneklilik oluşmuş, numunenin alt ve orta bölgelerinde oluşan gözenekler homojen dağılım sergilemiş ancak numunenin üst bölgelerinde bu homojen dağılım bozulmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise homojen dağılımlı ve küresel şekilli gözenekler meydana gelmiştir. 16 dakika köpürtme süresinin ise sandviç yapı için kullanılan Al levhaların ergimesine ve sandviç yapının bozulmasına neden olduğu görülmüştür. Bu esnada yüzeye yakın yerlerde gözeneklerin küçüldüğü, merkez bölgelerde ise birleşmelerden dolayı gözenek irileşmesi görülmüştür. Ayrıca gözenek duvarlarında meydana gelen bozulma dikkat çekmektedir.



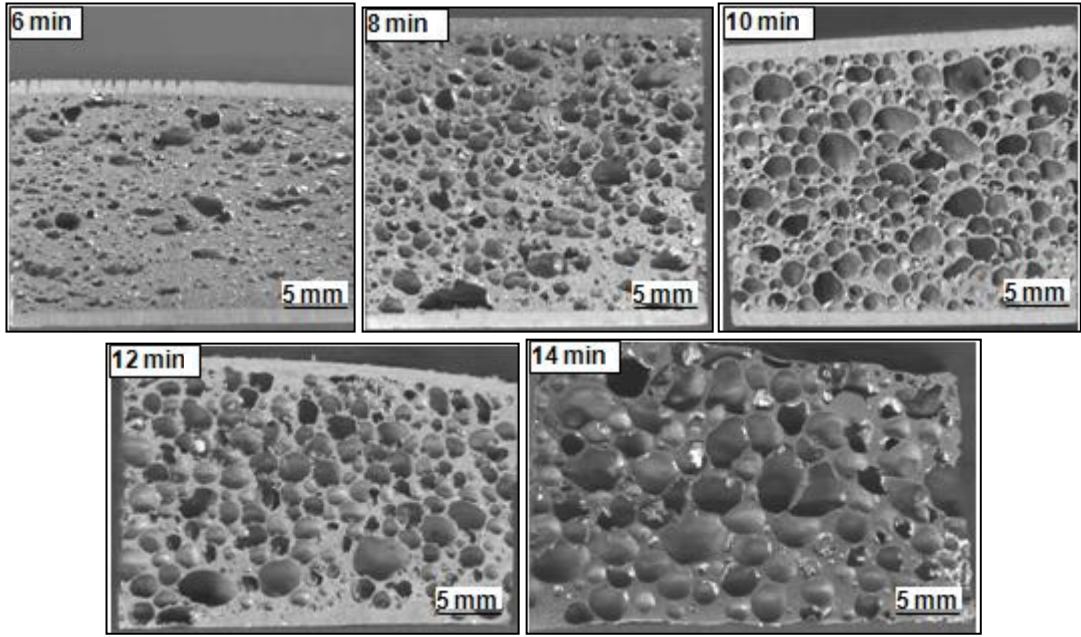
Resim 6.10. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

Resim 6.11' de 670°C köpürtme sıcaklığında 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler verilmiştir. 6 dakika köpürtme süresinde numunenin bazı bölgelerinde küçük gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. 8 dakika köpürtme süresinde küçük boyutlarda gözenekler oluşmuşken 10 dakika köpürtme süresinde gözenekliliğin oluştuğu tespit edilmiştir. 12 dakika sonunda homojen gözenek dağılımı sergilemiş ve oluşan gözeneklerin küresele yakın görünümde olduğu görülmüştür. 14 dakikada kısmen bozulma ve 16 dakika köpürtme işlemlerinin ardından gözenek duvarlarının ve sandviç yapının bozulduğu tespit edilmiştir.



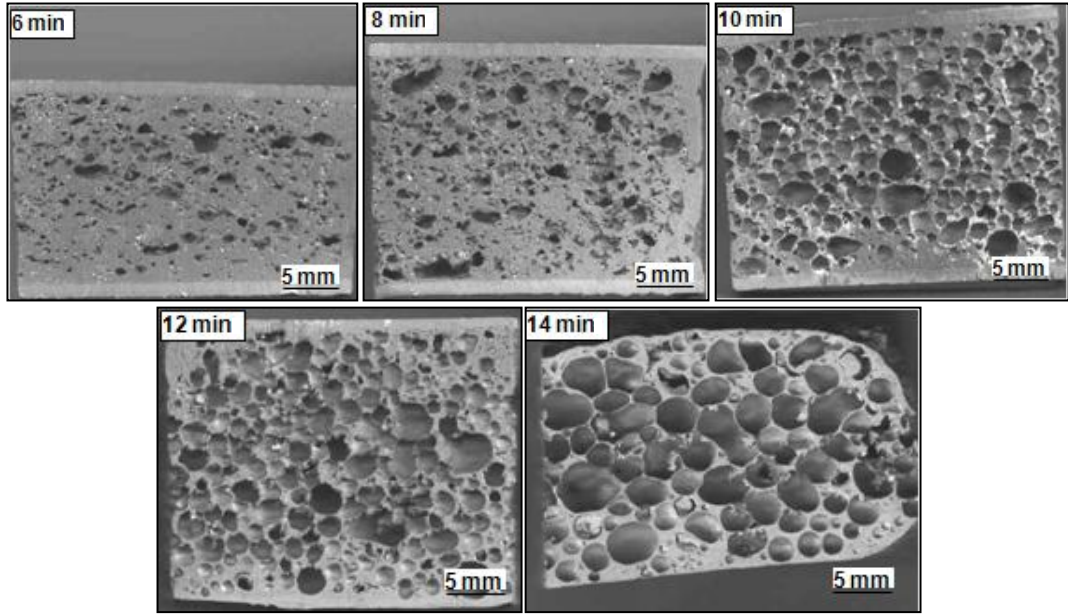
Resim 6. 11. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

690°C köpürtme sıcaklığında ve 6, 8, 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen sandviç metalik köpükler Resim 6. 12' de verilmiştir. 650 ve 670°C köpürtme sıcaklıklarında 6 dakika köpürtme süresinde gözenek oluşmamış iken 690°C köpürtme sıcaklığında ince gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. Oluşan bu gözenekler homojen olarak dağılmış ve elips şeklindedir. 8 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde homojen gözenek dağılımlı sandviç yapı elde edilmiştir. Zaman veya sıcaklığın artması daha küresel yapının oluşmasına sebep olur. 8 dakika sonunda küçük gözenekler oluşmuşken 10 dakika sonunda daha küresel ve daha homojen gözenek yapısı ortaya çıkmıştır. 12 dakika köpürtme süresinde sandviç yapının kısmen, 14 dakika köpürtme süresinde ise tamamen bozulduğu görülmüştür.



Resim 6.12. 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

710°C köpürtme sıcaklığında 6, 8, 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen Al köpüklerin gözenek yapıları Resim 6.13' te verilmiştir. Bu sıcaklıkta 6 dakika köpürtme süresinde gözeneklerin oluştuğu, 8 dakika köpürtme süresinde gözenekliliğin arttığı ve oluşan bu gözeneklerin homojen olmayan bir dağılım sergilediği görülmüştür. 10 dakika köpürtme süresinde ideal sandviç yapı elde edilmiş ve 12 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı için kullanılan levhaların kısmen ergidiği dolayısıyla sandviç yapının bozulduğu görülmüştür. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapının tamamen bozulduğu aşağıdaki resimde görülmektedir.

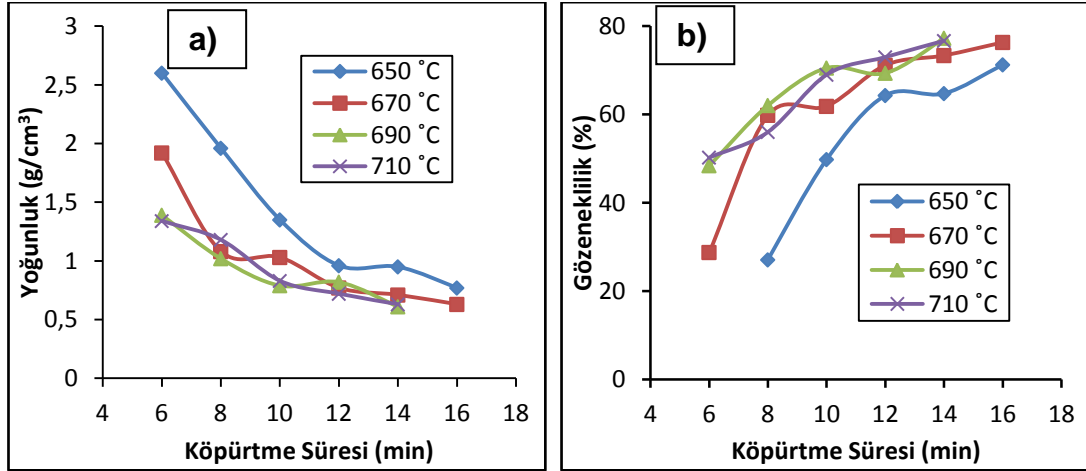


Resim 6.13. 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

Yapılan çalışmada köpürtme sıcaklığının 650 °C den 710 °C ye çıkartılması köpürmenin ve buna bağlı olarak gözenek oluşumunun daha erken başlamasına sebep olmuştur. Zira 650 °C köpürtme sıcaklığında 14 dakikada gözenek dağılımı ve gözenek morfolojisi açısından optimum özellikte sandviç yapı elde edilmişken 670 °C'de 12 dakika sonrasında elde edilmiştir. 690 °C ve 710 °C köpürtme sıcaklığında ise 10 dakika köpürtme süresinde optimum özellikte sandviç yapı elde edilmiştir.

Şekil 6.4a'da sandviç metalik köpüklerde artan köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerine bağlı olarak yoğunlukta meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Elde edilen deneysel çalışmalar sonucunda, belli bir sıcaklık ve süre sonunda artan köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığı ile yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığının artmasıyla birlikte ergiyik metalin viskozitesinin azaldığı ve sonuç olarak gözenek içerisindeki gaz basıncına etki eden direncin azaldığı düşünülmektedir. Yang ve Nakae [5] tarafından yapılan çalışmada hidrojen gazının genişlemesine ergiyik metalin viskozitesinin etki ettiği vurgulanmaktadır. Bu nedenle de gözenekliliğin arttığı düşünülmektedir (Şekil 6. 4b). Köpürtme sıcaklığı ve

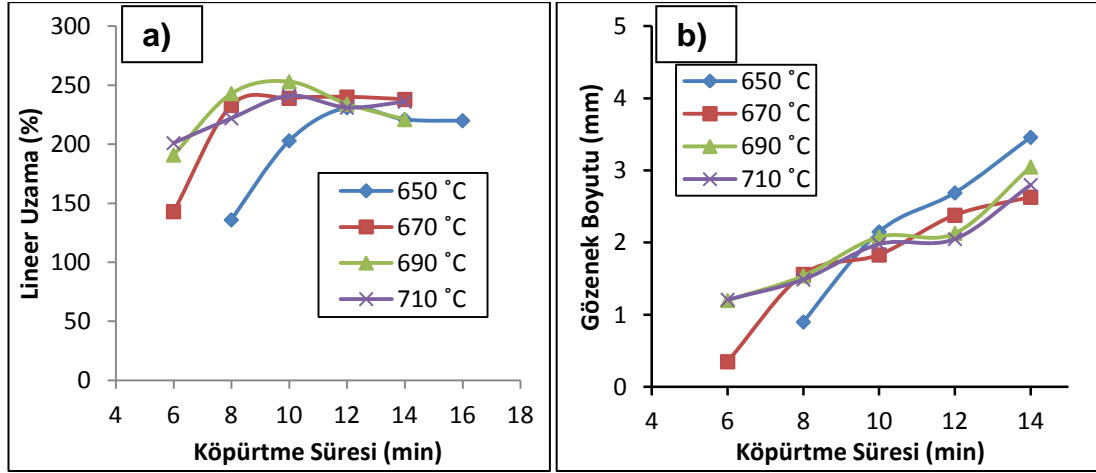
köpürtme süresi ile artan gözenekliliğin sandviç metalik köpüklerin yoğunluğunda azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.4. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen: a) Yoğunluk; b) Gözeneklilik.

Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin lineer uzamaya etkisini incelemek amacıyla 650 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen sandviç metalik köpüklerde 8, 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde lineer uzamada artış, 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde ise azalma meydana gelmiştir. Dolayısıyla maksimum lineer uzama oranı 12 dakikada (%230) elde edilmiştir. Ancak gözenek boyutu ve gözenek morfolojisi açısından optimum sandviç yapı 14 dakikada elde edilmiştir. 670°C köpürtme sıcaklığında ise 12 dakika köpürtme süresinde meydana gelen maksimum lineer uzama oranının % 240 olduğu gözlemlenmiştir. 690°C köpürtme sıcaklığında maksimum lineer uzama 10 dakika köpürtme süresinde elde edilmiş ve elde edilen değer % 250 olmuş, 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde bu değer azalmıştır (Şekil 6.5a). 710°C köpürtme sıcaklığında 6,8 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde lineer uzamanın arttığı 12 dakika köpürtme süresinde ise lineer uzamanın azaldığı görülmüştür. Şekil 6.5b 'de görüldüğü gibi artan köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi gözenek boyutlarında artmaya neden olmuştur. Sıcaklığın düşük olmasına bağlı olarak gözenek boyutlarındaki azalmasının sebebinin, köpürme sırasında köpürtücü maddenin (TiH₂) ayrışma hızının

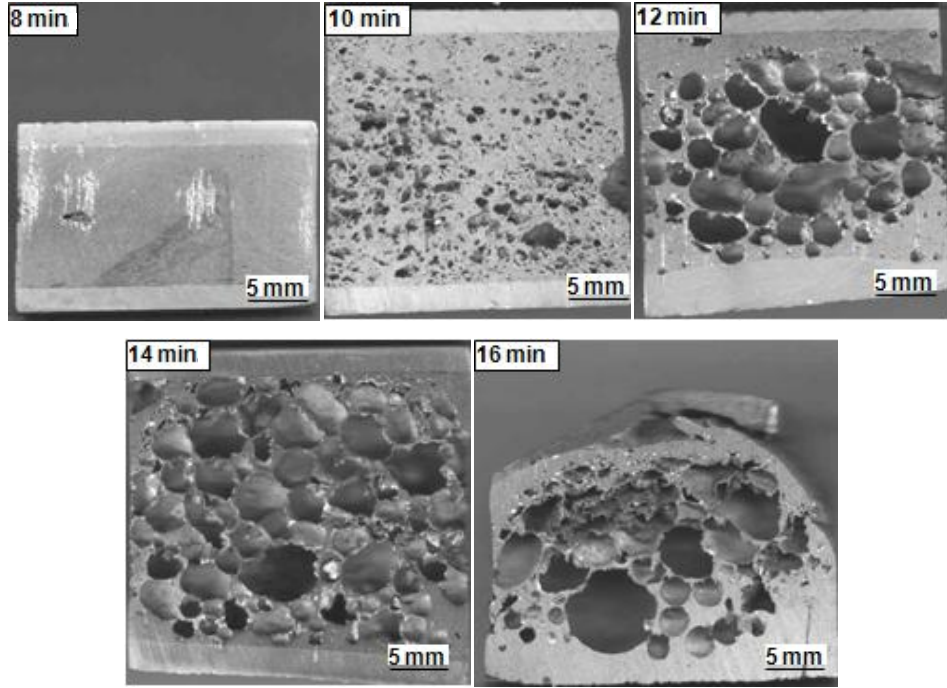
yavaş olması ve ayrışma sürecinde hidrojen gazının iç basıncının gözenek oluşturmak için yeterli olmadığı düşünülmektedir.



Şekil 6.5. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen: a) Lineer uzama; b) Gözenek boyutu.

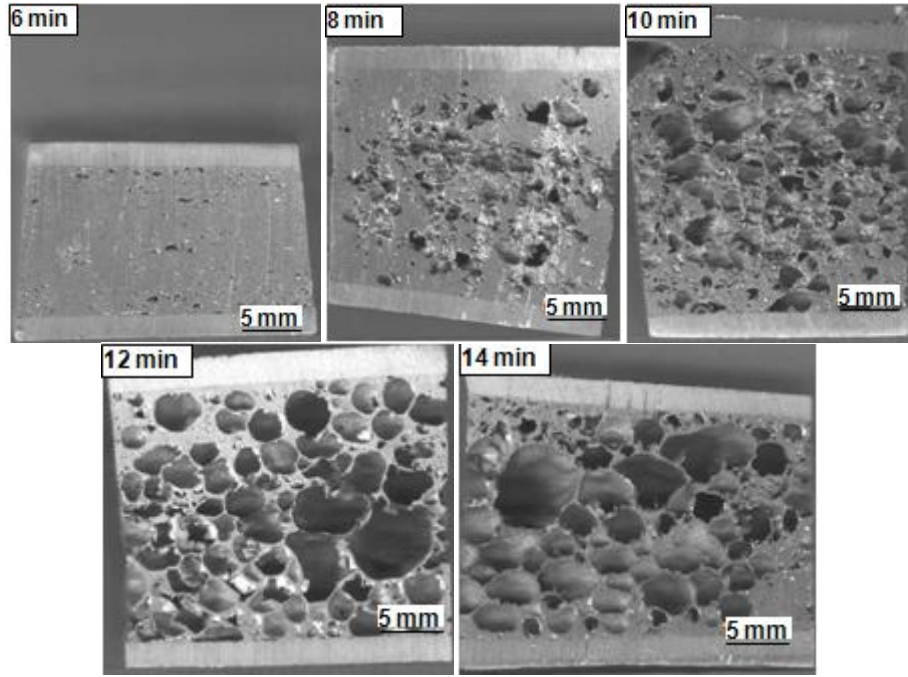
6.4. 3 mm Kalınlıkta Al Levha Kullanılarak Elde Edilen Sandviç Metalik Köpükler

Aşağıda Resim 6.14'te 650°C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde [8, 10, 12, 14 ve 16 dakika) köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler gösterilmiştir. 8 dakikada gözenek oluşmazken 10 dakika köpürtme süresinde süngerimsi bir yapı oluştuğu görülmüştür. 12 dakika köpürtme süresinde ise belirgin şekilde gözeneklilik oluşmuştur. Ancak numunenin alt ve üst bölgelerinde gözenek oluşmamış bölgelerin olduğu görülmüştür. 14 dakika köpürtme süresinde homojen dağılımlı gözenek oluşmuş ve sandviç yapı elde edilmiştir. 16 dakika köpürtme işleminde ise sandviç yapı için kullanılan Al levhaların ergidiği ve sandviç yapının bozulduğu görülmüştür.



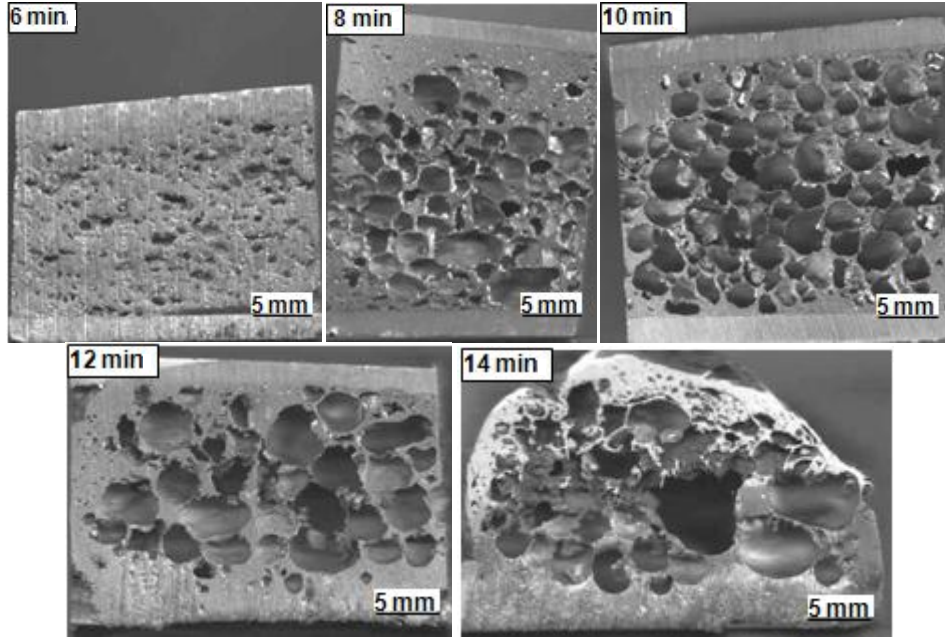
Resim 6.14. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

Resim 6.15'te 670 °C köpürtme sıcaklığında 6, 8, 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde köpürtülmüş numunelerin gözenek yapılarına ait resimler verilmiştir. 6 dakika köpürtme süresinde numunenin bazı bölgelerinde küçük gözeneklerin oluştuğu, 8 dakika köpürtme süresinde ise gözenek oranının arttığı görülmüştür. 10 dakika köpürtme işlemi sonrasında gözenekliliğin kısmen oluştuğu tespit edilmiştir. 12 ve 14 dakikada sandviç yapı elde edilmiş, gözenekler homojen dağılım sergilemiş ve oluşan gözeneklerin küresele yakın görünümde olduğu görülmüştür.



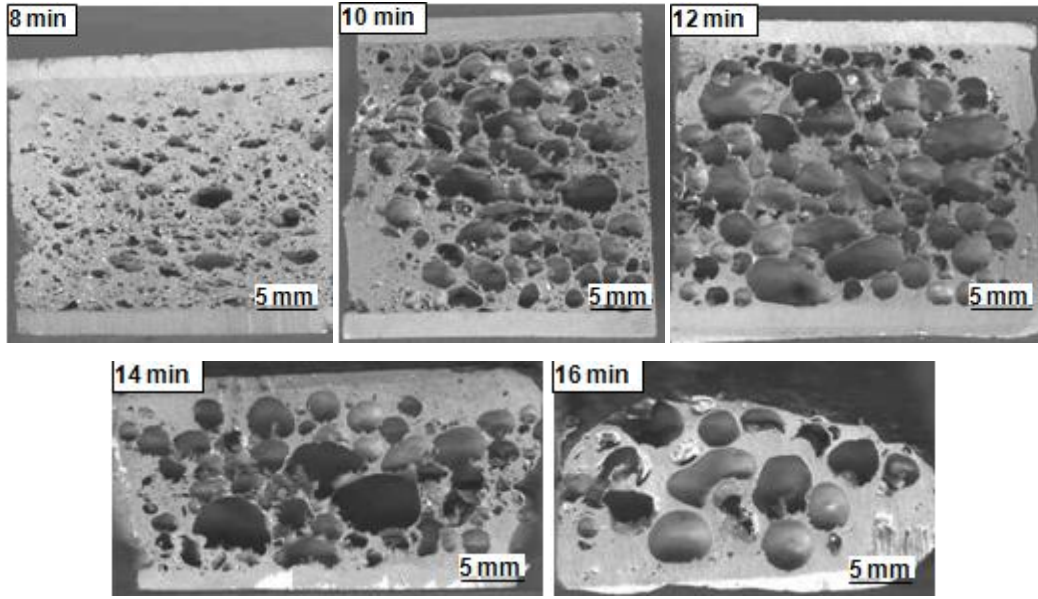
Resim 6.15. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

690 °C köpürtme süresinde ve 6, 8, 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen sandviç metalik köpükler aşağıda Resim 6.16'da verilmiştir. 690°C köpürtme sıcaklığında 6 ve 8 dakika köpürtme sürelerinde gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. 8 dakikada sandviç yapı kısmen elde edilmiş olup numunenin üst bölgesinde gözenek boyutlarında ve gözenek dağılımında azalma meydana gelmiştir. 10 ve 12 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı elde edilebilmiş ve 12 dakika köpürtme süresinde elde edilen sandviç yapıda gözeneklerin büyüdüğü görülmüştür. 14 dakikada ise sandviç yapının tamamen bozulduğu gözlemlenmiştir.



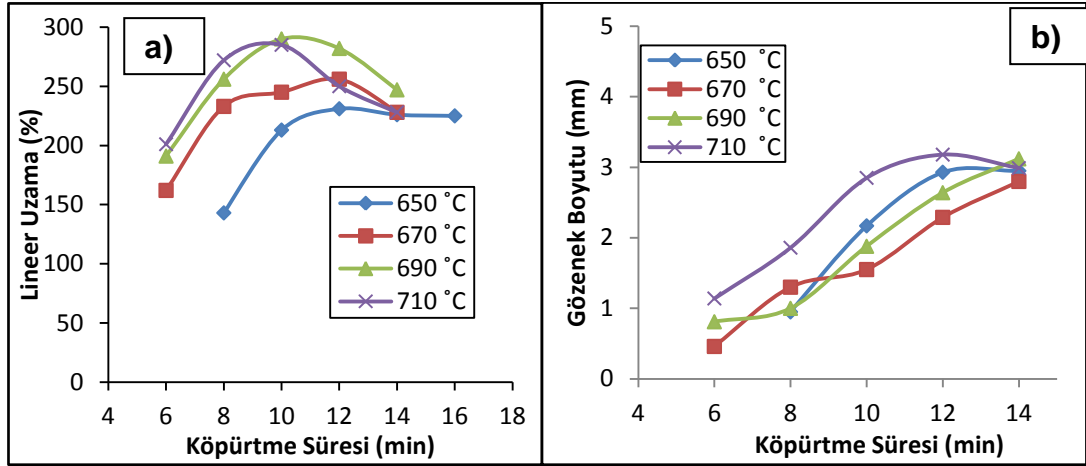
Resim 6.16. 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

710 °C köpürtme sıcaklığında 6, 8, 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen Al köpüklerin gözenek yapıları Resim 6.17’de verilmiştir. 6 dakikada gözeneklerin elips şeklinde olduğu görülürken 8 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde gözenekliliğin arttığı, gözeneklerin homojen dağılım sergilediği ve sandviç yapının elde edildiği görülmüştür. 12 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı için kullanılan levhaların kısmen ergidiği ve gözenek yapılarının bozulduğu dolayısıyla sandviç yapının bozulduğu görülmüştür. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapının tamamen bozulduğu resimde görülmektedir.



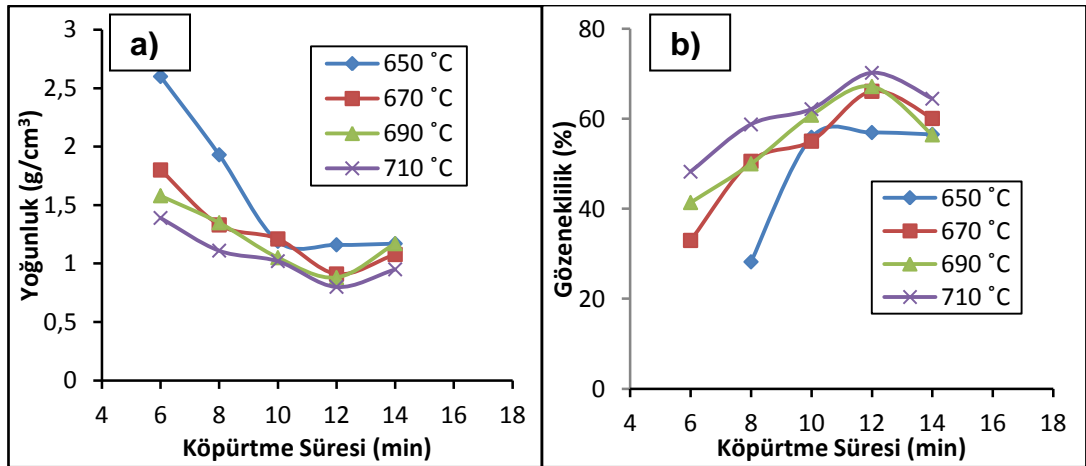
Resim 6.17. 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen sandviç metalik köpükler.

Şekil 6. 6'da köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığının sandviç Al köpüklerde lineer uzamaya ve gözenek boyutlarına etkilerini gösteren grafikler verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakika köpürtme süresinde küçük boyutlarda gözenek oluşmuş dolayısıyla lineer uzamada kısmen artış olmuştur. 690 °C ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında 10 dakikada maksimum lineer uzama meydana gelmiş ve 12 ve 14 dakikada lineer uzama oranında azalmalar görülmüştür. Gözenek boyutlarında ise 6, 8, 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde artış 14 dakikada ise kısmen azalma meydana gelmiştir. 650 ve 670 °C sıcaklıklarda ise 12 dakika köpürtme süresinde maksimum lineer uzama meydana gelmiştir. Gözenek boyutları artan köpürtme sıcaklığıyla artış göstermiştir.



Şekil 6.6. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen;
a) Lineer uzama b) Gözenek boyutu

Köpürtme süresine bağlı olarak büyüyen gözenek yapısından kaynaklanan lineer uzamayla beraber hacim artacağından yoğunluk da azalmıştır. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresindeki artışa bağlı olarak meydana gelen gözeneklilikteki artış yoğunluğun azalmasına neden olmuştur (Şekil 6.7).



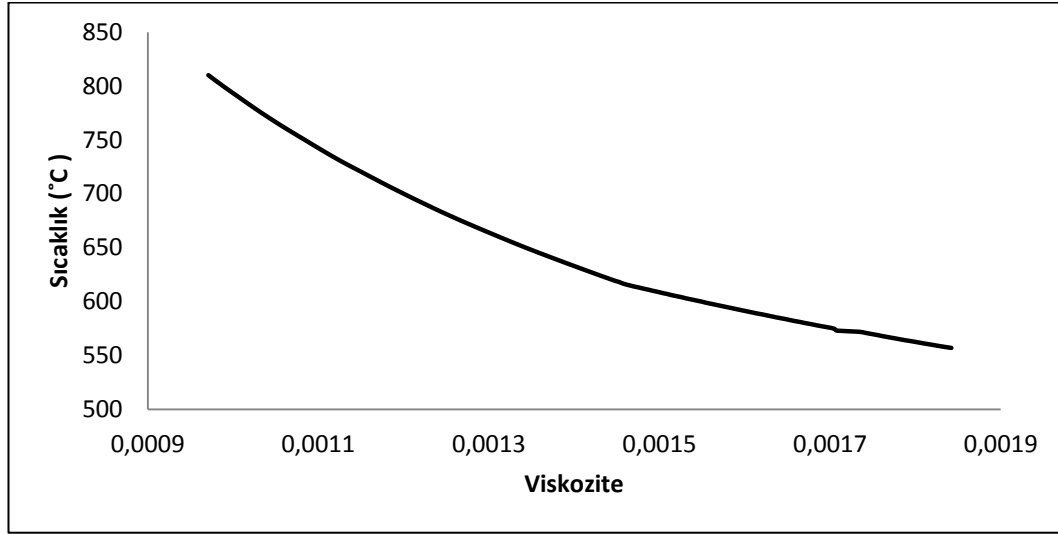
Şekil 6.7. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen;
a) Yoğunluk; b) Gözeneklilik.

Yapılan çalışmalar sonucunda, köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi arttıkça gözenek boyutlarında ve gözeneklilik oranında artış görülürken

yoğunlukta azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin artmasıyla gözenek boyutlarının arttığı literatürde de desteklenmektedir [70,71]. Köpürtme sıcaklığındaki artış köpürtme süresinin azalmasına neden olurken artan köpürtme süresi sandviç yapının bozulmasına neden olmuştur. Lineer uzama oranlarının ise artan köpürtme süresine bağlı olarak arttığı ve belli bir süre sonra azaldığı görülmüştür. Esmaeelzadeh ile Simchi [72] ve Garcia-moreno ile Banhart [73] yaptıkları çalışmalarda köpürtme süresinin artmasıyla linner uzamanın arttığını ve bir süre sonra lineer uzama oranında azalma meydana geldiğini, ayrıca bu durumun artan köpürtme süresine bağlı olarak ergiyik metale etkileyen yerçekimi kuvvetinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Metalik köpük üretiminde gözenek oluşumuna etki eden parametreler yer çekimi etkisi (drenaj), matris malzemenin yüzey gerilmesi ve sıvının viskozitesidir. Battezzati ve Greer [74], Andrade ve Hirai [75,76] köpük kararlılığının büyük oranda sıvının viskozitesine bağlı olduğunu ve sıvının viskozitesinin de sıcaklığa bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Vulcan simulasyon eğrisinde de sıvının viskozitesinin sıcaklığa bağlı olduğu ve artan sıcaklıkla viskozitenin azaldığı görülmektedir (Şekil 6.8). Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılan köpürtme sıcaklıklarından 710 °C'de gözenek boyutlarının, gözeneklilik oranının ve lineer genişleme oranının artmasının köpürtme sıcaklığındaki artmaya bağlı olarak sıvının viskozitesindeki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 6. 8. A357 alüminyum alaşımına ait Vulcan malzeme özellikleri [77].

Sıvının viskozitesinin artan sıcaklıkla azalması, gözeneğin iç basıncına etki eden yer çekimi kuvvetinin (drenajın) azalarak gözeneğin iç basıncının dış basınçtan fazla olmasına dolayısıyla gözeneklerin daha kolay büyümesine neden olmaktadır [5,78-80]. Song ve arkadaşları da [81] düşük viskozitenin gözenek oluşumunu kolaylaştırdığını yüksek viskozitenin gözenek oluşumunu engellediğini belirtmişlerdir.

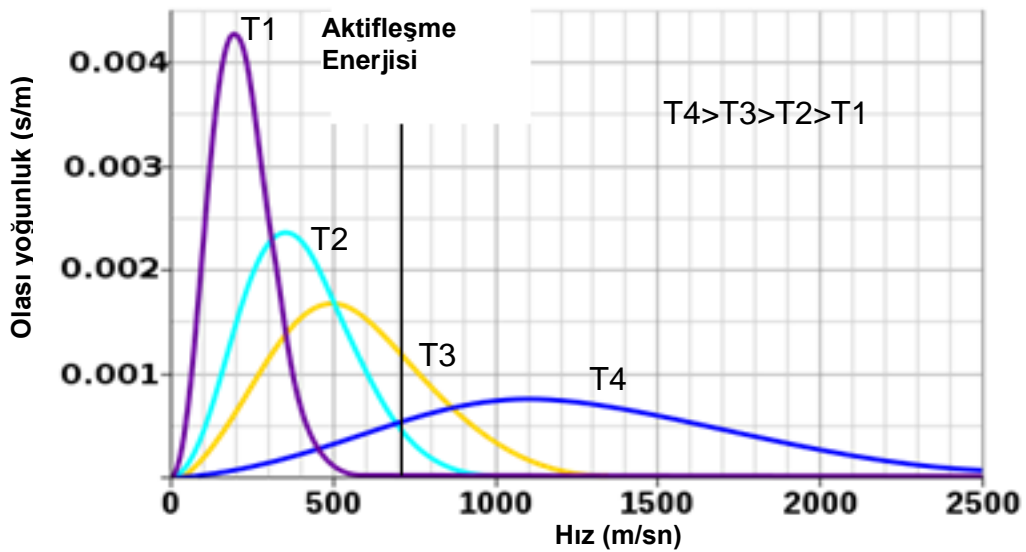
Ayrıca, literatürde [82,83] gözeneklerin irileşmesi için gözeneğin iç basıncının dış basınçtan fazla olması gerektiği belirtilmektedir. Gözeneğin dış basıncı alüminyumun yüzey gerilmesi kullanılarak belirlenir. Alüminyumun yüzey gerilmesi ve yüzey gerilimi sıcaklıkla değişimi Saravan ve arkadaşları [82] tarafından verilmiştir (Eşitlik 6. 1). Bu eşitlikte, T yerine deneysel çalışmalarda kullanılan sıcaklıklar (650, 670, 690 ve 710 °C) konulduğunda elde edilen sonuçlar köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak alüminyumun yüzey gerilmesinin azaldığını göstermiştir. Azalan yüzey gerilmesi ise artan köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözenek boyutlarının ve gözeneklilik oranlarının artmasına neden olmuştur.

$$\gamma = -0,1527 T + 1032,2 \quad (6. 1)$$

Yapılan deneysel çalışmalar, köpürtme sıcaklığındaki artışın köpürtme süresinin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Artan sıcaklıkla beraber alüminyumun termal iletkenliğinin artması köpürtme süresinin azalmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıkta termal iletkenliğin artması yapı içerisindeki reaksiyon hızını artıracığından daha kısa sürede gözenek çekirdeklenmesine ve gözenek büyümesine neden olacaktır. Sıcaklık artışına bağlı olarak reaksiyon hızının artması Eşitlik 6. 2'de verilen Maxwell ve Boltzman denklemlerinden anlaşılmaktadır.

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} V^2 \exp\left[-\frac{MV^2}{2RT}\right] \quad (6. 2)$$

Maxwell ve Boltzman denklemi sıcaklığı T olan bir gaz içerisindeki moleküllerin üç boyutlu hareketi baz alınarak türetilmiştir [84,85]. Sıcaklık arttıkça aktifleşme (eşik enerjisi) değişmez ancak aktifleşme enerjisini geçen molekül miktarı değişir. Molekül miktarı ve enerji arasındaki ilişkiyi veren Şekil 6. 9'daki grafik Maxwell-Boltzman dağılımı olarak bilinir. Bu grafikte sıcaklık arttıkça tepe düzleşir, yüksek enerjili molekül sayısı artar, dolayısı ile aktifleşme enerjisini geçen molekül sayısı da artar. Bu durum tepkimenin hızlanması anlamına gelir.



Şekil 6. 9. Maxwell-Boltzman grafiği [85].

Sıcaklık artışının köpürtme süresinin azalmasına neden olduğu yapılan literatür çalışmalarında da belirtilmiştir. Helwig ve Banhart [86] yaptıkları çalışmalarda yüksek sıcaklıkla birlikte artan ısıtma oranı ergime sıcaklığına ulaşılması için gerekli süreyi azaltacağından köpürebilir önşekil malzemenin erken uzamasına yol açacağını belirtmişlerdir.

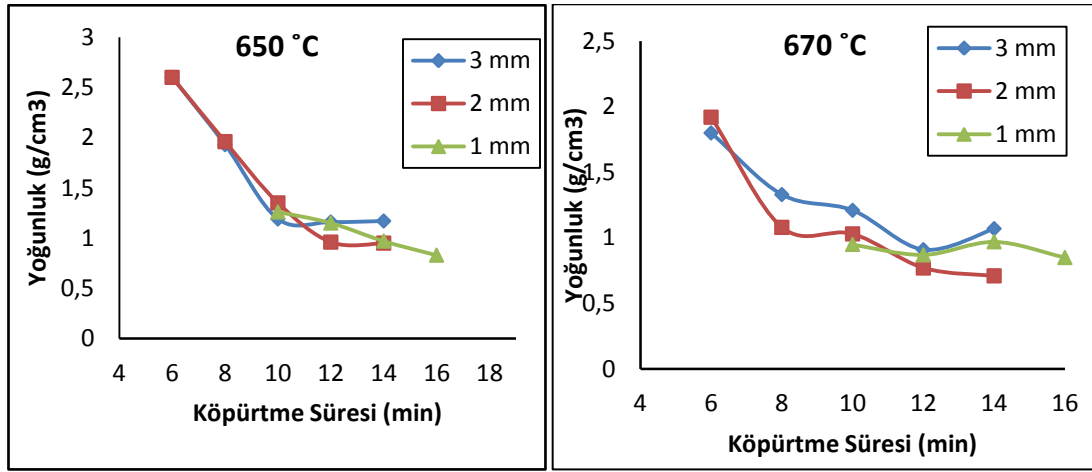
Yüksek sıcaklığın viskoziteyi azaltması ve gaz oluşumunu teşvik etmesi nedeniyle yüksek oranda uzama meydana gelebilir. Bunun yanında viskozitedeki azalma, yüksek fırın sıcaklığı doğal olarak yüksek ısıtma oranına yol açar ve bu durum yüksek oranda lineer uzama elde edilmesi için avantajdır [69,87,88].

Köpürtme süresinin artmasıyla ergiyik sıvı içerisindeki ve gözenek duvarı içerisindeki mikro boşlukların gözeneklerle birleşerek gözenek boyutlarındaki artışa neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca viskozitenin de gözenek boyutlarını etkilediği bilinmektedir. Viskozitedeki artış gözenek boyutlarını azaltırken gözeneklilik oranını artırmaktadır [5,81].

6.5. Levha Kalınlığının Köpürme Özelliklerine Etkileri

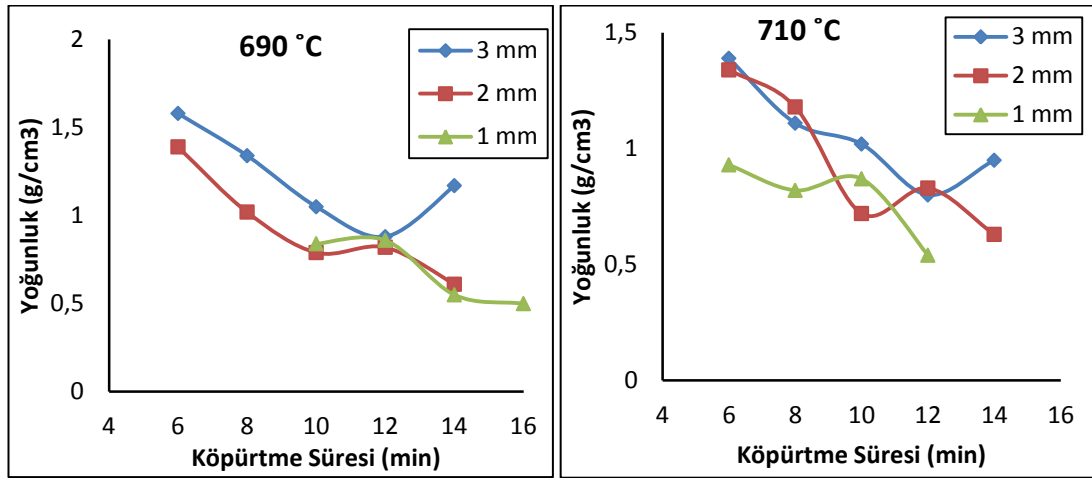
Şekil 6. 10'da 1, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip alüminyum sandviç köpüklerin (ASK) 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında ve farklı köpürtme sürelerinde elde edilen yoğunluk değerlerini gösteren grafikler verilmiştir. 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında 8 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde yeterli köpürme elde edilemediği için bu sürelerde elde edilen yoğunluk değerleri dikkate alınmamıştır. Benzer şekilde 16 dakika köpürtme süresinde de yüzey levhalarının ergidiği dolayısıyla sandviç yapı bozulduğu için yoğunluk değerleri dikkate alınmamıştır. Sandviç yapının elde edildiği 12 dakika köpürtme süresinde 1, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yaklaşık 1 g/cm³ yoğunluk değerleri elde edilmiştir. 14 dakika köpürtme

süresinde ise 1 ve 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yoğunluk değerleri 1 g/cm^3 ün altına düşmüşken 3 mm levha kalınlığına sahip ASK' de $1,1$ civarındadır. $670 \text{ }^\circ\text{C}$ köpürtme sıcaklığında sandviç yapının elde edildiği 12 dakika köpürtme süresinde 1 mm levha kalınlığında $0,97 \text{ g/cm}^3$, 2 mm levha kalınlığında 1 g/cm^3 ve 3 mm levha kalınlığında $1,2 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk elde edilmiştir. Sandviç yapının elde edildiği 14 dakika köpürtme sürelerinde ise yoğunluk değerleri $0,8 \text{ g/cm}^3$, $0,7$ ve $1,2 \text{ g/cm}^3$ olmuştur. Dolayısıyla levha kalınlığının artmasının yoğunluk değerlerini kısmen artırdığı söylenebilir.



Şekil 6. 10. 650 ve $670 \text{ }^\circ\text{C}$ Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen yoğunluk oranları.

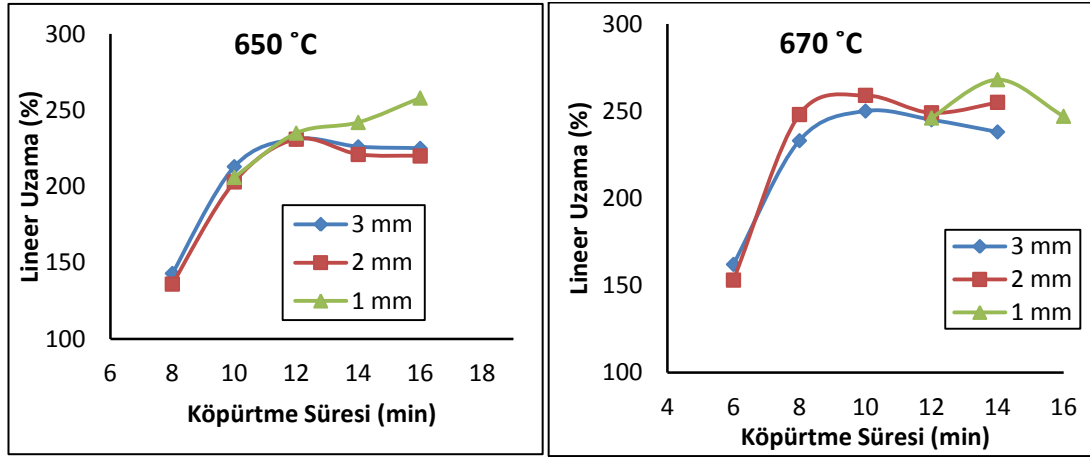
Benzer şekilde köpürtme sıcaklığının 690 ve $710 \text{ }^\circ\text{C}$ ' ye çıkartılmasıyla sandviç yapının elde edildiği köpürtme süreleri olan 8 ve 10 dakikada da yoğunluk değerleri levha kalınlığının artmasıyla kısmen artmıştır. 6 dakika köpürtme süresinde elde edilen yoğunluk değerleri azalarak 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde $1,6$ ve $1,4 \text{ g/cm}^3$, 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ise $1,4$ ve $1,3 \text{ g/cm}^3$ olmuştur. 8 dakika köpürtme süresinde ise yoğunluk değerlerinde azalma devam etmiştir. 10 , 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde ise 1 g/cm^3 ün altında yoğunluk değerleri elde edilmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6. 11. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen yoğunluk oranları.

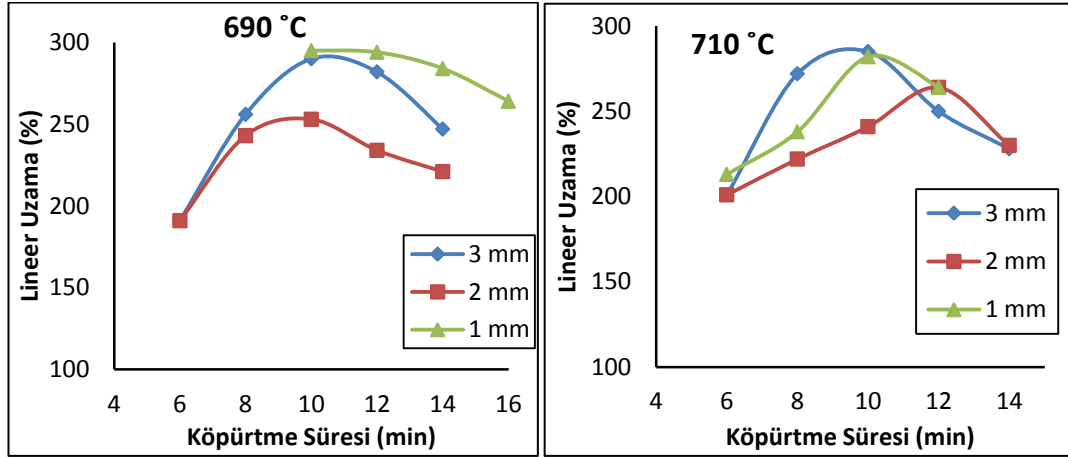
TM yöntemi ile üretilen alüminyum esaslı metalik köpüklerin yoğunluk değerlerinin 0,4-0,8 arasında değiştiği bilinmektedir [3]. Yapılan çalışmalarda yoğunluk değerlerinin fazla çıkmasının sebebi sandviç yapı için kullanılan yüzey levhalarıdır. Sandviç yapı için kullanılan levha kalınlığının artmasıyla da yoğunluk değerinin kısmen artması beklenen bir sonuçtur.

Farklı levha kalınlığına sahip ASK'lerin köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişen lineer uzama oranlarını gösteren grafik Şekil 6. 12 ve Şekil 6. 13'de verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında sandviç yapının elde edildiği 12 dakika köpürtme süresinde 1, 2 ve 3 mm kalınlığa sahip ASK'lerde yaklaşık % 230 oranında lineer uzama meydana gelmiştir. 14 dakika köpürtme süresinde ise 1 mm levha kalınlığına sahip ASK' de lineer genişleme oranı artarak % 265 olmuşken 2 mm ve 3 mm kalınlığa sahip ASK' lere %230 civarında lineer uzama meydana geldiği görülmüştür. 670 °C sıcaklıkta 12 dakika sürede yapılan köpürtme deneylerinde ise 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde lineer uzama oranı %270 iken 2 mm kalınlığa sahip ASK'lerde %220 ve 3 mm kalınlığa sahip ASK'lerde %240 civarında olmuştur. 14 dakika köpürtme işlemlerinde ise 1,2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerin için %230-245 ve 250 değerlerinde lineer uzama meydana gelmiştir.



Şekil 6. 12. 650 ve 670 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen lineer uzama oranları.

Köpürtme sıcaklığının 690°C'ye çıkartılmasıyla 8 dakikada 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde lineer uzama oranı %290 iken 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %250 civarında olmuştur. 8 dakika köpürtme süresi 1-2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yaklaşık %250 oranında lineer uzamaya neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde ise %280 oranında lineer uzama oranı elde edilmiştir. 710 °C köpürtme sıcaklığında ise 8 dakika köpürtme süresinde 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %260, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %280 civarında lineer uzama meydana gelmiştir. 10 dakika köpürtme süresinde ise 1-2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde lineer uzama oranı % 290 olmuştur (Şekil 6. 13). Görüldüğü üzere levha kalınlığının artmasıyla lineer uzama oranları bir birine yakın değerlerdedir. Ancak 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip sandviç köpüklerde yüzey levhalarının kalınlıkları (toplam 4 ve 6 mm) dikkate alındığında levha kalınlığının artmasıyla lineer uzama oranlarının azaldığı söylenebilir.

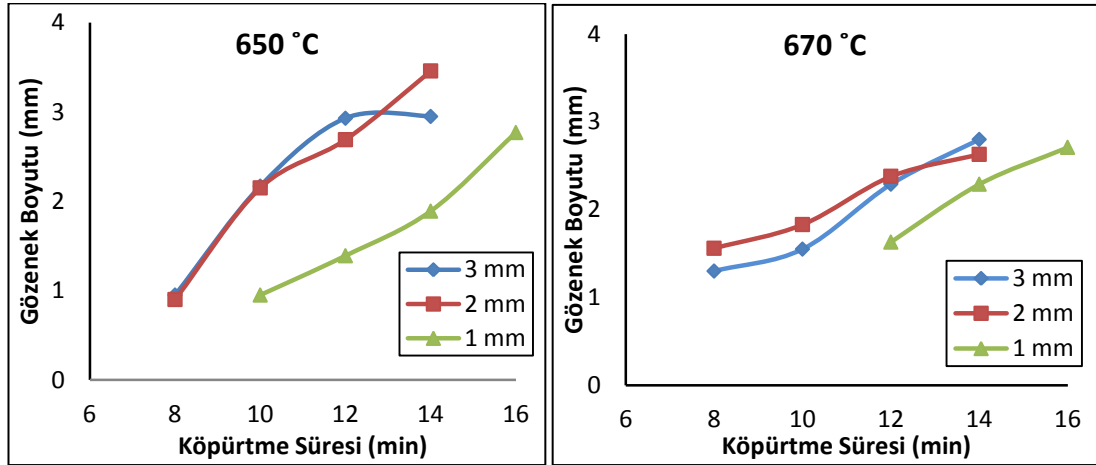


Şekil 6. 13. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen lineer uzama oranları.

Alüminyum esaslı metalik köpük üretiminde lineer uzama oranlarının %400 civarında olduğu daha önce yapılan çalışmalarda belirtilmektedir [89,90]. Sandviç köpük üretiminde ise lineer uzama oranının %300 civarında olduğu görülmektedir. Lineer uzamadaki bu azalma sandviç yapı için kullanılan yüzey levhalarından kaynaklanmaktadır. Gözeneğin iç basıncının dış basınçtan fazla olmasının gözeneklerin daha kolay büyümesine neden olduğu bilinmektedir [5,78,80]. Yüzey levhalarının ağırlığı, köpürme esnasında meydana gelen gözeneklerin üzerindeki dış basıncın artmasına neden olacağından gözeneklerin rahat büyümesini engelleyecek ve dolayısıyla lineer uzama azalacaktır.

Şekil 6. 14 ve Şekil 6. 15'de farklı köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerinde üretilen 1,2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerin gözenek boyut dağılımları verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında 12 dakikada elde edilen 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerin ortalama gözenek boyutu 1,4 mm, levha kalınlığı 2 ve 3 mm olan ASK'lerde ise ortalama gözenek boyutları sırası ile 2,7 ve 2,9 mm olmuştur. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkartılmasıyla 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ortalama gözenek boyutları 1,9 mm iken 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde sırası ile 3,2 ve 3 mm olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında 12 dakika köpürtme süresinde meydana gelen gözenekler ise 1 mm kalınlığa sahip ASK'lerde 1,6

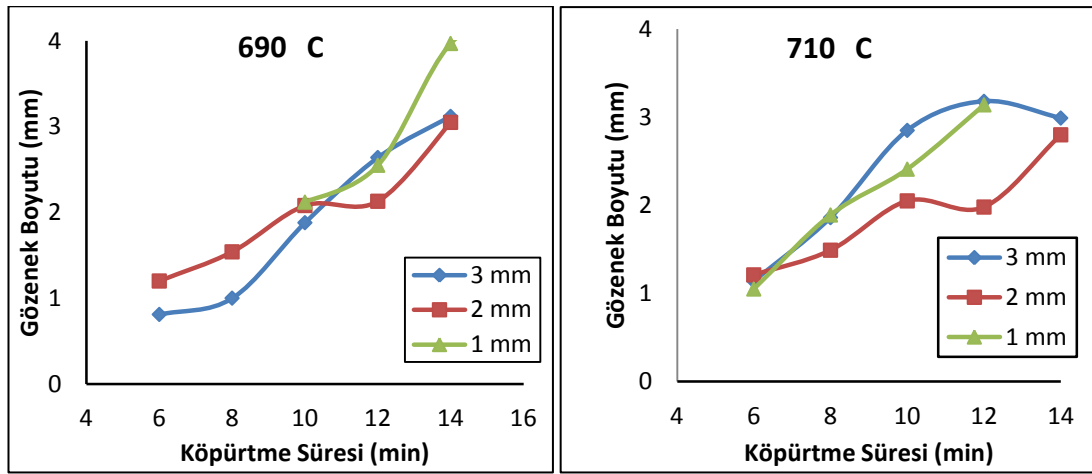
mm iken 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde gözenek boyutları artarak 2,3 mm olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise 1 mm kalınlığa sahip ASK'lerde 2,3 mm, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 2,6 ve 2,8 mm boyutlarında gözenekler elde edilmiştir (Şekil 6.14).



Şekil 6. 14. 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözenek boyutları

690 °C sıcaklıkta ve 6 dakika köpürtme süresinde elde edilen 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 1,2 mm ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ortalama 0,8 mm boyutlarında gözenekler oluştuğu görülmüştür. 8 dakika köpürtme süresinde oluşan ortalama gözenek boyutları 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 1,5 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 1 mm'dir. Köpürtme süresinin 10 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutları yaklaşık aynı değerlerde olmuştur. Benzer şekilde 12 dakika köpürtme süresi sonunda da 1,2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yaklaşık aynı değerlere sahip gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir. 14 dakika köpürtme süresinde ise 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 3,9 mm, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ise ortalama 3,1 mm boyutlarında gözenekler elde edilmiştir. 710 °C köpürtme sıcaklığında ise 6 dakikada 1,2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yaklaşık 1 mm boyutlarına sahip gözenekler oluştuğu görülmüştür. 8 dakika köpürtme süresinde bu değerler 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 1,9 mm, 2 mm

levha kalınlığına sahip ASK'lerde 1,5 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde 1,8 mm olmuştur. 10 dakika köpürtme işlemi sonunda 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ortalama 2,4 mm, 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ortalama 2 mm ve levha kalınlığı 3 mm olan ASK'lerde ortalama 2,8 mm boyutlarında gözenekler elde edilmiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılmasıyla 1 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ortalama 3,1 mm ve levha kalınlığı 2 mm olan ASK'lerde ortalama 2,2 mm boyutlarında gözenekler oluşmuştur (Şekil 6.15).

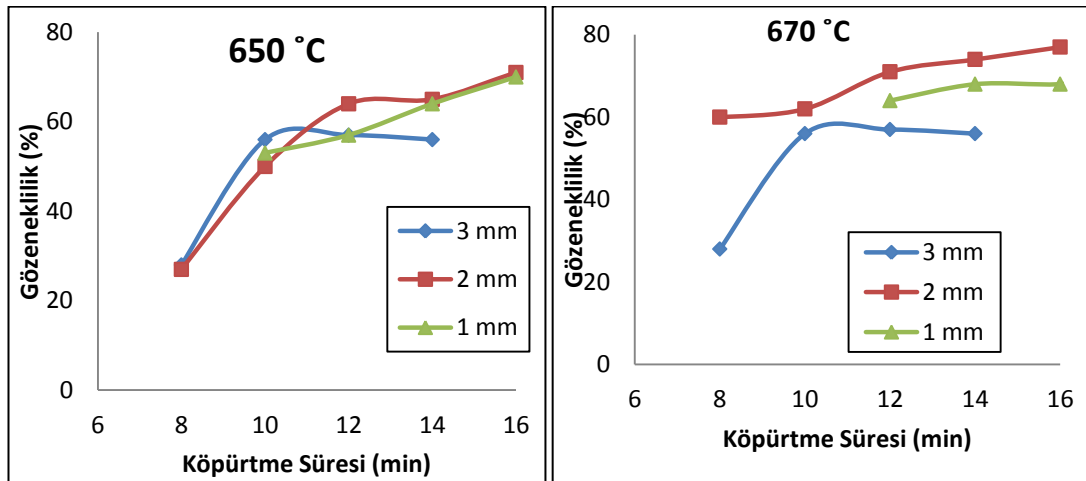


Şekil 6. 15. 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözenek boyutları

650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında artan yüzey levha kalınlığının gözenek boyutlarının artmasına neden olduğu görülmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur zira levha kalınlığının artmasıyla gözeneklerin iç basıncına etkiyen dış basıncın artmasıyla gözenekler büyüyemeyeceğinden birleşme eğiliminde olacaklardır. Dolayısıyla gözenek boyutları artacaktır. 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında ise levha kalınlığının gözenek boyutlarına etki ettiği söylenemez. Bu durumun artan sıcaklıkla birlikte reaksiyon hızının artması ve viskozitenin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

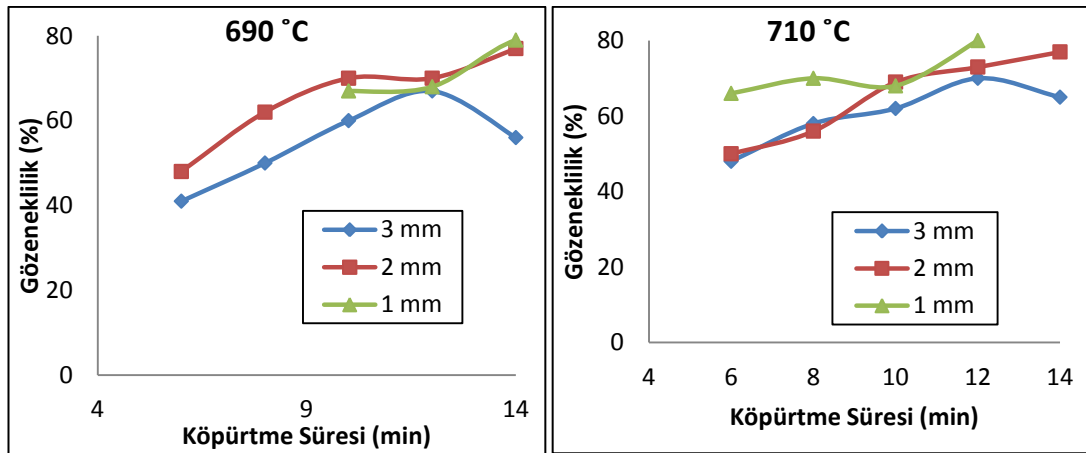
Levha kalınlıkları farklı olan ASK'lerin gözeneklilik oranlarını belirlemek için yapılan incelemeler sonucunda elde edilen grafikler Şekil 6. 16 ve Şekil 6.

17'de verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakikada 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %27 gözeneklilik meydana gelmiştir. 10 dakika sonrasında 1, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde % 50 gözeneklilik oluşmuştur. 12 dakika köpürtme işleminin ardından 1 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde % 57, levha kalınlığı 2 mm olan ASK'lerde %64 gözeneklilik olduğu tespit edilmiştir. 14 dakika köpürtme süresinde elde edilen 1,2 ve 3 mm kalınlığına sahip ASK'lerin gözeneklilik oranları sırası ile %60, %66 ve %57 olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında 6 dakika köpürtme süresi 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %28, 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %32 gözeneklilik elde edilmesine neden olmuştur. 8 dakikada meydana gelen gözeneklilik oranları ise 2 mm kalınlığa sahip ASK'lerde %60, 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ise %50'dir. 10 dakika köpürtme işlemi sonunda 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %62, 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ise %55 oranında gözeneklilik elde edilmiştir. 12 dakika köpürtme süresinde ise yaklaşık aynı değerlerde gözeneklilik oluşmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise gözeneklilik oranlarının 1 ve 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yakın değerlerde levha kalınlığı 3 mm olan ASK'lerde ise kısmen düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 6. 16. 650 ve 670 °C Köpürtme sıcaklıklarında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözeneklilik oranları.

690 °C sıcaklıkta ve 6 dakika köpürtme süresinde elde edilen 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %46 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %40 gözenekliliğin olduğu görülmüştür. 8 dakika köpürtme süresinde oluşan gözeneklilik oranları 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %60 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %50'dir. Köpürtme süresinin 10 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranları 1 ve 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %68, 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %60 olmuştur. 12 dakika köpürtme işlemi sonunda 1,2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yaklaşık aynı değerlere (%69, 70, 67) sahip gözeneklilik olduğu tespit edilmiştir. 14 dakikada ise 1 ve 2 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %80, 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde ise %60 oranında gözeneklilik elde edilmiştir. 710 °C köpürtme sıcaklığında ise 6 dakika köpürtme süresinde 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %65, 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %50 oranında gözeneklilik oluşmuştur. 8 dakikada bu değerler 1 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %70 iken 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %57 olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde ise 1,2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde yaklaşık %65 oranında gözenekliliğin olduğu görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılmasıyla 2 ve 3 mm levha kalınlığına sahip ASK'lerde %70 ve levha kalınlığı 1 mm olan ASK'lerde %80 oranında gözeneklilik oluşmuştur.



Şekil 6. 17. 690 ve 710 °C Köpürtme sıcaklığında köpürtme süresine bağlı olarak değişen gözeneklilik oranları.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda düşük köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerinde; düşük gözeneklilik oranı, yüksek yoğunluk, düşük lineer uzama oranı ve küçük gözeneklerin olduğu görülmüştür. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerinin artması gözeneklilik oranları, lineer uzama oranları ve gözenek boyutlarında artışa, yoğunluk değerlerinde ise azalmaya neden olmuştur. Ancak yüksek köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerinde sandviç yapının bozulduğu tespit edilmiştir. Levha kalınlığındaki artışın ise lineer uzama, gözenek ebatları, yoğunluk ve gözeneklilik oranına kısmi etkileri olduğu görülmüştür. 1, 2 ve 3 mm levha kalınlığı kullanılarak hazırlanan numunelerin 650, 670, 690 ve 710 °C sıcaklıklarda yapılan deneylerde sandviç yapıların elde edildiği köpürtme süreleri ve özellikler Çizelge 6. 1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1. Sandviç yapının elde edildiği köpürtme süreleri ve özellikler.

Köpürtme Sıcaklığı (°C)	Levha Kalınlığı (mm)	Köpürtme Süresi (min)	Yoğunluk (g/cm ³)	Lineer Uzama (%)	Gözenek Boyutu (mm)	Gözeneklilik (%)
650	1	12-14	1,02-0,97	232-264	1,39-1,89	57-60
	2	12-14	0,96-0,95	221-231	2,69-3,20	64-66
	3	12-14	1,16-1,17	228-225	2,93-3,00	56-57
670	1	12-14	0,97-0,82	268-246	1,63-2,29	63-67
	2	12-14	1,03-0,72	222-231	2,27-2,58	62-73
	3	12-14	1,21-1,21	245-250	2,25-2,79	55-67
690	1	10-12	0,82-0,86	294-295	2,12-2,55	68-69
	2	8-10	1,02-0,83	253-243	1,49-1,98	60-68
	3	8-10	1,34-1,02	256-285	1,00-1,88	50-60
710	1	8-10	0,82-0,87	260-290	1,89-2,41	70-65
	2	8-10	1,18-0,83	280-290	1,49-1,98	57-65
	3	8-10	1,11-1,02	272-285	1,86-2,85	62-70

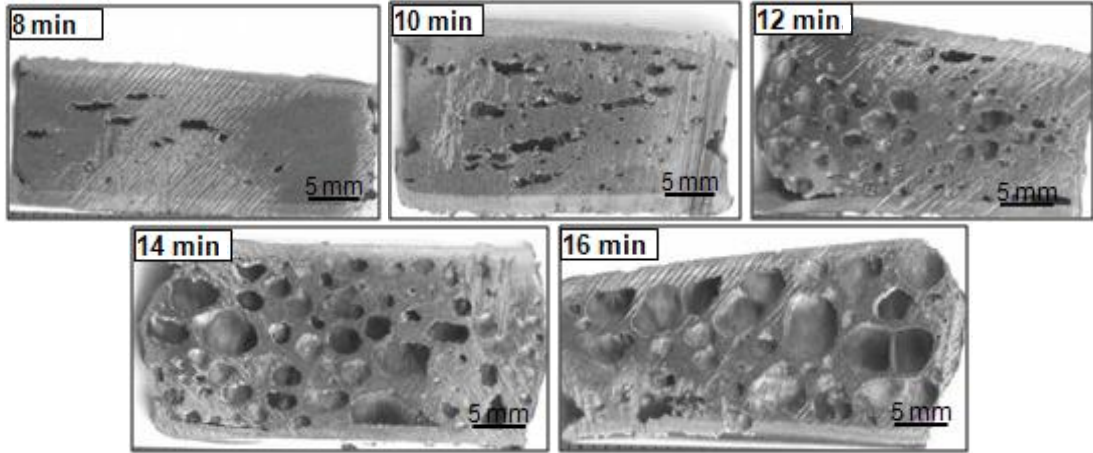
6.6. Partikül İlavesinin Sandviç Yapı ve Köpürme Özelliklerine Etkileri

6.6.1. Partikül ilavesinin gözenek yapısına etkileri

B_4C , SiC ve Al_2O_3 ilavesinin köpürme özellikleri ve sandviç yapıya etkilerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda Al,%7 Si, %0,6 Mg ve %0,8 TiH₂ tozlarına %5 oranında B_4C , SiC ve Al_2O_3 ayrı ayrı ilave edilerek karıştırılmıştır. Karışım tozlar sıkıştırıldıktan sonra 500 °C sıcaklıkta ekstrüze edilerek 2 mm levha kalınlığındaki Al levhalar arasında 500 °C' de haddelenmiştir. Haddelenen numuneler 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıkları ve 6 ile 16 dakika arasındaki köpürtme süreleri kullanılarak köpürtülmüştür.

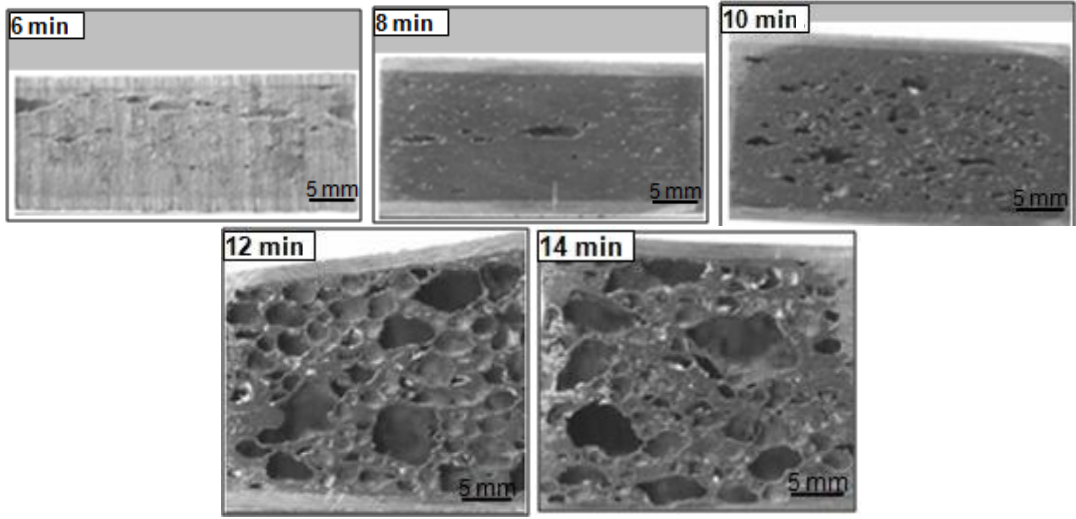
B_4C ilavesinin gözenek yapısına etkileri

Gözenek yapılarına B_4C ilavesinin etkisinin belirlenmesi amacıyla 650 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen ASK'lere ait gözenek yapıları Resim 6.18'de görülmektedir. 8 dakika köpürtme süresinde yönlendirilmiş gözenekler oluşmuşken 10 dakikada gözenekler homojen dağılım sergilemiş ve genellikle yönlendirilmiştir. 12 dakika sonrasında gözenekler kısmen homojen dağılım sergilerken bazı bölgelerde gözeneklerin fazla olduğu bazı bölgelerde ise katı fazın fazla olduğu görülmüştür. 14 dakika köpürtme süresi ise gözeneklerde büyüme ve küreselleşmeye neden olurken gözenek duvarlarının kalın olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 16 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklerde birleşme meydana gelmiştir.



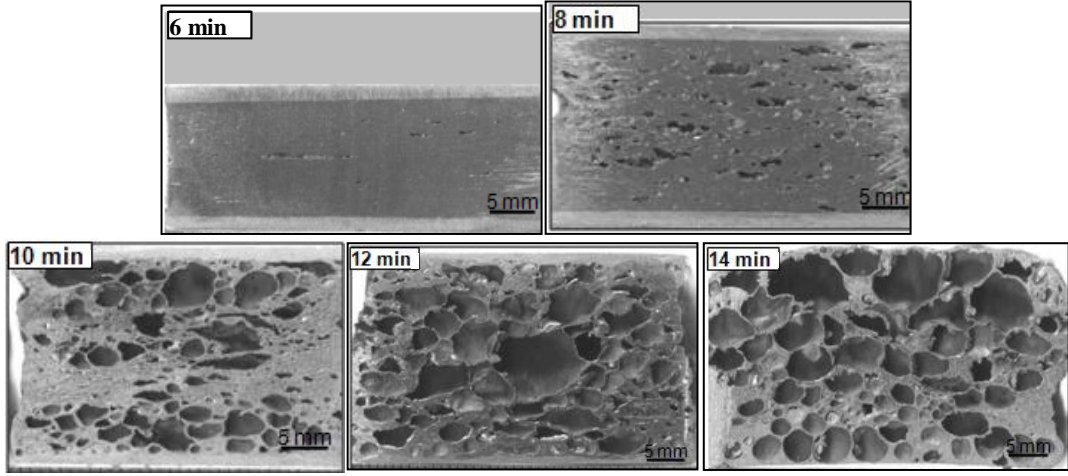
Resim 6.18. 650 °C'de B₄C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

Resim 6.19'da B₄C ilave edilerek 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lere ait gözenek yapılarını gösteren resim verilmiştir. 6 dakika köpürtme süresinde gözeneklerin kısmen oluştuğu, gözenek yapılarının levha şeklinde olduğu ve gözenek dağılımının homojen olmadığı görülmektedir. 8 dakikada oluşan gözeneklerde de benzer özellikler görülürken sadece gözenek boyutlarında kısmen büyüme olduğu görülmüştür. 10 dakika sonrasında oluşan gözenekler daha belirgin ve genellikle levha görünümündedir. Gözenek dağılımının ise homojen olduğu ancak katı bölgelerin fazla olduğu gözlemlenmiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılması gözenekler arasındaki katı bölgelerin azalmasına, gözeneklerde büyümeye ve gözenekleri birbirinden ayıran gözenek duvarlarının daha belirgin olmasına neden olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapıda bozulma görülmüştür.



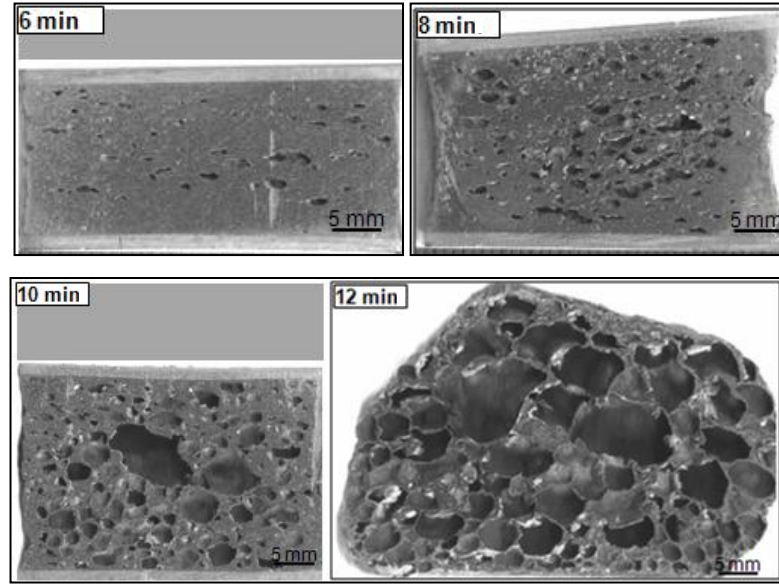
Resim 6.19. 670 °C'de B₄C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen B₄C ilaveli ASK'lere ait gözenek yapılarını gösteren görüntü Resim 6.20'de verilmiştir. 6 dakika köpürtme süresinde bazı bölgelerde levha şeklinde gözeneklerin oluşurken 8 dakika köpürtme süresinde elips şeklinde, haddeme yönünde yönlenmiş ve homojen dağılımlı gözenekler oluşmuştur. 10 dakika köpürtme işleminin ardından gözenek boyutları ve gözenek yapıları farklılık göstermekle birlikte levhalara yakın yüzeylerde büyük boyutlara sahip gözeneklerin yer aldığı görülmüştür. 12 dakika köpürtme süresi gözenek yapılarında farklılığa, gözenek duvar kalınlığında incelmeye ve sandviç yapıda kısmi bozulmalara neden olmuştur. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkartılmasıyla ovalimsi gözenek yapıları oluşmuş ancak sandviç yapıda bozulma meydana gelmiştir.



Resim 6.20. 690 °C'de B₄C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

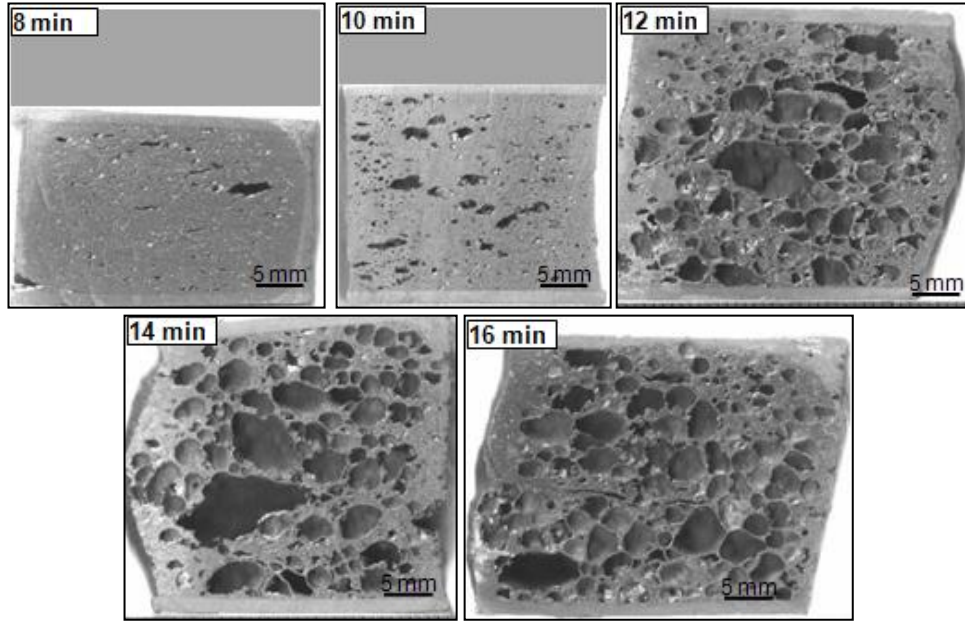
B₄C ilave edilerek 710 °C köpürtme sıcaklığında ve 6, 8, 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde elde edilen ASK'lere ait gözenek yapıları Resim 6.21'de verilen resimlerde görülmektedir. 6 dakika köpürtme süresi kullanılarak elde edilen ASK'lerde kısmi gözeneklilik oluşmuş ve oluşan gözeneklerin bazı bölgelerde elips şeklinde bazı bölgelerde de ovalimsi şekil aldığı görülmektedir. Köpürtme süresi 8 dakika olan ASK'lerde oluşan gözenekler düzensiz şekilde olup gözenek oranı artmış ancak hala katı faz oranının gözenek oranından fazla olduğu tespit edilmiştir. Gözeneklerin homojen dağılım sergilediği görülmüştür. Benzer şekilde 10 dakika köpürtme süresinde elde edilen ASK'lerde de homojen dağılım göstermiş olan gözeneklerin düzensiz şekillere sahip olduğu, gözenek birleşmelerinden dolayı bazı bölgelerde gözenek irileşmesinin meydana geldiği ve katı faz oranının azalarak gözenek duvarlarının oluştuğu görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılması homojen dağılımlı gözeneklerin duvar kalınlıklarının incelmeye ve sandviç yapının bozulmasına neden olmuştur.



Resim 6.21. 710 °C'de B₄C ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

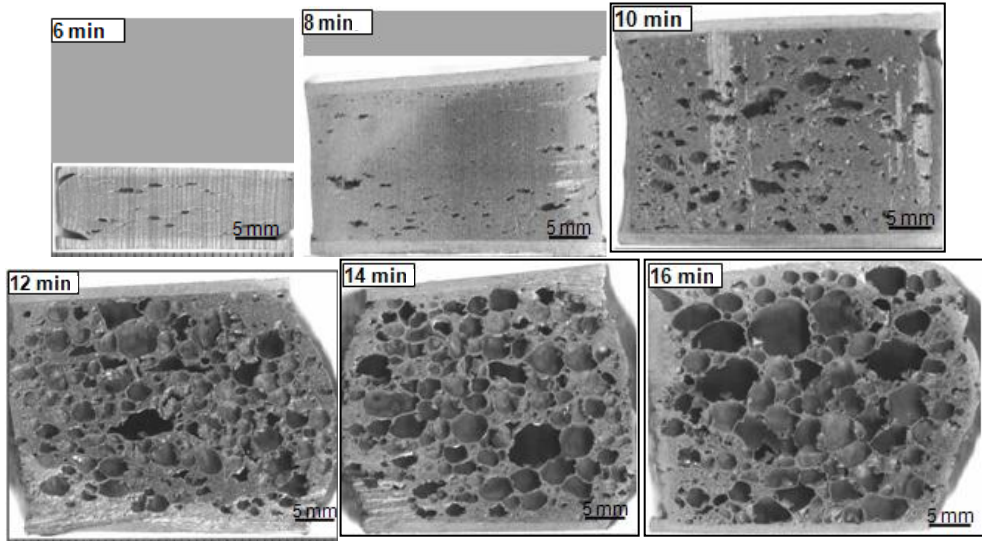
6.6.1.2.SiC ilavesinin gözenek yapısına etkileri

SiC ilave edilerek 650-670-690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında ve 6 ila 18 dakika arasındaki köpürtme sürelerinde elde edilen ASK'lere ait görüntüler Resim 6.22, Resim 6.23, Resim 6.24 ve Resim 6.25'te verilmiştir. Resim 6.22'de verilen 650 °C sıcaklıkta elde edilen ASK'lere ait resimler incelendiğinde; 8 ve 10 dakika köpürtme sürelerinde homojen dağılımlı ve levha şeklinde küçük gözeneklerin olduğu, katı faz oranının ise fazla olduğu görülmektedir. 12 dakika köpürtme süresi sonucu elde edilen ASK'lere ait gözenek boyutlarında artma meydana gelirken katı faz oranı azalarak ince gözenek duvarları meydana gelmiştir. Köpürtme süresinin 14 dakika çıkartılmasıyla homojen dağılımlı olan karmaşık şekilli gözeneklerde özellikle merkeze yakın bölgelerde yer yer irileşme görülmüştür. 16 dakika köpürtme süresinde ise küresele benzer gözenek yapıları oluşmuş ancak sandviç yapıda bozulmalar meydana gelmiştir.



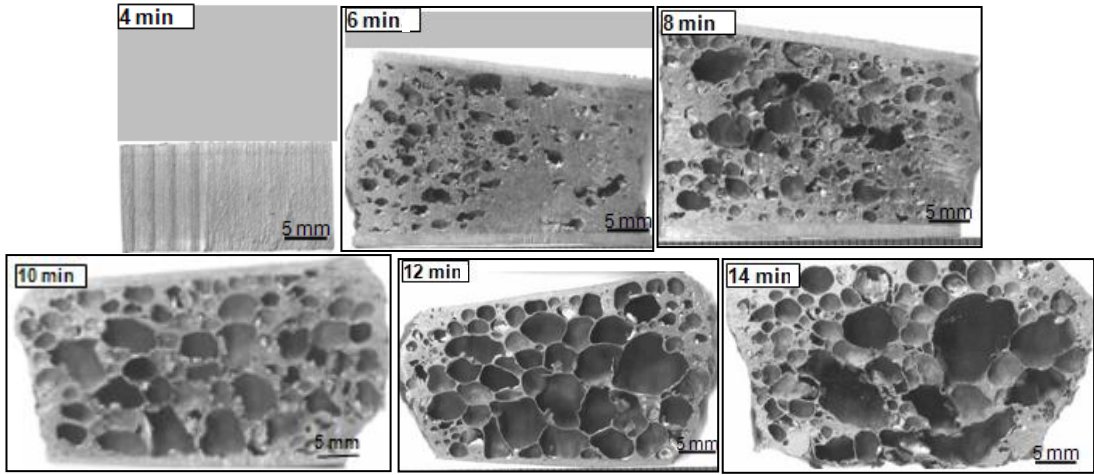
Resim 6.22. 650 °C'de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları

Köpürtme sıcaklığı 670 °C ve köpürtme süresi 6, 8, 10, 12, 14 ve 16 dakika olan SiC ilaveli ASK'lerin gözenek yapıları Resim 6.23'te görülmektedir. 6 dakikada bazı bölgelerde elips şekilde gözenekler oluşmuşken 8 dakika köpürtme süresinde bu sütunsal gözeneklerin homojen dağılımlı olduğu ve boyutlarının küçük olduğu görülmektedir. 10 dakika sonrasında irili ufaklı ve haddelene yönünde büyüyen bu gözeneklerin homojen dağılımlı oldukları görülmüştür. Her iki köpükte de katı faz oranının fazla olduğu tespit edilmiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılması gözenek yapılarının küresele yakın olmasına ve katı faz oranının azalarak gözenekleri ayıran gözenek duvarlarının oluşmasına neden olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise küresele yakın görünümdeki gözeneklerin boyutlarında artış meydana gelmiş ve gözenek duvar kalınlıklarında azalma meydana gelmiştir. 16 dakika köpürtme süresi kullanıldığında sandviç yapının bozulduğu görülmüştür.



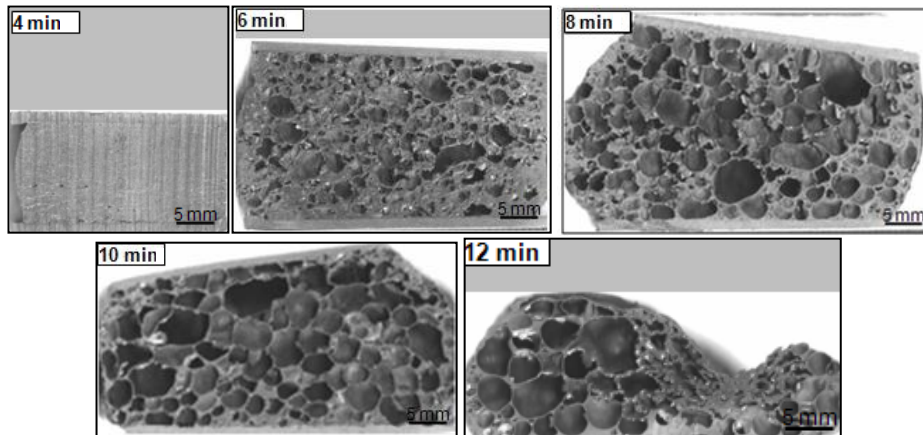
Resim 6.23. 670 °C'de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

Resim 6.24'te 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lere ait gözenek yapıları verilmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye yükseltilmesi ile 6 dakika köpürtme süresi homojen dağılımlı ve kısmen yönlendirilmiş gözeneklerin oluşmasına ve özellikle yanal yüzeye yakın bölgelerde katı faz yoğunluğunun olmasına neden olmuştur. 8 dakika köpürtme süresinde katı faz bölgelerinde azalma meydana gelirken gözenek yapılarında kısmi küreselleşme meydana gelmiştir. Köpürtme süresinin 10 dakikaya çıkartılmasıyla gözenek boyutlarında artış meydana gelirken gözenek duvarları incelmış ve yer yer gözeneklerde birleşme görülmüştür. 12 dakika köpürtme işleminde ise gözeneklerde irileşme, gözenek duvar kalınlıklarında incelme görülmüş ancak sandviç yapıda bozulma görülmüştür. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkartılmasıyla sandviç yapı ve gözenek yapıları bozulmuştur.



Resim 6.24. 690 °C'de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

SiC ilave edilerek 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lere ait gözenek yapılarını gösteren resimler Resim 6.25'te görülmektedir. 4 dakikada makro boyutta gözeneklerin oluşmadığı görülürken 6 dakikada homojen dağılımlı ve karmaşık şekilli ve küçük gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. Köpürtme süresinin 8 dakikaya çıkartılmasıyla homojen dağılımlı olan gözenekler küresele yakın görünümde oluşmuş ve gözenek duvarları incelmıştır. 10 dakika köpürtme süresinde ise homojen dağılımlı olan karmaşık şekilli gözeneklerde irileşme görülmüştür. 12 dakika köpürtme süresi gözeneklerde ve sandviç yapıda bozulmaya neden olmuştur.

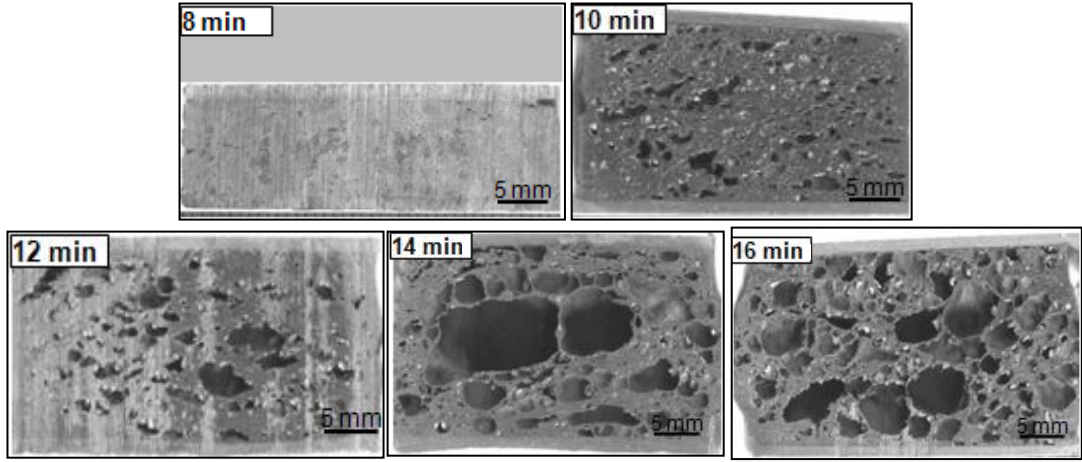


Resim 6.25. 710 °C'de SiC ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları

SiC ilave edilerek üretilen sandviç köpüklerde 650 °C köpürtme sıcaklığında 14 ve 16 dakikada, 670 C sıcaklıkta 12 ve 14 dakikada, 690 °C'de 8 ve 10 dakikada 710 °C sıcaklıkta ise 6,8 ve 10 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı elde edilmiştir. Görüldüğü üzere köpürtme sıcaklığı arttıkça sandviç yapının elde edildiği köpürtme süresi kısalmıştır. Ayrıca köpürtme süresi arttıkça gözenek irileşmesi meydana gelirken sandviç yapı bozulmuştur. Gözeneklerde bozulma çökme ve irileşme olmak üzere iki yolla meydana gelir [91]. İrileşme küçük gözeneklerin büyümesiyle meydana gelir. Bu irileşme birbirine bitişik iki gözeneğin gözenek duvarının kırılmasından veya birbirine bitişik iki gözenek arasında basınç farkından dolayı kaynaklanır. Gözeneklerde çökme ise drenaj etkisinden kaynaklanmaktadır. Drenaj, yerçekimi etkisine bağlı olarak ergiyik haldeki gözenek duvarının aşağı doğru akmasıdır. Drenaj ortada kalın duvarlı gözenek ve altta yoğun sıvı metal tabakası şeklinde sonuçlanır.

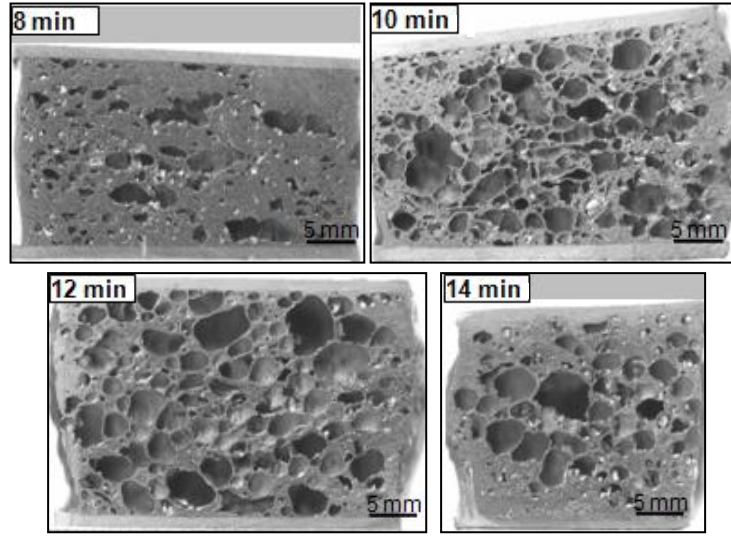
6.6.1.3. Al₂O₃ ilavesinin gözenek yapısına etkileri

Resim 6.26'da verilen 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen Al₂O₃ ilaveli ASK'lere ait resimler incelendiğinde 8 dakika köpürtme süresinde makro boyutta gözeneklerin oluşmadığı belirlenmiştir. 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde üretilen ASK'lerde homojen dağılımlı ve eliptik gözeneklerin olduğu ve gözenekler arasında katı faz bölgelerin fazla olduğu görülmüştür. 14 dakikada üretilen ASK'lerde farklı boyutlarda gözenekler oluşmuş ve orta bölgede gözenek birleşmesinden kaynaklanan gözenek irileşmesi meydana gelmiştir. Benzer durum 16 dakika köpürtme süresinde üretilen ASK'lerde de görülmüş ancak bu ASK'lerde gözenek duvar kalınlıklarında incelmeye olduğu tespit edilmiştir. Sandviç yapı 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde elde edilmiştir. Köpürtme süresinin gözenek boyutlarına etkisi Bölüm 6. 4'de açıklanmıştır.



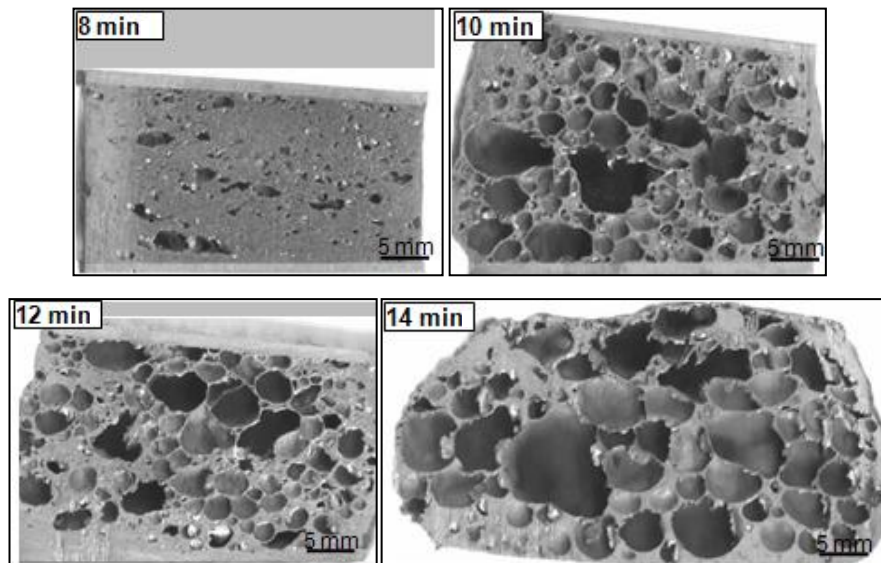
Resim 6.26. 650 °C'de Al_2O_3 ilaveli ASK'lerin gözenek yapıları.

670 °C köpürtme sıcaklıklarında ve 8 dakika köpürme süresinde üretilen ASK'lere ait gözeneklerin küçük, homojen dağılımlı, elips şeklinde olduğu ve yapının genellikle katı faz bölgelerinden oluştuğu görülmüştür. 10 dakika köpürtme süresi ASK'lerde oluşan gözeneklerin homojen dağılmasına, gözenek yapılarının karmaşık şekle sahip olmasına ve katı faz bölgelerinin azalarak gözenek duvarlarının oluşmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkartılmasıyla elde edilen ASK'lerde gözenek yapıları genellikle küresele yakın görünümde oluşmuş ve gözenek boyutlarında artış olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapıda kısmi bozulma olduğu tespit edilmiştir (Resim 6.27). Dolayısıyla sandviç yapı 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde elde edilebilmiştir.



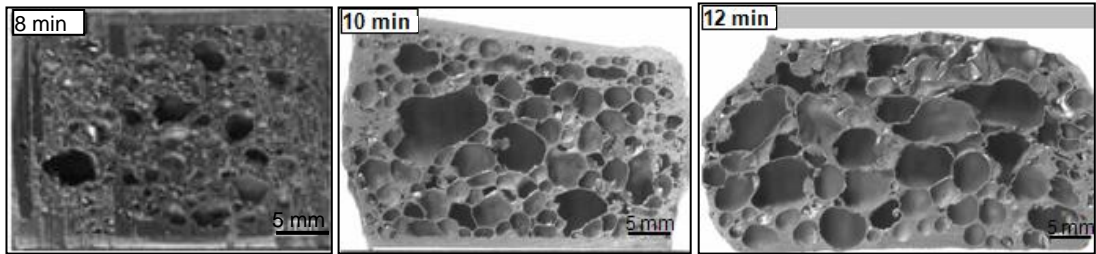
Resim 6.27. 670 °C'de Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin gözenek yapıları.

Köpürtme sıcaklığının 690 °C' ye çıkartılmasıyla 8 dakika köpürtme süresinde elde edilen ASK'lerin homojen dağılımlı karmaşık şekilli gözeneklere sahip olduğu Resim 6.28' de görülmektedir. 10 ve 12 dakika köpürtme süreleri ASK'lerde oluşan gözeneklerin homojen dağılımlı, karmaşık şekilli oluşmasına ve gözenek duvar kalınlıklarının incelmesine neden olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapının tamamen bozulduğu görülmüştür.



Resim 6.28. 690 °C'de Al₂O₃ ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

710 °C köpürtme sıcaklığında elde edilen ASK'lere ait gözenek yapıları Resim 6.29' da gösterilmiştir. 8 dakikada homojen dağılımlı ve karmaşık şekilli gözeneklerin oluştuğu ve oluşan bu gözenekleri ayıran gözenek duvarlarına sahip olduğu görülmüştür. 10 dakika köpürtme işleminin ardından homojen dağılıma sahip gözenek boyutlarının arttığı ve gözenek duvar kalınlığının incelendiği belirlenmiştir. 12 dakika köpürtme süresinin ise sandviç yapının bozulmasına neden olduğu tespit edilmiştir.



Resim 6.29. 710 °C' de Al_2O_3 ilave edilerek elde edilen ASK'lerin gözenek yapıları.

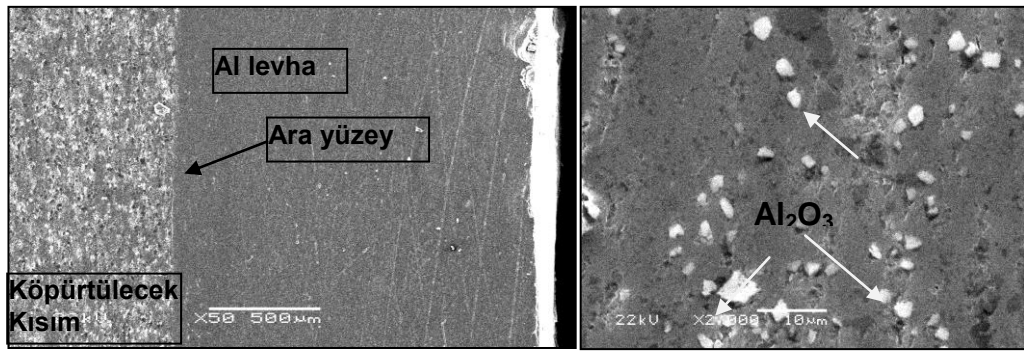
Al_2O_3 ilave edilerek üretilen sandviç köpüklerde 650 °C köpürtme sıcaklığında 14 ve 16 dakikada, 670 °C ve 690 C'de 10 ve 12 dakikada, 710 °C sıcaklıkta ise 8 ve 10 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı elde edilmiştir. Görüldüğü üzere köpürtme sıcaklığı arttıkça sandviç yapının elde edildiği köpürtme süresi kısalmıştır.

6.6.2. Partikül ilaveli ASK'lerin mikroyapısal karakterizasyonu

6.6.2.1. Haddeme sonrası karakterizasyon

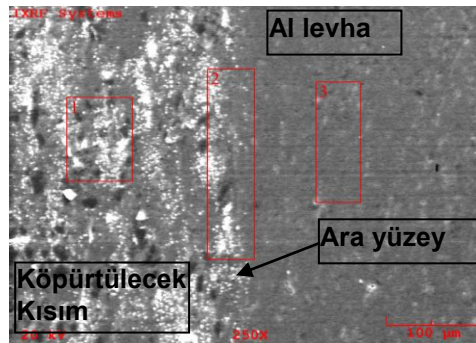
Haddeme sonrası Al_2O_3 parçacıklarının AlSi7Mg0,6 içerisindeki dağılımı ile Al levha ve köpürtülecek ön şekil numunenin arayüzey resimleri Resim 6.30'da verilmiştir. Resim 6.30a'da haddeme öncesi 2 mm olan Al levhanın haddeme sonrasında kalınlığının değişmediği görülmektedir. Bu durum, ön şekil numunenin ekstrüzyon sonrası küçülen gözeneklerinin haddeme

esnasında kapanma eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır. Bir diğer sebep ise haddeleme esnasında soğuk olan merdaneler yüzeydeki Al levhaların soğuma hızını artırması nedeniyle merkezde bulunan ve daha sıcak olan ön şekil numunenin daha fazla deformasyona uğramasıdır. Resim 6.30b'de ise Al_2O_3 parçacıklarının matris içerisinde homojen dağıldığı matris içerisine gömüldüğü ve parçacık/matris arayüzeyinde yer yer mikro boşlukların olduğu görülmüştür.

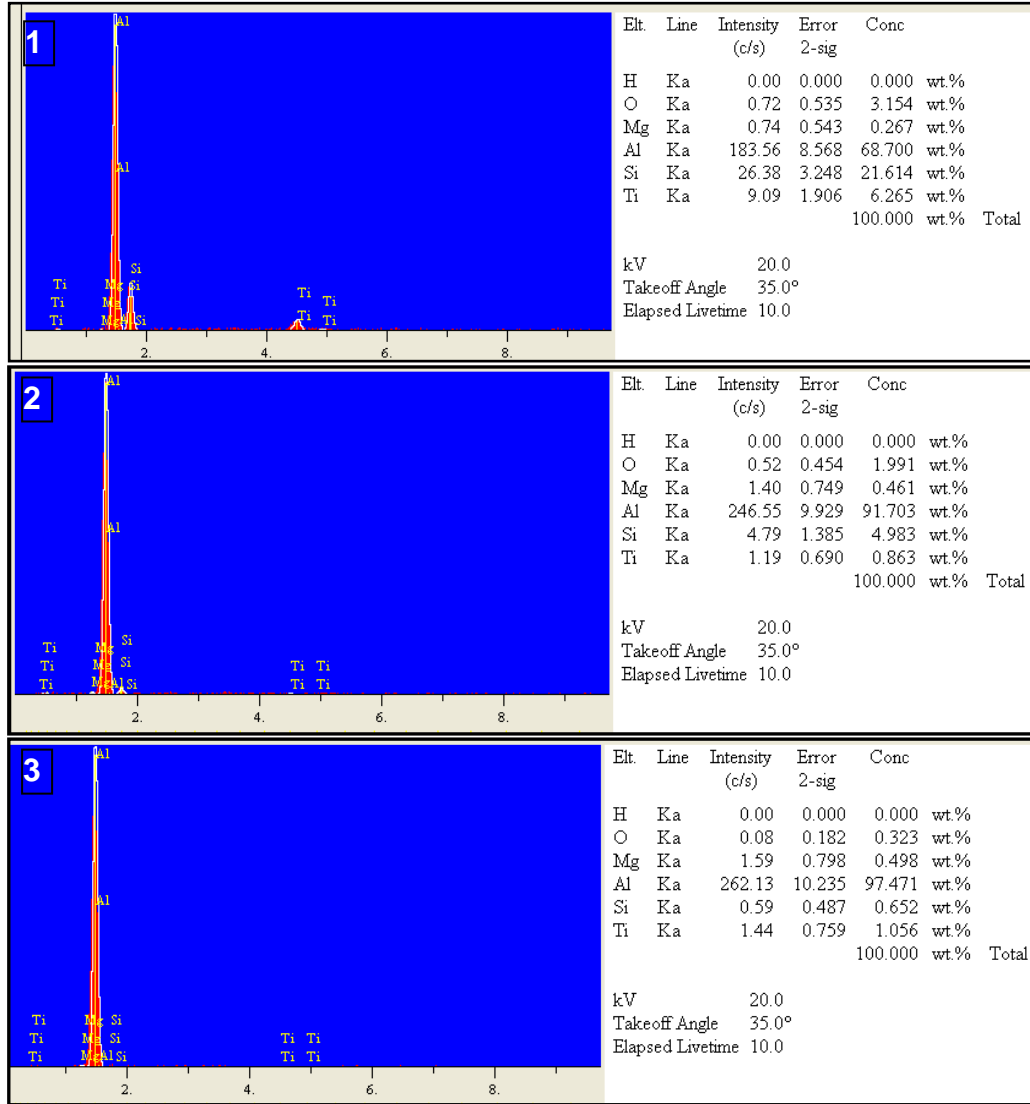


Resim 6.30. a)Ön şekil numune ve Al levha arayüzeyi, b)Matris içerisinde Al_2O_3 dağılımı.

Resim 6.31'de Al levha ile Al_2O_3 ilaveli ön şekil numune arayüzeyinde birleşmenin olduğu görülmektedir. Haddeleme sonrasında, ön şekil numunede bulunan silisyumun arayüzeyde de bulunduğu ve Al levha içerisinde eser miktarda bulunduğu Şekil 6.18'de verilen EDX analizlerinden tespit edilmiştir. Arayüzeyde silisyumun bulunmasının EDX analizinin ön şekil numune ve Al levhayı kapsayacak şekilde bölgesel yapılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

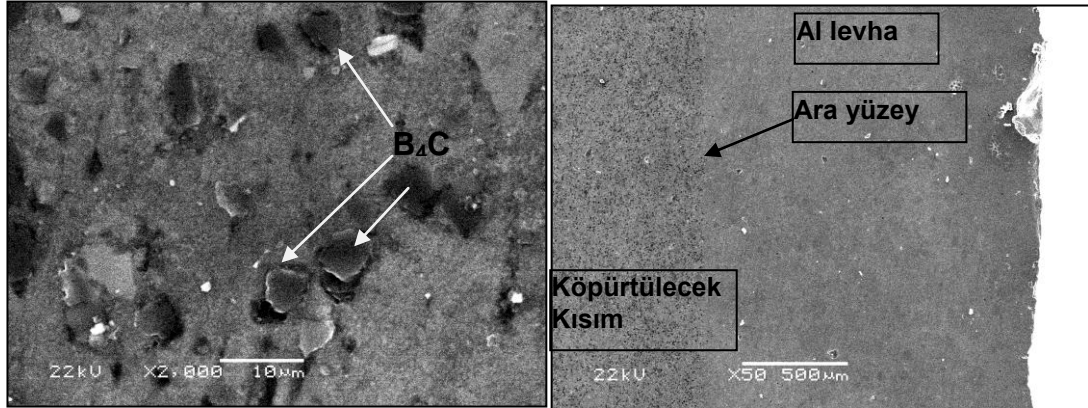


Resim 6.31. EDX analiz bölgelerini gösteren ait SEM resmi.



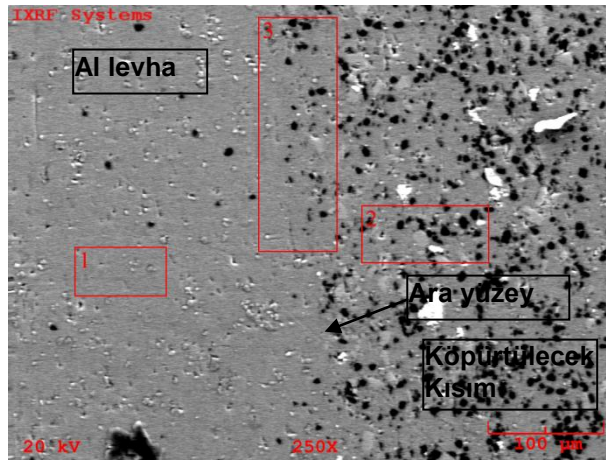
Şekil 6.18. 1)Ön şekil numuneye, 2)arayüzey ve 3)Al levhaya ait EDX analizi.

B₄C parçacıklarının haddeme sonrası matris içerisinde homojen dağılım sergilediği ve parçacıklar ile matris arayüzeyinde mikro boşlukların olduğu Resim 6. 32a'da verilen SEM resimlerinde görülmektedir. Haddeme sonrası Al levhanın kalınlığının değişmediği ise Resim 32b'de verilen SEM resimlerinden anlaşılmaktadır.

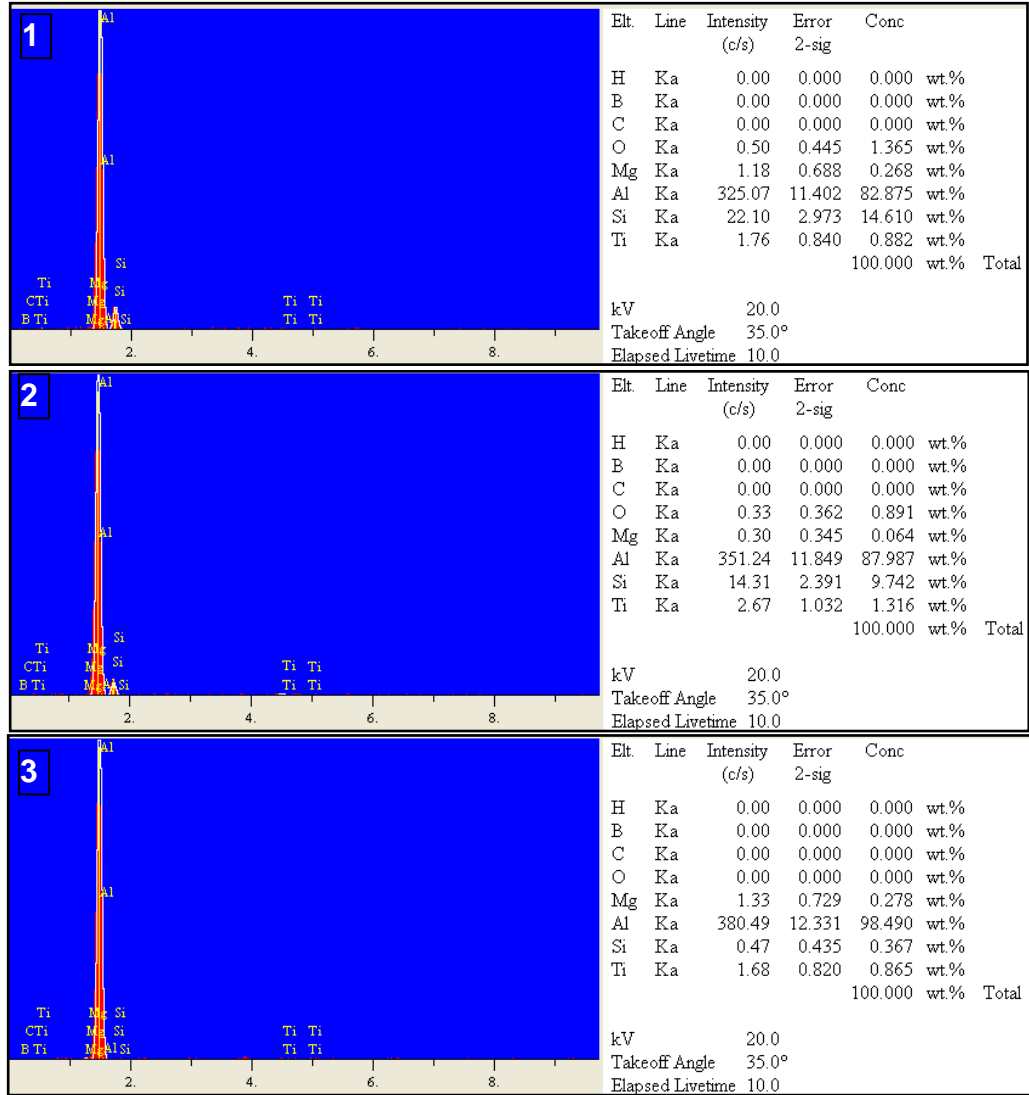


Resim 6.32. a) B₄C parçacık dağılımı, b) Al levha ve parçacık arayüzeyine ait SEM resimleri.

Resim 6.33'te B₄C ilaveli ön şekil numune ve Al levha arayüzey durumunu gösteren SEM resmi verilmiştir. Resimden de anlaşıldığı gibi ön şekil numune ile Al levha arayüzeyinde birleşme meydana gelmiş ve arayüzey çizgisi oluşmamıştır. Al₂O₃ ilaveli ön şekil numunelerde olduğu gibi B₄C ilaveli ön şekil numunelerde de silisyum arayüzeyde bulunurken Al levha içerisinde kısmen bulunduğu Şekil 6.19'da verilen EDX analizlerinden anlaşılmaktadır.

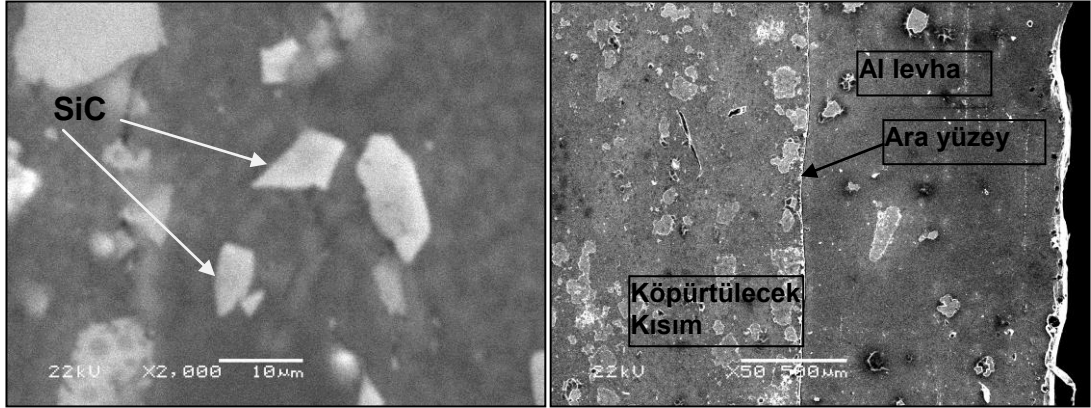


Resim 6.33. B₄C ilaveli önşekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi.



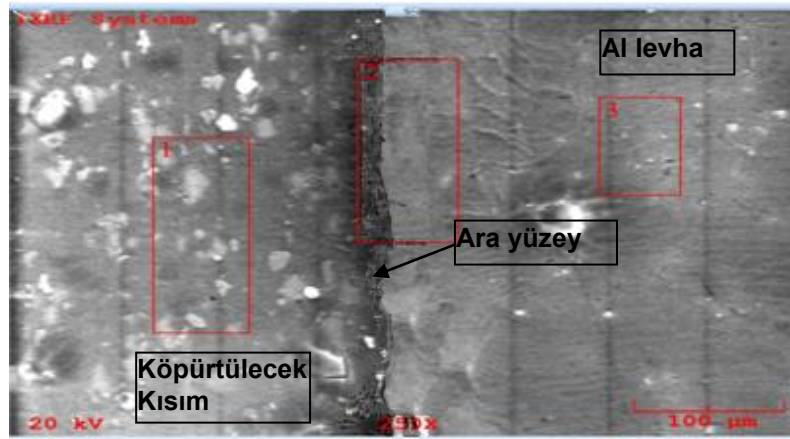
Şekil 6.19. B₄C ilaveli önşekil numune ait EDX analizleri
1)Ön şekil numune, 2)arayüzey, 3)Al levha

Resim 6.34'te SiC ilaveli önşekil numunelerde parçacık dağılımı ve arayüzey resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde SiC parçacıklarının matris içerisinde homojen dağıldığı ve matris içerisine gömüldüğü görülmüştür. Al₂O₃ ve B₄C ilaveli önşekil numunelerde parçacık ile matris arasında mikro boşluklar bulunurken SiC ilaveli önşekil numunelerde parçacık/matris arayüzeyinde mikro boşlukların oluşmadığı tespit edilmiştir (Resim 6.34a). Yine benzer şekilde haddeleme sonrasında Al levha kalınlığı değişmediği Resim 6.34b'de verilen SEM resminden anlaşılmaktadır.

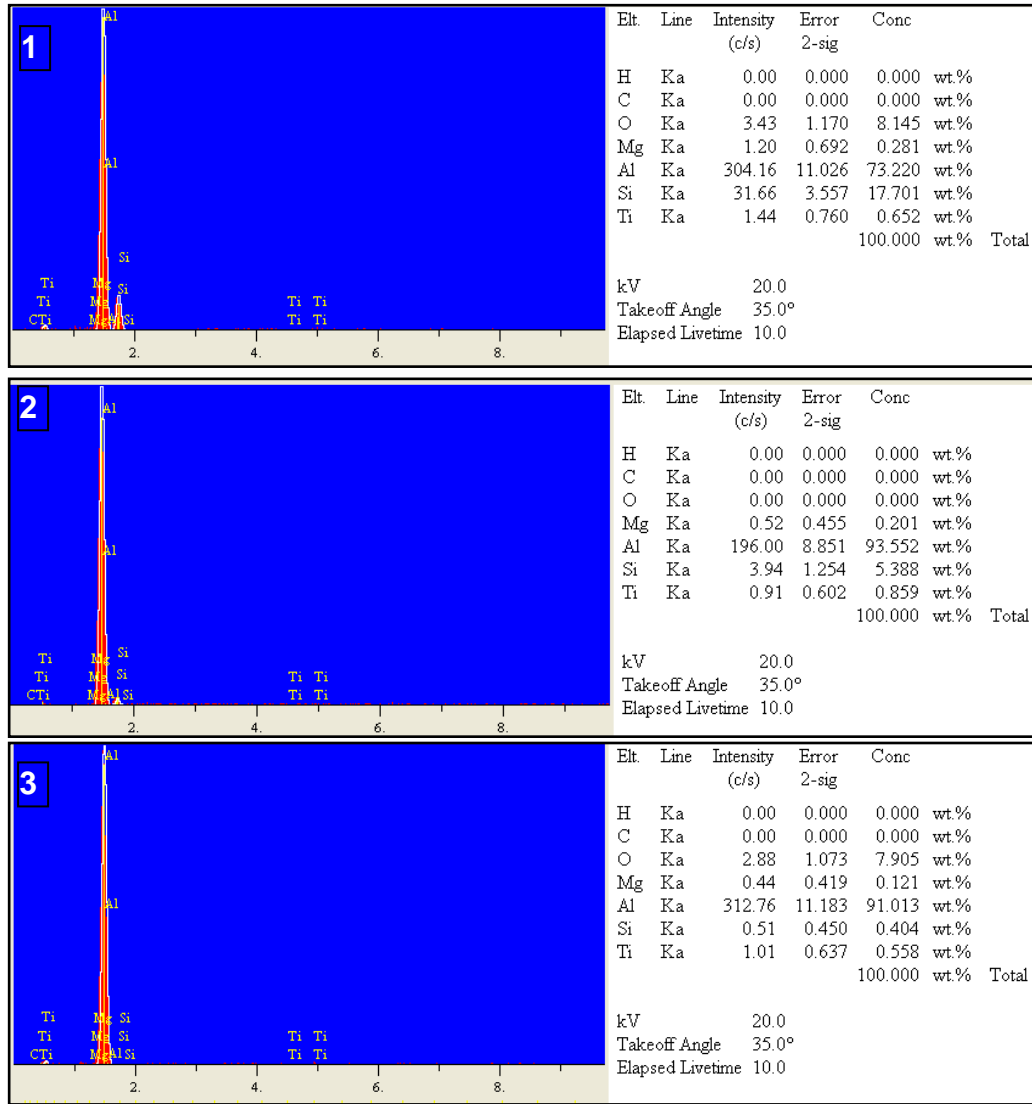


Resim 6. 34. a)SiC parçacık dağılımı, b)Al levha ve parçacık arayüzeyine ait SEM resimleri.

Resim 6. 35'te verilen SEM resminde SiC ilaveli ön şekil numune ile Al levha arasında birleşme meydana gelmiş ancak belirgin bir arayüzey oluşmuştur. Şekil 6.20'de verilen EDX analizlerinden ise SiC ilaveli ön şekil numune ile Al levha arayüzeyinde silisyumun mevcut olduğu ancak Al levhada mevcut olmadığı anlaşılmaktadır.

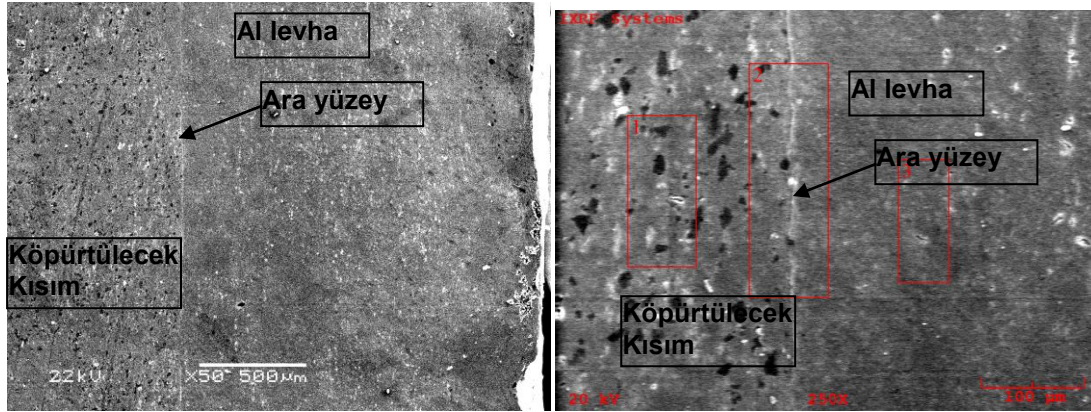


Resim 6. 35. SiC ilaveli önşekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi ve EDX analiz bölgeleri.



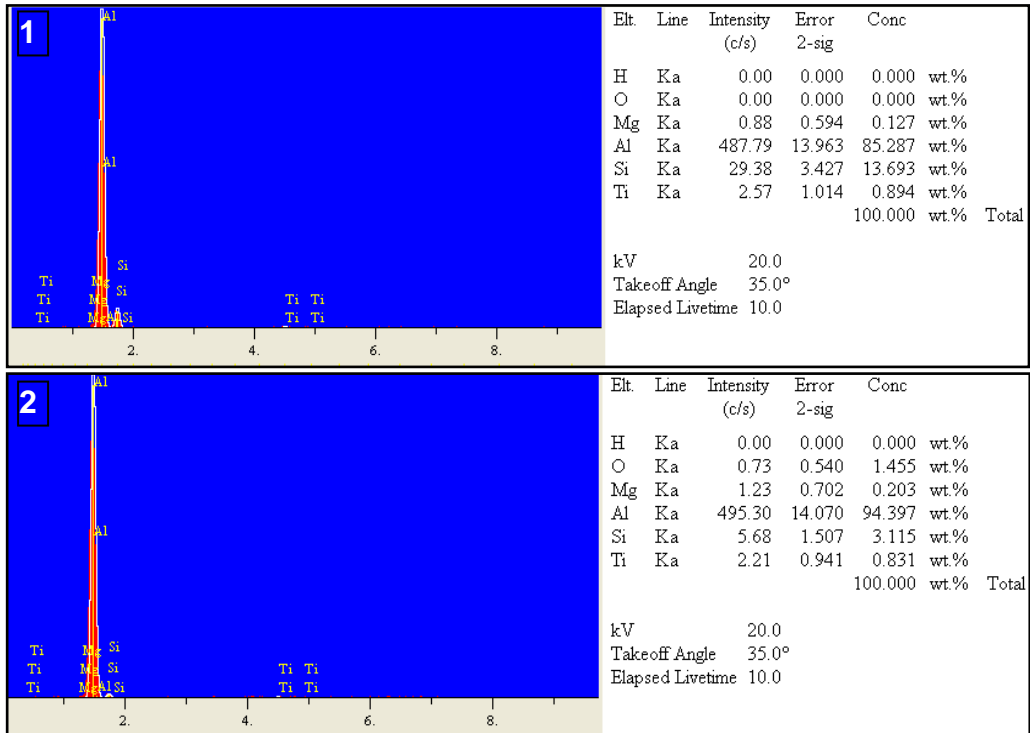
Şekil 6.20. SiC ilaveli önşekil numunye ait EDX analizleri.
1)Ön şekil numune, 2) Arayüzey, 3) Al levha

Resim 6. 36'da AlSi7Mg0,6 karışımı ile Al levha arasında meydana gelen arayüzeyi ve EDX analizi yapılan bölgeleri gösteren resimler verilmiştir. Resimlerde de görüldüğü gibi haddelme sonrasında Al levha kalınlığı değişmemiş ve ön şekil numune ile Al levha arasında birleşmenin olduğu ancak bir çizgi şeklinde arayüzey olduğu görülmüştür.

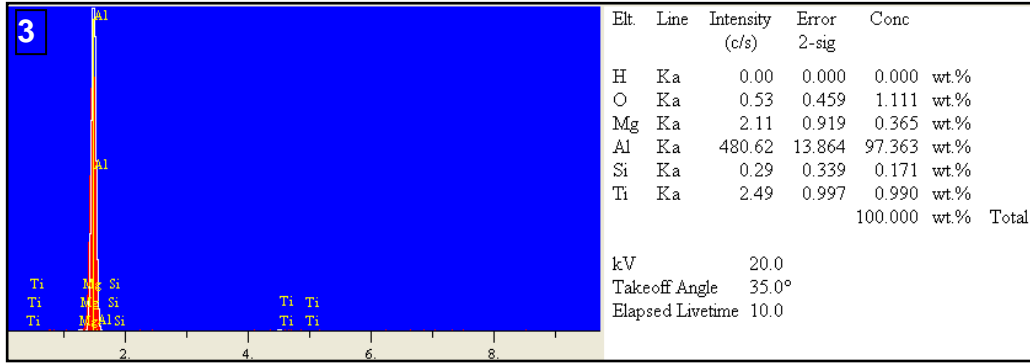


Resim 6. 36. a) AISi7Mg0,6 önşekil numune ve Al levha arayüzeyine ait SEM resmi, b) EDX analiz bölgeleri.

Şekil 6.21'de verilen EDX analizleri AISi7Mg0,6 karışımı ile Al levha arayüzeyinde silisyum oranı yüksek iken Al levhada yok denecek kadar az olduğunu göstermektedir.



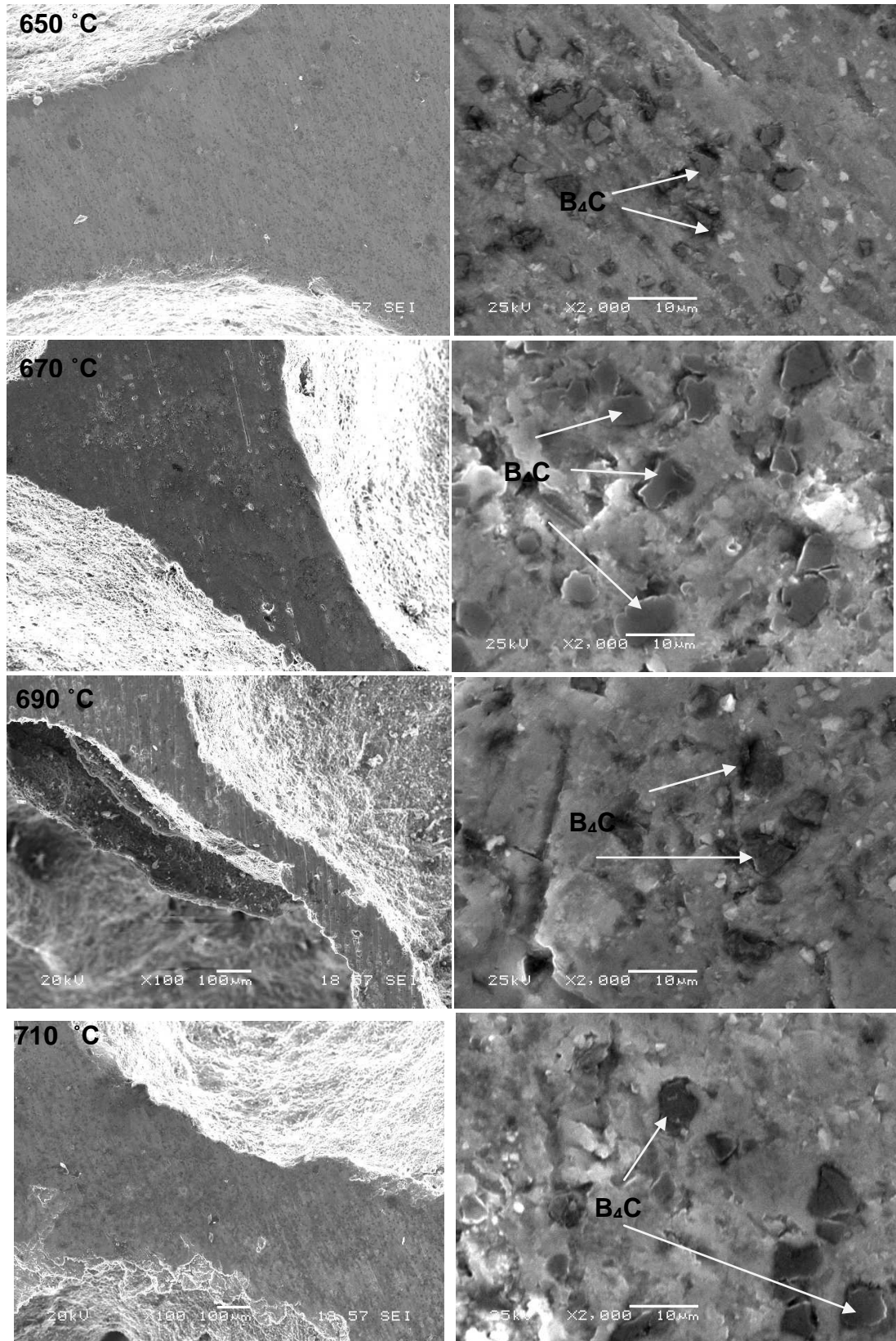
Şekil 6. 21. AISi7Mg0,6 ön şekil numuneye ait EDX analizleri. 1) Ön şekil numune, 2) Arayüzey, 3) Al levha



Şekil 6. 21. (Devam) AlSi7Mg0,6 ön şekil numune ait EDX analizleri.
1)Ön şekil numune, 2) Arayüzey, 3) Al levha

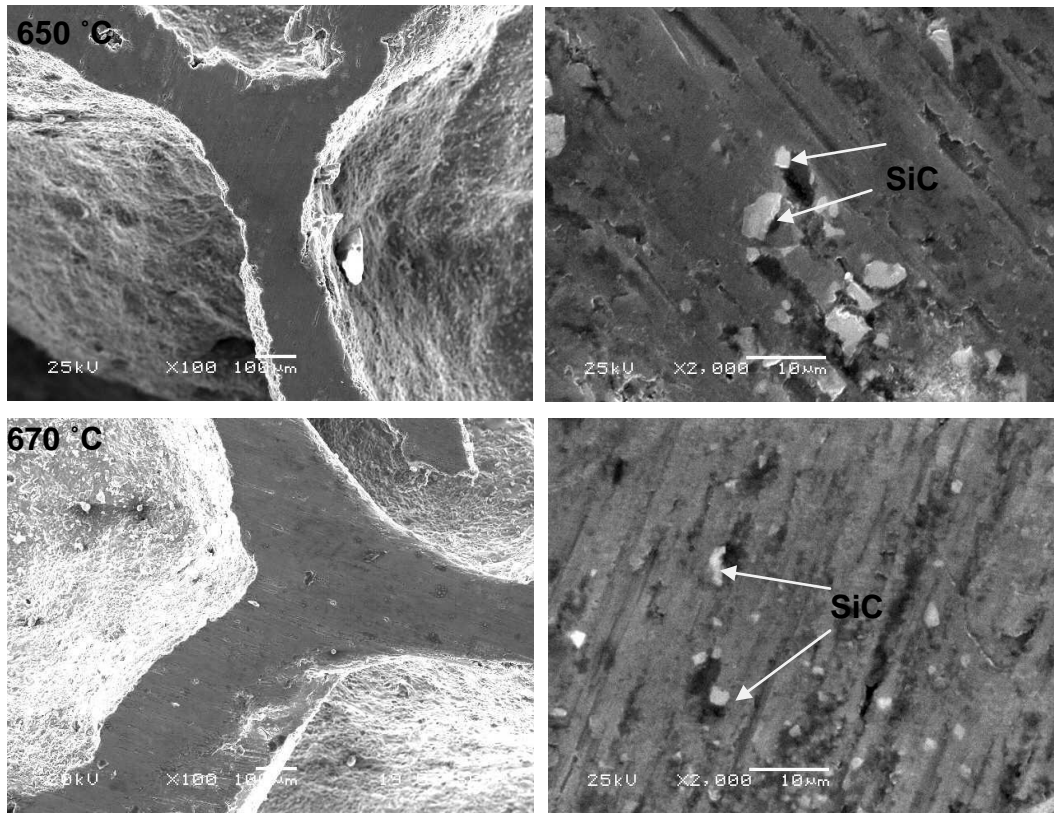
Köpürtme sonrası gözenek duvarının karakterizasyonu

Resim 6.37'de farklı köpürtme sıcaklıklarında elde edilen %5 B₄C ilaveli ASK'lerin SEM resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde, partiküllerin gözenek duvarları içerisine yerleştiği ve homojen dağıldığı görülmüştür. Partiküllerin metal-gaz arayüzeyinde yerleşmesi, homojen olmayan karışım veya partiküllerin kümeleşmesi gözenek duvarında kırılmaya veya köpürme esnasında termal büzölmeye neden olabilir [92]. Ayrıca, B₄C parçacıklarının matris içerisine yerleştiği ancak parçacıklar ile matris arayüzeyinde mikro boşlukların meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak gözenek duvarlarında girinti/çıkıntılarının artmışken, parçacık/matris arayüzeyindeki mikro boşluklar kısmen azalmıştır.

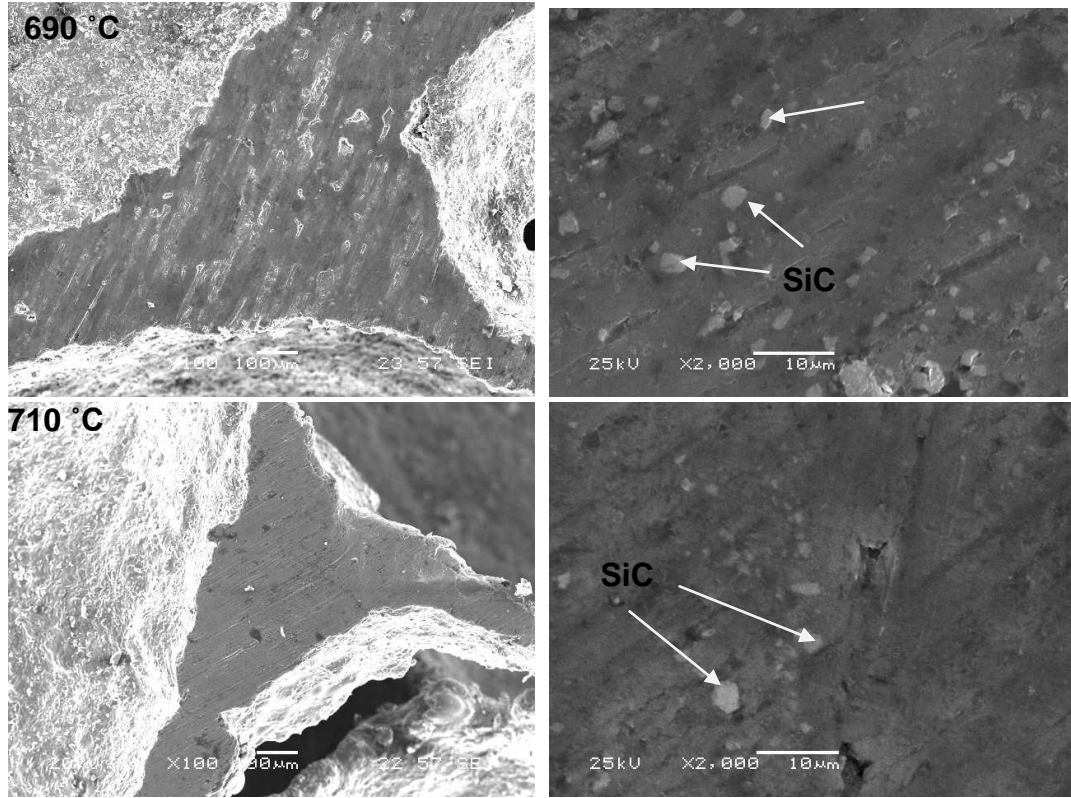


Resim 6. 37 B₄C ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri

Resim 6.38'de 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında elde edilen %5 SiC ilaveli ASK'lerin mikroyapı durumlarını gösteren SEM resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde, partiküllerin homojen dağıldığı ve matris içerisine yerleştiği görülebilir. 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında gözenekler ile gözenek duvarları arasındaki çizgi daha pürüzsüz iken köpürtme sıcaklığındaki artışa paralel olarak gözenek ile gözenek duvarı arasındaki çizgilerde girinti ve çıkıntılar arttığı görülmüştür. Bununla beraber 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında parçacık/matris arayüzeyinde mikro boşluklar oluşmuşken, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında parçacık/matris arayüzeyinde mikro boşluklar oluşmamıştır.

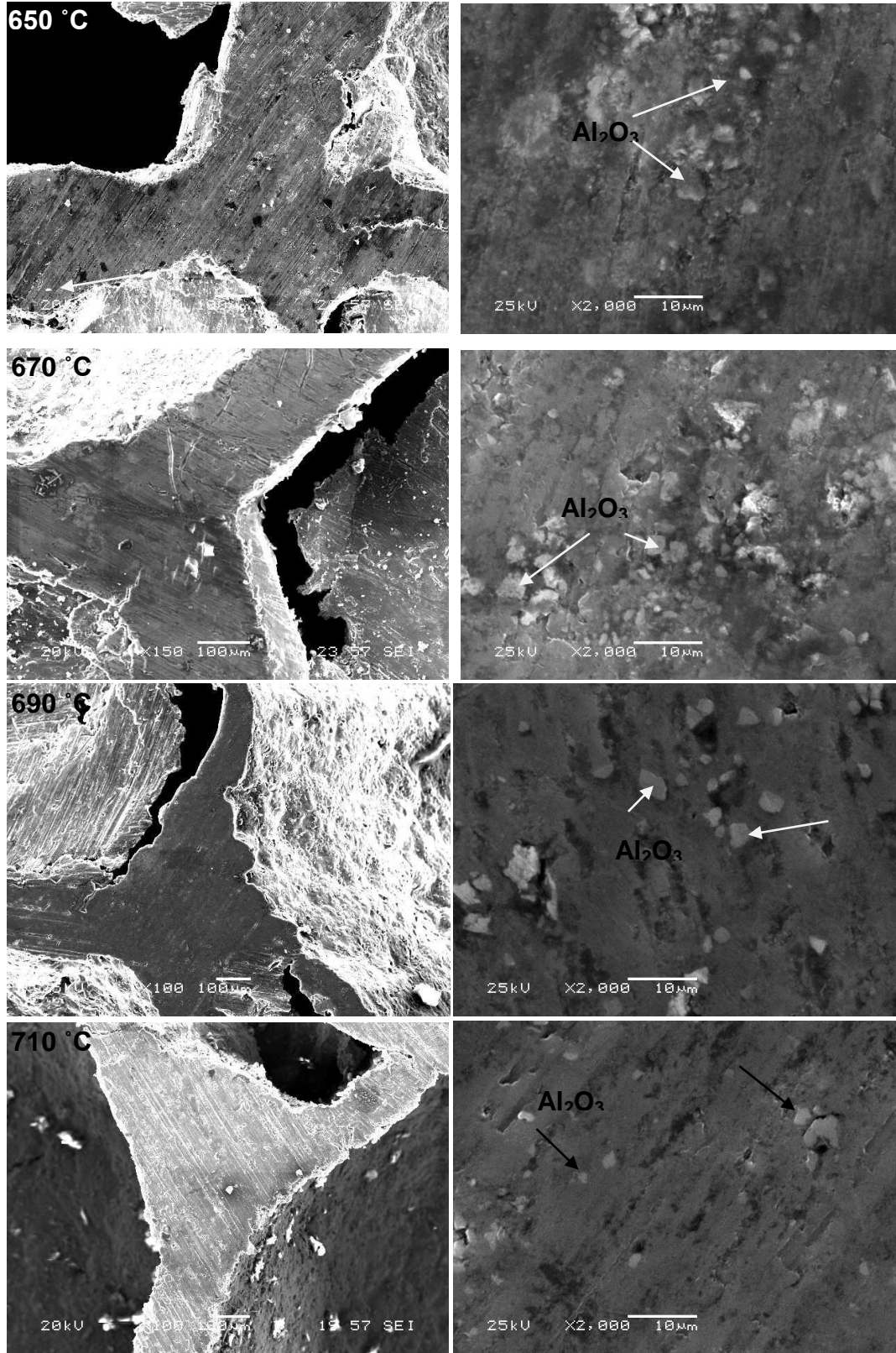


Resim 6.38. SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri



Resim 6.38. (Devam) SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri

Resim 6.39'da 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında elde edilen %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin mikroyapı durumlarını gösteren SEM resimleri verilmiştir. Resimler incelendiğinde, homojen dağılım sergileyen partiküllerin matris içerisine yerleştiği ve matris/parçacık arayüzeylerinde mikro boşlukların oluşmadığı görülebilir. 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında gözenekler ile gözenek duvarları arasındaki çizgi daha pürüzsüz iken köpürtme sıcaklığındaki artışa paralel olarak gözenek ile gözenek duvarı arasındaki çizgilerde girinti ve çıkıntılarının arttığı görülmüştür. Bu girinti ve çıkıntılarının, köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak ergiyik metalde viskozitenin azalması ve ergiyik metalin yüzey geriliminin azalması sonucu meydana geldiği düşünülmektedir.



Resim 6. 39. Al_2O_3 ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözenek duvarına ait mikroyapı resimleri

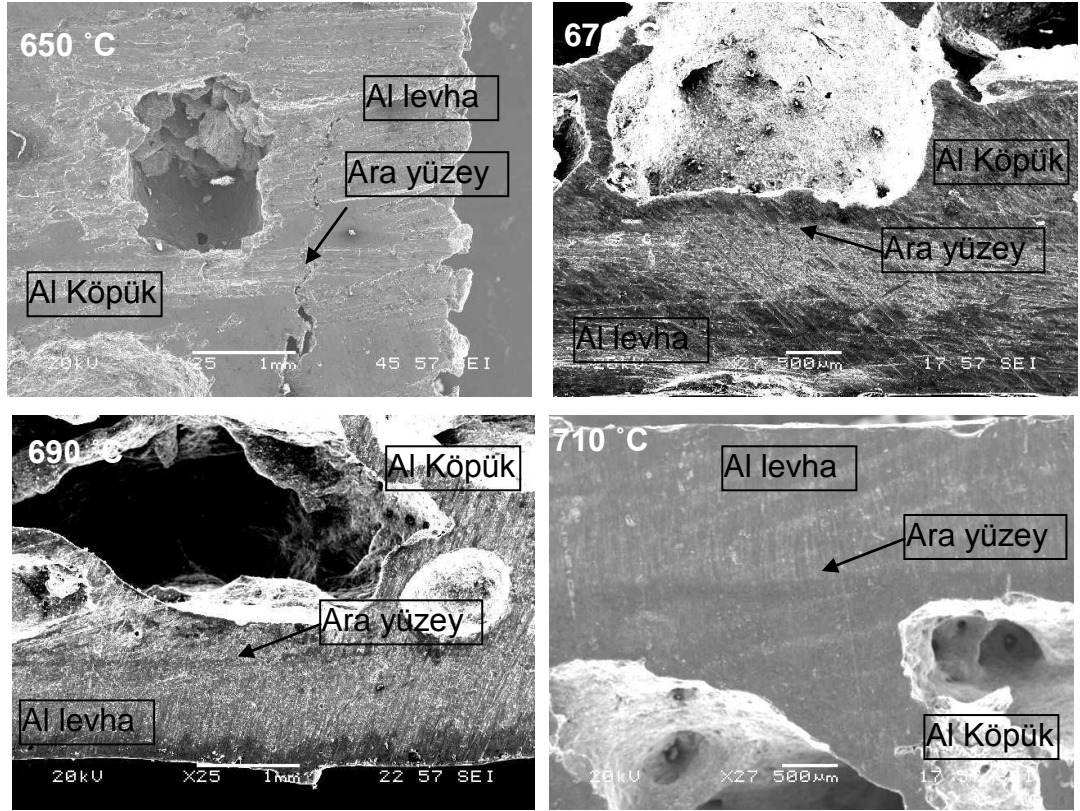
Köpürtme sonrası Al levha ile metalik köpük arayüzeyinin karakterizasyonu

%5 SiC, %5 Al₂O₃ ve %5 B₄C ilave edilerek farklı köpürtme sürelerinde elde edilen ASK'lerin metalik köpük-Al levha arasında meydana gelen arayüzey durumunu gösteren resimler Resim 6.40, Resim 6.41 ve Resim 6.42' de gösterilmiştir. B₄C ilaveli ASK'lerde 650 °C köpürtme sıcaklığında levha-metal köpük arasında birleşmenin olduğu ancak belirgin bir çizgi şeklinde arayüzey oluştuğu görülmüştür (Resim 6. 40). 670 °C köpürtme sıcaklığı bu çizginin daha az belirgin olmasına neden olmuştur. Bu çizgi 690 °C ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında kısmen kaybolmuştur.

Köpürtme sıcaklığının artmasıyla arayüzey çizgisinin kaybolması difüzyon mekanizmasıyla açıklanabilir. Difüzyon süresinin difüzyon hızıyla ters orantılı olduğu bilinmektedir. Eşitlik 6. 3'de verilen Arrhenius denklemine göre artan sıcaklık difüzyon oranını artırmaktadır [93].

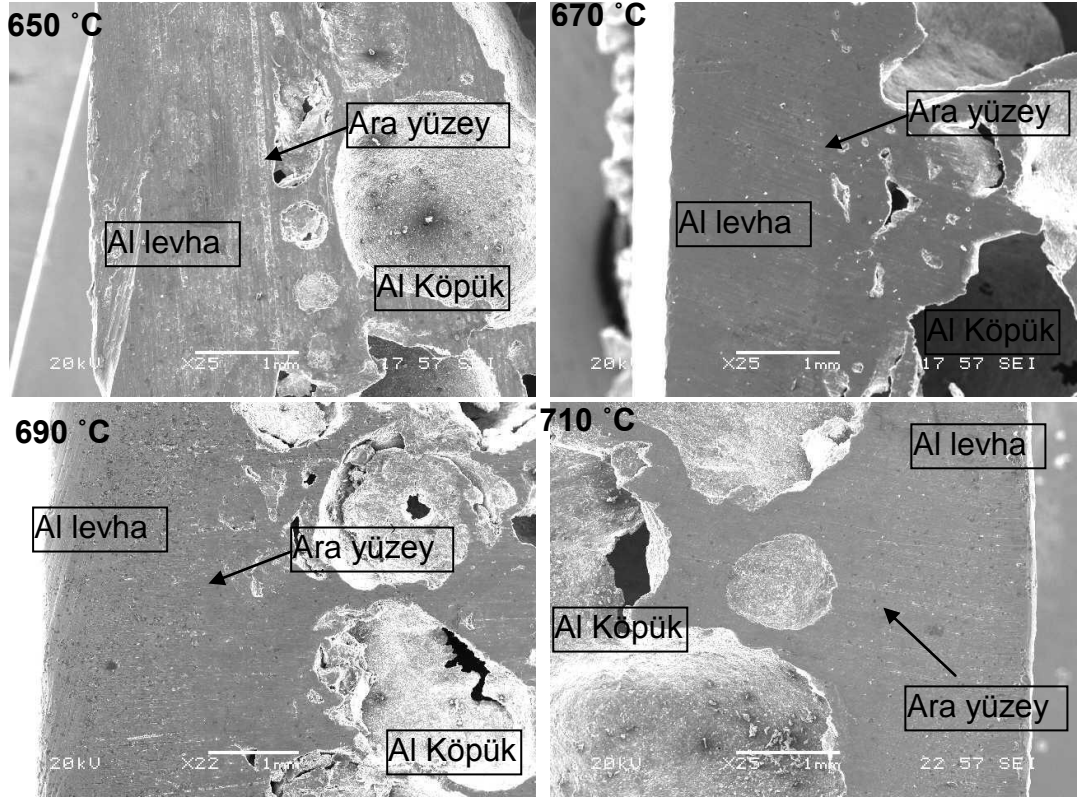
$$D = D_0 e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (6.3)$$

Burada, D reaksiyon hızı, D₀ difüzyon katsayısı, Q aktivasyon enerjisi ve R gaz sabiti ve T sıcaklığı ifade etmektedir.



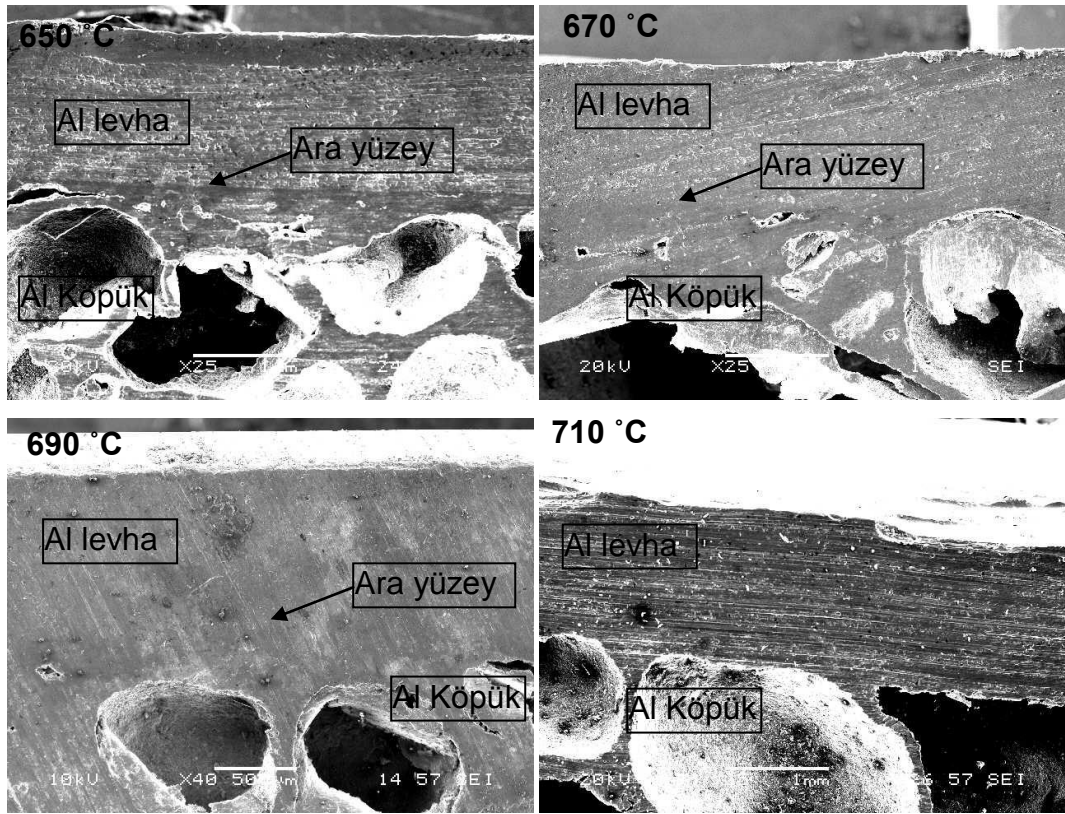
Resim 6. 40. B₄C ilave edilerek üretilen ASK'lerin köpük-levha arayüzey mikroyapı resimleri.

SiC ilaveli ASK'lerde de 650 °C köpürtme sıcaklığında levha-metal köpük arasında birleşmenin olduğu ancak belirgin bir çizgi şeklinde arayüzey oluştuğu görülmüştür (Resim 6. 41). Ancak bu belirgin çizgi B₄C ilaveli ASK'lerde meydana gelen arayüzey çizgisine göre daha azdır. 670 °C köpürtme sıcaklığı bu çizginin daha az belirgin olmasına neden olmuştur. Bu çizgi 690 °C ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında tamamen kaybolmuştur.



Resim 6. 41. SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin köpük-levha arayüzey mikroyapı resimleri.

Benzer şekilde, Al_2O_3 ilaveli ASK'lerde de 650 °C köpürtme sıcaklığında levha-metal köpük arasında belirgin bir çizgi şeklinde arayüzey olduğu görülmüştür (Resim 6. 42). 670 °C köpürtme sıcaklığı bu çizginin daha az belirgin olmasına neden olmuştur. Bu çizgi 690 °C ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında tamamen kaybolmuştur.



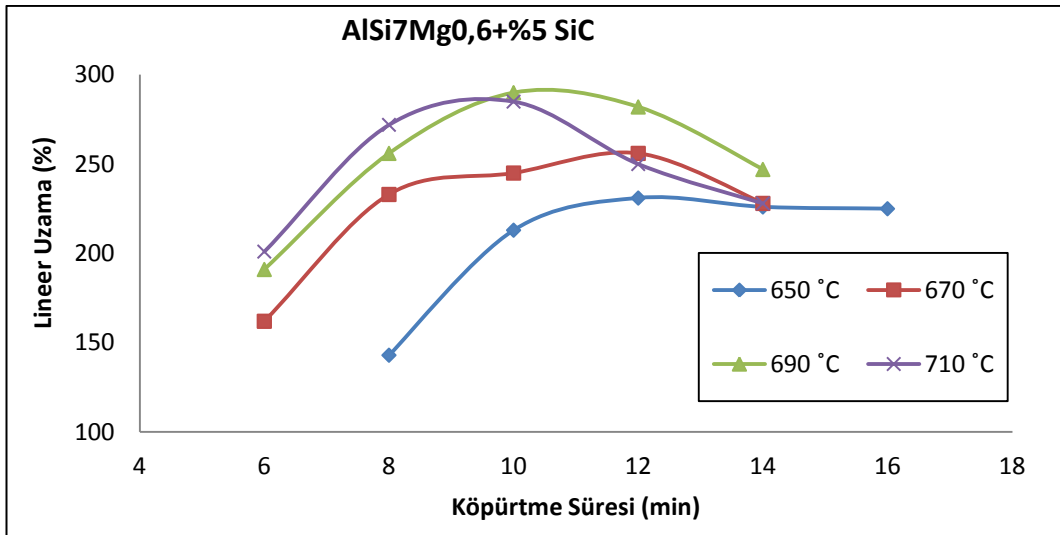
Resim 6. 42. Al₂O₃ ilave edilerek üretilen ASK'lerin köpük-levha arayüzey mikroyapı resimleri.

6.6.3. Partikül ilavesinin lineer uzamaya etkileri

SiC ilavesinin lineer uzamaya etkileri

SiC ilave edilerek 650 °C köpürtme sıcaklığında sandviç yapının elde edildiği 12 ve 14 dakika köpürtme süreleri lineer uzama oranlarının yaklaşık aynı değerlerde (%225 civarında) lineer uzamanın olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 16 dakikaya çıkarılması sandviç yapının bozulmasına ve lineer uzama oranında kısmi azalmaya neden olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında 6 dakika köpürtme süresinde %160 lineer uzama meydana gelirken 8, 10, 12 dakika köpürtme sürelerinde lineer uzama oranları artarak sırasıyla %230, %245 ve %255 olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde lineer uzama oranı azalarak %225 olmuştur. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 6 dakikada %190 lineer uzama meydana gelirken 8 dakika

lineer uzama oranının artarak %255 olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde ise %290 lineer uzama meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 ve 14 dakikaya çıkarılmasıyla sandviç yapılar bozulduğu için lineer uzama oranları dikkate alınmamıştır. 710 °C köpürtme sıcaklığında 6 dakika köpürtme işleminde %200 lineer uzama meydana gelirken 8 dakika köpürtme süresi lineer uzama oranının %270, olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde ise %285 lineer uzama meydana geldiği görülmüştür. 12 dakikanın sandviç yapıların bozulmalarına ve lineer uzama oranlarında azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.22).

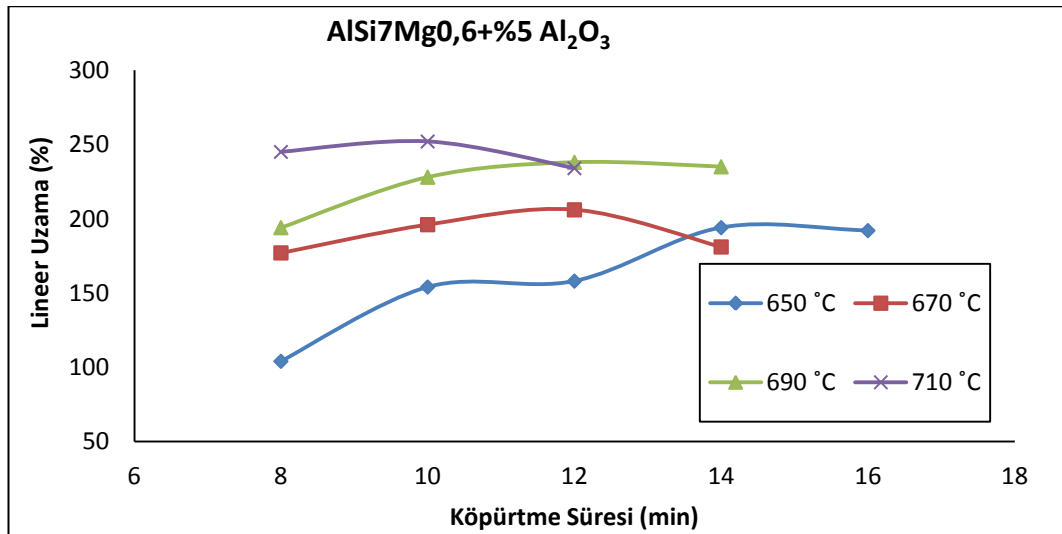


Şekil 6.22. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranı.

%5 SiC ilaveli alüminyum sandviç köpüklerde 650 ve 670 °C sıcaklıkta maksimum lineer uzama oranları %225 ve %255 olarak 12 dakikada elde edilmişken, 690 ve 710 °C sıcaklıklarda %290 ve %285 oranındaki maksimum lineer uzama 10 dakikada elde edilmiştir. Ayrıca köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak lineer uzama oranının arttığı görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmalarda da köpürtme sıcaklığının artmasının maksimum lineer uzamanın elde edildiği köpürtme süresini azalttığı ve köpürtme sıcaklığının lineer uzamayı artırdığı vurgulanmıştır [94,95].

Al₂O₃ ilavesinin lineer uzamaya etkileri

650 °C köpürtme sıcaklığında sandviç yapının elde edildiği 14 dakika köpürtme süresinde üretilen Al₂O₃ ilaveli ASK'lerde %195 lineer uzama meydana gelirken 16 dakika köpürtme süresi lineer uzama oranlarının %190 olmasına neden olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında 10 ve 12 dakikada %190 ve %200 lineer uzama oranı meydana gelmiştir. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla lineer uzama oranında azalmanın meydana geldiği ve sandviç yapının bozulduğu belirlenmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 8 dakika köpürtme süresinde %195 lineer uzama meydana gelmiştir. 10 dakika köpürtme süresinde ise lineer uzama oranının %230 olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla lineer uzama oranı %210 olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise %235 oranında lineer uzama meydana gelmiş ancak sandviç yapı bozulmuştur. 710 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakika köpürtme süresinde lineer uzama oranının %245 olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde ise %255 ve köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla lineer uzama oranı %235 olmuştur. Ancak 12 dakikanın sandviç yapıların bozulmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6. 23).



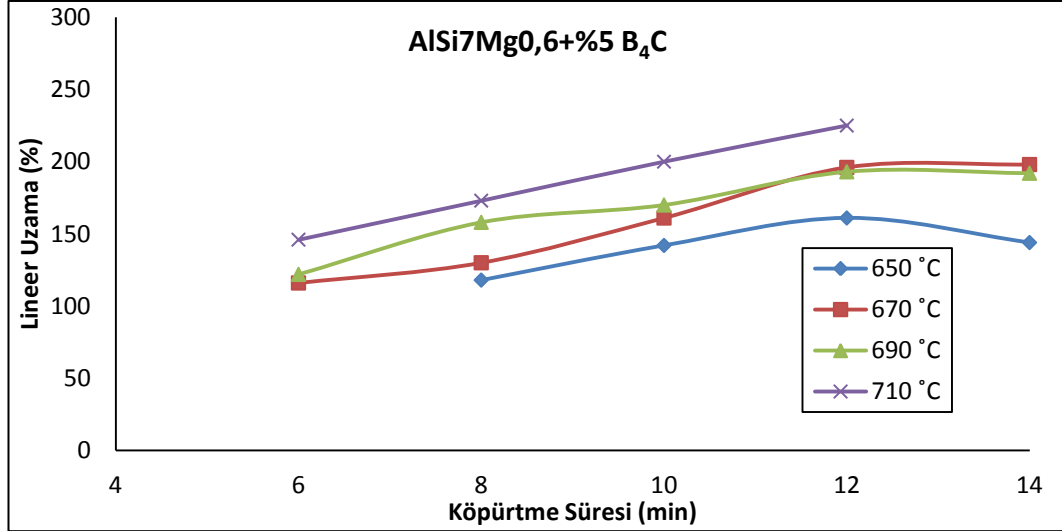
Şekil 6.23. Al₂O₃ ilaveli ASK' lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranı.

Farklı köpürtme sıcaklıkları ve farklı köpürtme sürelerinde üretilen %5 Al₂O₃ ilaveli alüminyum sandviç köpüklerde 650 °C sıcaklıkta maksimum lineer uzama oranı %195 olmuş ve bu değer 14 dakikada köpürtme süresinde elde edilmiştir. 670 ve 690 °C sıcaklıklarda %200 ve %230 oranındaki maksimum lineer uzama oranları 12 dakikada elde edilmişken 710 °C sıcaklıkta %255 olan maksimum lineer uzama 10 dakikada elde edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının artmasıyla birlikte artan ısıtma oranı ergime sıcaklığına ulaşılması için gerekli süreyi azaltacağından köpürebilir önşekil malzemenin erken uzamasına yol açacağını bilinmektedir [85].

B₄C ilavesinin lineer uzamaya etkileri

650 °C köpürtme sıcaklığında ve 8, 10 ve 12 dakika köpürtme sürelerinde B₄C ilaveli ASK' lerde lineer uzama oranlarında artış meydana gelmiştir. Ancak bu sürelerde gözenek yapısı bakımından sandviç yapının elde edildiği söylenemez. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla elde edilen sandviç yapının lineer uzama oranı %145 olmuştur. 16 dakika köpürtme süresinde ise gözeneklerde birleşme dolayısıyla gözeneklerde irileşme meydana gelmiş ayrıca sandviç yapı bozulmuştur. Gözeneklerde meydana gelen irileşmenin gözenek bozulmasına neden olduğu literatürde desteklenmektedir [91]. Bu nedenle lineer uzama oranı dikkate alınmamıştır. 670 °C köpürtme sıcaklığında ise 10 dakika köpürtme süresinde %160 lineer uzama meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla sandviç yapı elde edilmiş ve lineer uzama oranı %190 olmuştur. 14 dakikada ise sandviç yapı bozulmuştur. Köpürtme sıcaklığının 690 °C' ye çıkartılmasıyla 8 ve 10 dakika lineer uzamanın %160 ve %170 olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla lineer uzama oranı artarak %195 olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise %190 oranlarında lineer uzama meydana geldiği fakat sandviç yapının tamamen bozulduğu belirlenmiştir. 710 °C köpürtme 8 köpürtme süresi lineer uzama oranının %175 olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde ise %200 lineer uzama meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme

süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla lineer uzama oranı %230 olmuştur (Şekil 6. 24).



Şekil 6.24. B₄C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen lineer uzama oranı.

%5 B₄C ilave edilerek farklı köpürtme sıcaklıkları ve farklı köpürtme sürelerinde üretilen alüminyum sandviç köpüklerde 650, 670 ve 690 °C sıcaklıklarda maksimum lineer uzama oranları 12 dakika köpürtme süresinde elde edilmiştir. Şekil 6.16'da verilen grafikte 710 °C sıcaklıkta maksimum lineer uzama oranı 12 dakikada elde edildiği görülmektedir. Ancak 12 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı bozulduğu için 710 °C sıcaklıkta 10 dakika köpürtme süresinde maksimum lineer uzama elde edilmiştir.

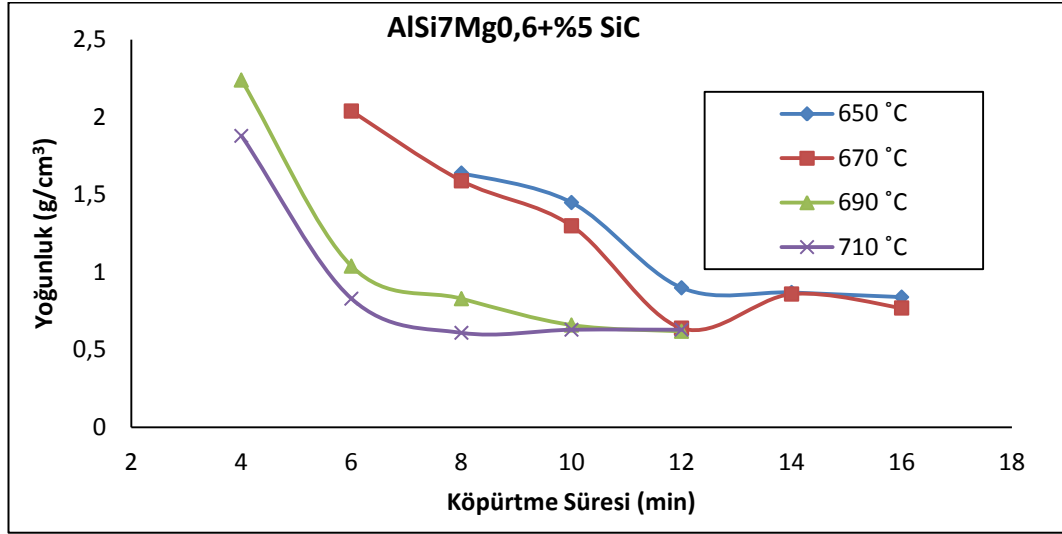
%5 SiC, %5 Al₂O₃ ve %5 B₄C ilave edilerek yapılan çalışmalarda, belli bir köpürtme süresine kadar lineer uzamanın arttığı daha sonra azaldığı görülmüştür. Köpürtme sıcaklığının artmasının maksimum lineer uzama oranını artırdığı ve maksimum lineer uzamanın meydana geldiği süreyi azalttığı tespit edilmiştir. Esmaelzadeh ve arkadaşları [72] yaptıkları çalışmada AlSi7 alaşımına %3 SiC ilave ederek 750-780 ve 810 °C köpürtme sıcaklıklarında yaptıkları çalışmalarda 750 ve 800 C de %500 civarında lineer uzama elde etmişlerken 810 °C sıcaklıkta %550 civarında lineer uzama oranı elde etmişlerdir. Dolayısıyla köpürtme sıcaklığının artmasının lineer uzama

oranını artırdığını belirtmişlerdir. benzer sonucu bulmuşlardır. Asavavithchai ve Kennedy [96] %6 Al₂O₃ ilave ederek 800 °C sıcaklıkta yaptıkları çalışmada 6 dakika köpürtme süresinde %500 civarında lineer uzama elde etmişler ve artan köpürtme süresinin lineer uzamayı azalttığını belirtmişlerdir.

6.6.3. Partikül ilavesinin yoğunluğa etkileri

SiC ilavesinin yoğunluğa etkileri

650 °C köpürtme sıcaklığında 8 ve 10 dakika köpürtme süresinde SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin yoğunluğu 1,6 g/cm³ ve 1,4 g/cm³ tür. Sandviç yapının elde edildiği 12, 14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde ise yoğunluk değerlerinin yaklaşık aynı değerlerde (0,9-0,87-0,85 g/cm³) olduğu görülmüştür. Ancak 16 dakika köpürtme süresi sandviç yapının kısmen bozulmasına neden olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında sandviç yapı 12 ve 14 dakika köpürtme süresinde elde edilmiştir. 12 dakika köpürtme süresinde yoğunluk değeri 1'in altına düşerek 0,8 g/cm³ olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise 0,63 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir. 16 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı bozulduğu için yoğunluk değeri dikkate alınmamıştır. Köpürtme sıcaklığının 690 °C' ye çıkartılmasıyla 6 dakikada 1,04 g/cm³ yoğunluk meydana gelirken 8 dakikada 0,83 g/cm³ yoğunluk meydana gelmiştir. 10 dakika köpürtme süresinde 0,66 g/cm³ ve 12 dakika köpürtme süresinde 0,62 g/cm³ yoğunluk meydana geldiği belirlenmiştir. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapı bozulmuştur. 710 °C köpürtme sıcaklığında ve 6 dakika köpürtme süresinde 0,83 g/cm³ yoğunluk meydana gelirken 8 ve 10 dakika köpürtme süresi yoğunluğun 0,61 ve 0,63 g/cm³ olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla yoğunluk değeri 0,53 g/cm³ olmuş ancak sandviç yapı bozulmuştur (Şekil 6.25).



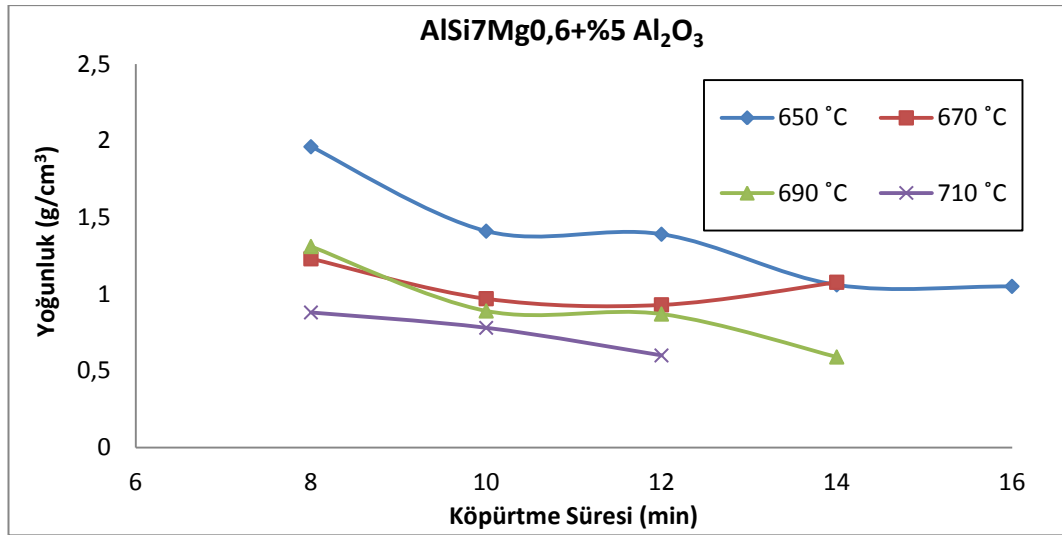
Şekil 6.25. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

Yapılan çalışmada 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklığında yoğunluk değerleri yüksek iken 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında bu yoğunluk değerlerinde hızlı bir düşüş meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak hem ergiyik metalin viskozitesinin azalması hemde reaksiyon hızının artması gözenek oluşumu ve gözenek büyümesini kolaylaştıracaktır. Gözenek büyümesiyle lineer uzama artacak dolayısıyla yoğunluk azalacaktır. Yoğunluk değerleri literatürde [89, 90, 97] yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında elde edilen değerlerin yüksek olduğu görülmüştür. Yoğunluk değerlerinin yüksek olmasının nedeni sandviç yapı için kullanılan yüzey levhalarından kaynaklanmaktadır.

Al₂O₃ ilavesinin yoğunluğa etkileri

Al₂O₃ ilave edilerek üretilen ASK'lerin 650 °C köpürtme sıcaklığında ve 8 dakika köpürtme süresinde yoğunluğu 1,96 g/cm³ iken 10 ve 12 dakika köpürtme süresinde 1,4 g/cm³ tür. Köpürtme süresinin 14 ve 16 dakikaya çıkarılmasıyla yoğunluk değerleri 1 g/cm³ olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakika köpürtme süresinde 1,2 g/cm³, sandviç yapının elde edildiği 10, 12 ve 14 dakika köpürtme sürelerinde ise yaklaşık 1 g/cm³

değerlerinde yoğunluk meydana geldiği görülmüştür. Ancak 14 dakika köpürtme süresinde sandviç yapı bozulmuştur. Köpürtme sıcaklığının 690 °C' ye çıkartılmasıyla 8 dakika köpürtme süresinde 1,3 g/cm³ yoğunluk meydana gelmiştir. Sandviç yapının elde edildiği 10 ve 12 dakika köpürtme süresi yoğunluğun 0,8 ve 0,6 g/cm³ olmasına neden olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise 0,5 g/cm³ yoğunluk meydana gelmiş ancak sandviç yapı bozulmuştur. 710 °C köpürtme sıcaklığında ve 8 dakika köpürtme süresinde 0,8 g/cm³ yoğunluk meydana gelirken 10 dakika köpürtme süresinde ise 0,7 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla sandviç yapı bozulmuş yoğunluk değeri 0,6 g/cm³ olmuştur (Şekil 6.26).

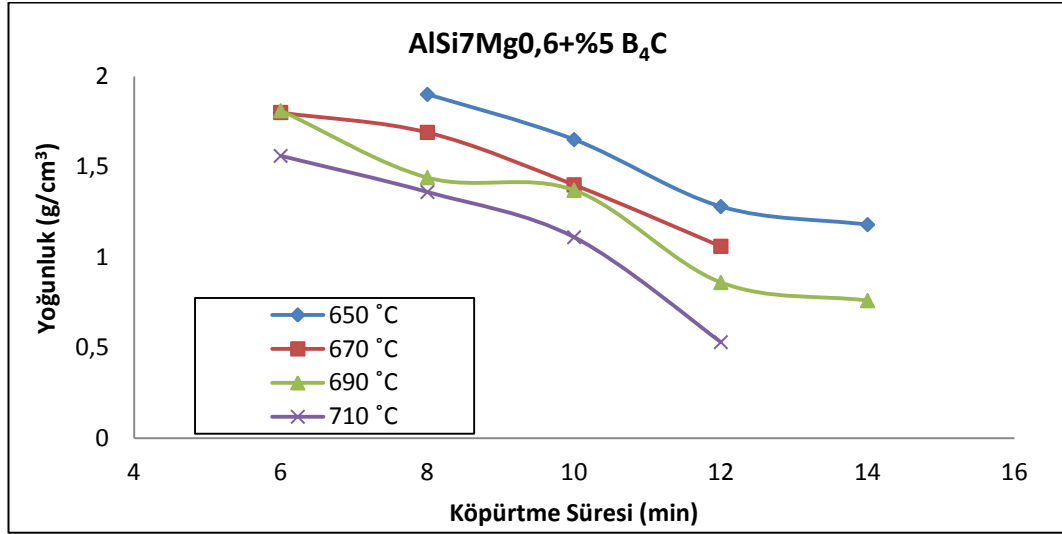


Şekil 6.26. Al₂O₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

Al₂O₃ ilaveli ASK'lerde köpürtme sıcaklığının artması yoğunluk değerlerinde azalmaya neden olmuştur. Özellikle 670, 690 ve 710 °C sıcaklıkta yoğunluk değerlerinin yakın değerlerde olduğu söylenebilir. Yoğunluk oranları sadece lineer uzama ile ilgili olmadığı gözeneklilik ve gözenek boyutlarıyla ilgilidir. Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin gözeneklilik oranlarının yakın olduğu Şekil 6.28'de görülmektedir. Benzer şekilde köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluk değerlerinde kısmi azalma meydana gelmiştir.

B₄C ilavesinin yoğunluğa etkileri

B₄C ilave edilerek 650 °C köpürtme sıcaklığında ve 8 dakika köpürtme süresinde üretilen ASK'lerin yoğunluğu 1,9 g/cm³ iken 10 köpürtme süresinde 1,6 g/cm³ tür. 12 dakika köpürtme süresi yoğunluğun 1,3 g/cm³ olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla yoğunluk değeri azalarak 1,1 g/cm³ olmuştur. 16 dakika köpürtme süresinde ise 1 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğu ve sandviç yapının kısmen bozulduğu tespit edilmiştir. 670 °C köpürtme sıcaklığında ise 6 dakika köpürtme süresinde 1,8 g/cm³, 8 dakika köpürtme süresinde 1,6 g/cm³ yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. 10 ve 12 dakika köpürtme süresinde ise 1 g/cm³ yoğunluk meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla B₄C ilaveli ASK'lerin yoğunluğu 1 g/cm³ civarında olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapı bozulduğu için yoğunluk değeri dikkate alınmamıştır. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 6 dakika köpürtme süresinde 1,81 g/cm³ yoğunluk meydana gelirken 8 ve 10 dakika köpürtme süresinde 1,4 g/cm³ yoğunluk meydana gelmiştir. 12 dakika köpürtme süresi yoğunluk değerinin 0,8 g/cm³ olmasına neden olmuştur. 710 °C' köpürtme sıcaklığında ise köpürtme süresinin artmasıyla yoğunluk değerlerinde lineer bir artış meydana gelerek 6 dakika köpürtme süresinde 1,5 g/cm³, 8 köpürtme süresinde 1,3 g/cm³, 10 dakika köpürtme süresinde 1,1 g/cm³ ve 12 dakika köpürtme süresinde ise 0,53 g/cm³ olmuştur. 12 dakika köpürtme süresinde yoğunluk değeri düşük olmasına rağmen sandviç yapı tamamen bozulmuştur (Şekil 6.27).



Şekil 6.27. B₄C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

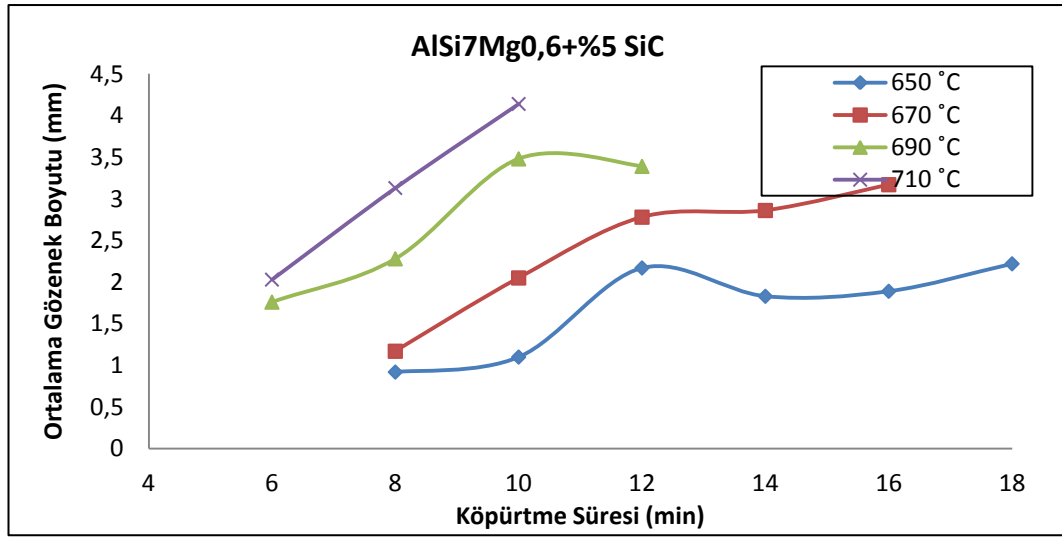
6.6.4. Partikül ilavesinin gözenek boyutuna etkileri

SiC ilavesinin gözenek boyutuna etkileri

Partikül ilavesi, köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süreleri değiştirilerek üretilen ASK'lerde meydana gelen gözenek boyut dağılımlarının ortalamalarını gösteren grafikler Şekil 6. 24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'de verilmiştir.

SiC ilaveli ASK'lerde, 650°C köpürtme sıcaklığında sandviç yapının elde edildiği 12 dakika köpürtme süresinde ortalama gözenek boyutlarının 2,2 mm olarak bulunmuştur. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutu 1,8 mm olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında ise sandviç yapının elde edildiği 12 ve 14 dakikada 2,7 mm ve 3,1 mm ortalama gözenek boyutları meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 16 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutları artmış ancak sandviç yapılar tamamen bozulduğu için değerlendirmeye alınmamıştır. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 8 dakikada 2,2 mm ortalama gözenek boyutu meydana gelirken 10 ve 12 dakika sonunda gözenek boyutları artarak yaklaşık 3,5 mm'ye ulaşmıştır. 710 °C köpürtme sıcaklığının ortalama

gözenek boyutlarına etkisinin belirlenmesi için belirlenen 6 dakika ortalama gözenek boyutunun 2,03 mm olmasına neden olmuştur. 8 dakikada bu değer ortalama 3,13 mm olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin ortalama gözenek boyutunun 4,14 olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla sandviç yapı tamamen bozulmuştur (Şekil 6.28).



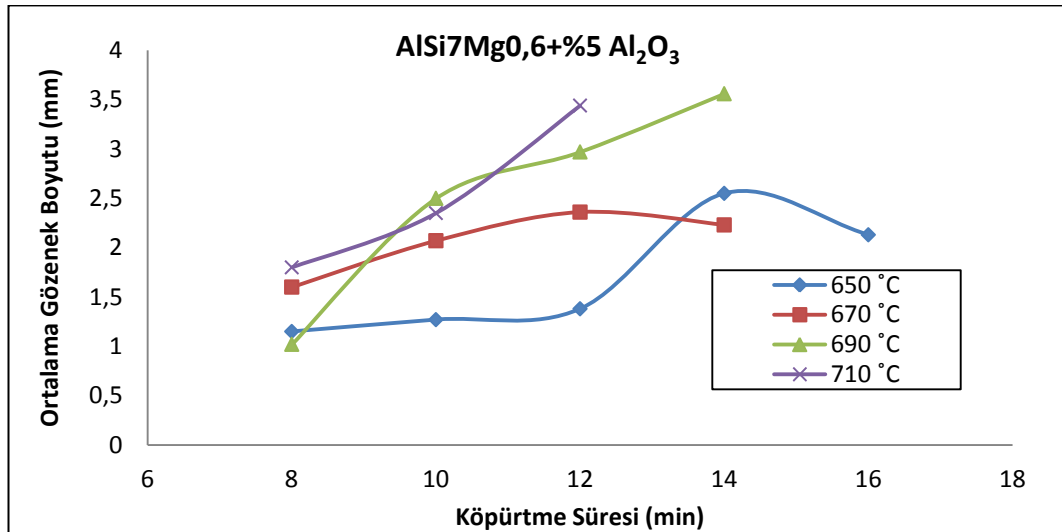
Şekil 6. 28. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı

SiC ilaveli sandviç köpüklerde köpürtme sıcaklığının artmasıyla meydana gelen viskozitedeki azalma gözenek boyutlarının artmasına neden olmuştur. 650 °C köpürtme sıcaklığında 12 dakikada elde edilen 2,2 mm gözenek boyutu 670 °C'de 10 dakikada, 690 °C'de 8 dakikada ve 710 °C' de 6 dakikada elde edilmiştir. Bu durum köpürtme sıcaklığındaki artışın gözenek oluşumu için gerekli sürenin azalmasına neden olduğunun göstergesidir.

Al₂O₃ ilavesinin gözenek boyutuna etkileri

Al₂O₃ ilaveli ASK'lerde, 650°C köpürtme sıcaklığında 10 ve 12 dakika köpürtme süresinde 1,3 mm ve 1,4 mm ortalama gözenek boyutu meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla Al₂O₃

ilaveli ASK'lerin ortalama gözenek boyutu 2,5 mm olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında ise 10 dakika köpürtme süresinde 2 mm ortalama gözenek boyutu meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutu 2,3 mm olmuştur. 14 dakika sonrasında ise 2,2 mm ortalama gözenek sahip olduğu ve köpürtme süresinin 16 dakikaya çıkartılmasıyla sandviç yapının tamamen bozulduğu belirlenmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 10 dakika köpürtme süresi ortalama gözenek boyutunun 2,5 mm olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutu 2,9 mm olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise 3,5 mm ortalama gözenek boyutu meydana geldiği ancak sandviç yapının bozulduğu belirlenmiştir. 710 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakika köpürtme süresi Al_2O_3 ilaveli ASK'lerin ortalama gözenek boyutunun 1,8 mm olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar Al_2O_3 ilaveli ASK'lerin ortalama gözenek boyutunun 2,3 mm olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla sandviç yapı bozulmuştur (Şekil 6.29).

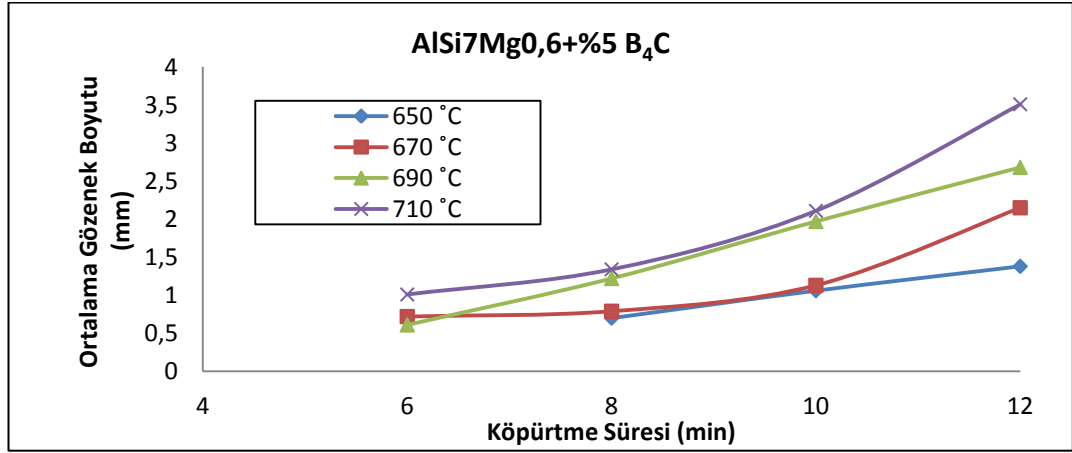


Şekil 6. 29. Al_2O_3 ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

Al_2O_3 ilave edilerek yapılan çalışmalarda, sandviç yapının elde edildiği sıcaklık ve sürelerde (650'de 14, 670 ve 690 °C'de 12, 710 °C'de 10 dakika) sırasıyla 2,5-2,3-2,9 ve 2,3 mm ortalama gözenek boyutları elde edilmiştir. Dolayısıyla köpürtme sıcaklığının artması sandviç yapının elde edildiği süreyi azaltmıştır.

B₄C ilavesinin gözenek boyutuna etkileri

B₄C ilaveli ASK'lerde 650°C köpürtme sıcaklığında 10 ve 12 dakika köpürtme süresi ortalama gözenek boyutlarının 1 ve 1,4 mm olmasına neden olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise 2,1 mm ortalama gözenek boyutu meydana geldiği görülmüştür. 670 °C köpürtme sıcaklığında ise 10 dakika köpürtme işleminde 1,1 mm ortalama gözenek boyutları meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutları 2,1 mm olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapı kısmen bozulduğu için değerlendirmeye alınmamıştır. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 8 dakika ortalama gözenek boyutunun 1,2 mm olmasına neden olurken, 10 dakika köpürtme süresi gözenek boyutunun 1,9 mm olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutu artarak 2,6 mm olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapı tamamen bozulmuştur. 710 °C köpürtme sıcaklığı 6 ve 8 dakika köpürtme süresi 1 ve 1,3 mm ortalama gözenek boyutunun oluşmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar ortalama gözenek boyutunun 2,1 mm olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla ortalama gözenek boyutu 3,51 mm olmuş ancak sandviç yapı tamamen bozulmuştur (Şekil 6.30).



Şekil 6. 30. B₄C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen gözenek boyut oranı.

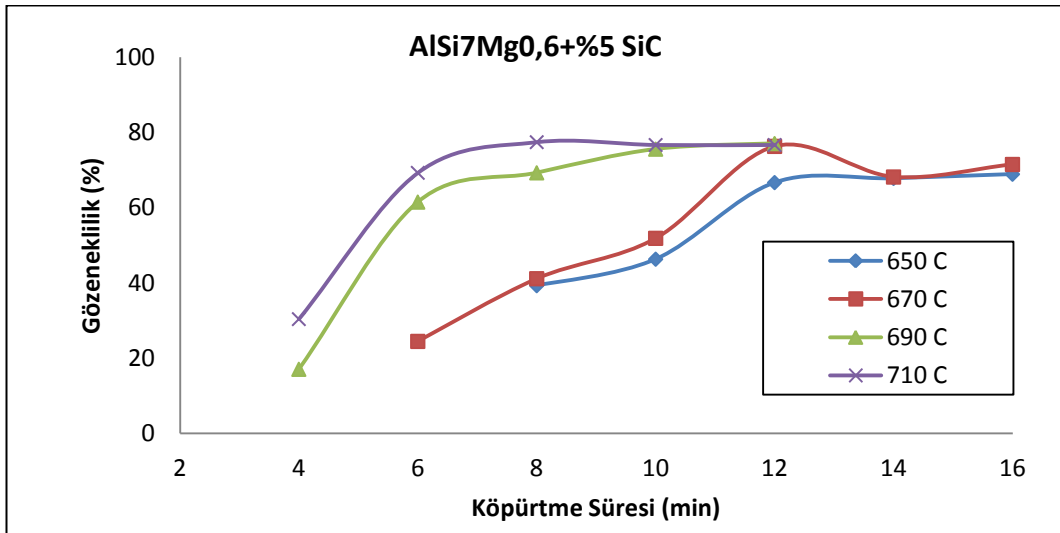
Yapılan çalışmada 650, 670, 690 ve 710 °C'de sandviç yapının elde edildiği köpürtme sürelerinde (sırasıyla 14, 12, 12 ve 10 dakika) yaklaşık aynı ortalama gözenek boyutlarına sahip (2,1-2,1-2,6 ve 2,1) gözenekler elde edilmiştir.

6.6.5. Partikül ilavesinin gözenekliliğe etkileri

SiC ilavesinin gözenekliliğe etkileri

Gözeneklilik oranlarının köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresine bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikler Şekil 6. 27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da verilmiştir. SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerde, 650°C köpürtme sıcaklığında 10 dakikada %50 gözeneklilik oluşmuşken bu değer 12,14 ve 16 dakikada yaklaşık %65 civarında olmuştur. Bununla beraber 16 dakika köpürtme süresinde sandviç yapının kısmen bozulduğu tespit edilmiştir. 670 °C köpürtme sıcaklığında 10 dakika köpürtme süresinde %50 civarında gözeneklilik meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 ve 14 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranının %75 ve %70 olduğu belirlenmiştir. 16 dakika köpürtme işleminde sandviç yapılar tamamen bozulduğu için gözeneklilik oranları değerlendirmeye alınmamıştır. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 6 dakikada SiC ilave edilerek üretilen

ASK'lerde %60 gözeneklilik meydana gelirken 8 dakikada %70 gözeneklilik meydana gelmiştir. 10 dakika köpürtme süresi gözeneklilik oranının %75 olmasına neden olmuştur. 12 dakika köpürtme süresinde ise %80 gözenekliliğe sahip olduğu ancak sandviç yapının bozulduğu görülmüştür. 710 °C köpürtme sıcaklığında 6 ve 8 dakika köpürtme süresinin %70 oranında gözeneklilik oluşmasına neden olduğu görülmüştür. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin gözeneklilik oranının %75 olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla sandviç yapı tamamen bozulmuştur (Şekil 6.31).

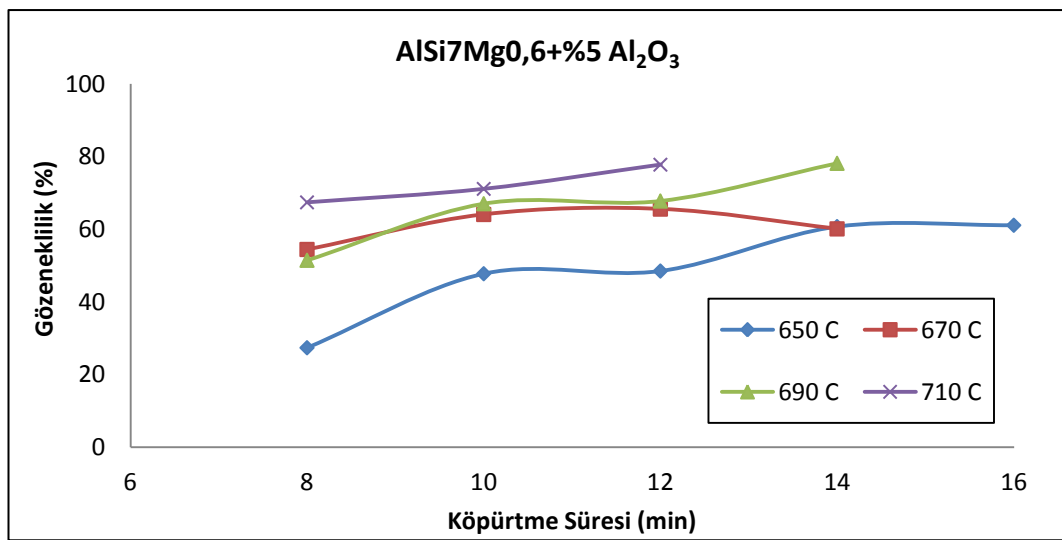


Şekil 6. 31. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

Al₂O₃ ilavesinin gözenekliliğe etkileri

650°C köpürtme sıcaklığı ve 10 ve 12 dakika köpürtme süresinde %50 civarında gözeneklilik oluşmuştur. 14 ve 16 dakikada ise %60 gözeneklilik meydana geldiği görülmüştür. 670 °C köpürtme sıcaklığında ise 10 ve 12 dakika köpürtme sonrasında %65 civarında gözeneklilik meydana geldiği görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranının %65 olduğu belirlenmiştir. 14 dakika sonrasında %60 gözeneklilik oluşmuştur. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 10 ve 12 dakikada %70 gözenekliliğe sahip olduğu görülmüştür. 14 dakika köpürtme

süresinde ise yaklaşık %80 gözeneklilik meydana geldiği ancak sandviç yapının bozulduğu belirlenmiştir. 710 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakika köpürtme süresi gözeneklilik oranının oranının %65 olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar Al_2O_3 ilaveli gözeneklilik oranının %70 olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranını %80 olmuş ve sandviç yapı tamamen bozulmuştur (Şekil 6.32).

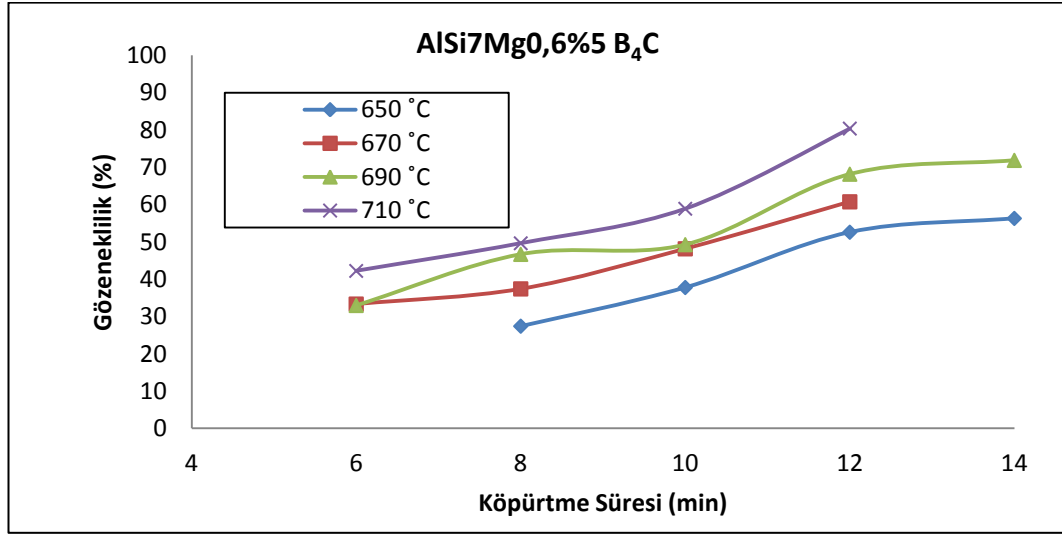


Şekil 6. 32. Al_2O_3 ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

B_4C ilavesinin gözenekliliğe etkileri

650°C köpürtme sıcaklığı ve 10 ve 12 dakika köpürtme süresi %50 civarında gözeneklilik oluşmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranı %55, 16 dakika sonrasında ise gözeneklilik %65 olmuştur. 670 °C köpürtme sıcaklığında 10 dakikada %50 civarında gözeneklilik meydana gelirken, köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranının %60 olduğu belirlenmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 8 ve 10 dakika köpürtme süresi B_4C ilaveli ASK'lerin gözeneklilik oranlarının %50 olmasına neden olmuştur. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranı %70 olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise yaklaşık %80 gözeneklilik

meydana gelmesine rağmen sandviç yapı bozulmuştur. 710 °C köpürtme sıcaklığında 8 ve 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar gözeneklilik oranının %50 ve %60 olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla gözeneklilik oranını %80 olmuş ancak sandviç yapı bozulmuştur (Şekil 6.33).



Şekil 6. 33. B₄C ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen gözeneklilik oranı.

6.6.6. Partikül ilavesinin şekil faktörüne etkileri

SiC ilavesinin şekil faktörüne etkileri

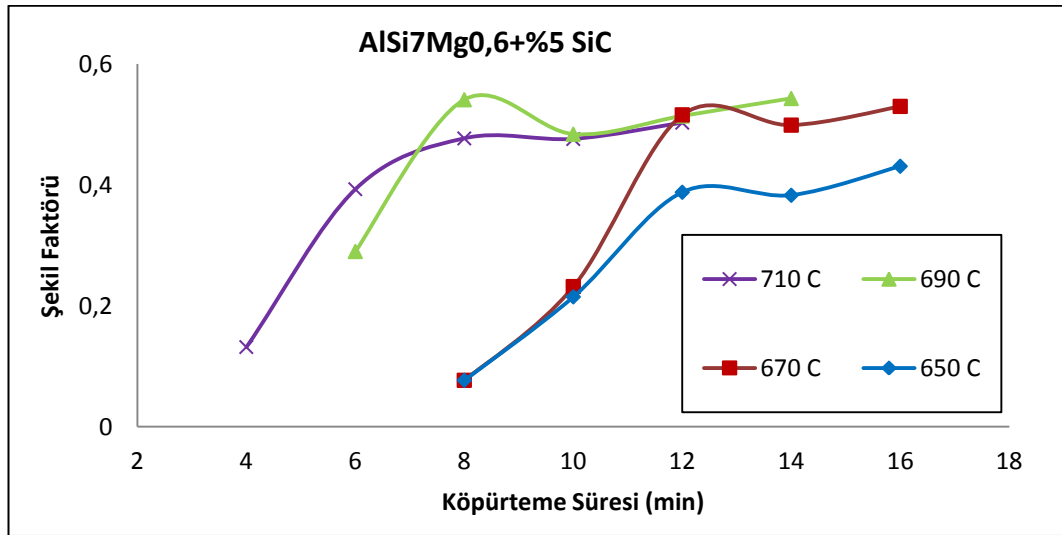
Şekil faktörünün belirlenmesi için Eşitlik 6. 4'te verilen formüller kullanılmıştır. Her iki formülde de hesaplanan değerler 1'e yaklaştıkça ideal küresel yapı elde edildiği literatürde belirtilmektedir [98-100].

$$f = \frac{P^2}{4\pi A} \text{ veya } f = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (6.4)$$

Burada P çevre, A alan, f ise şekil faktörünü ifade etmektedir.

Köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi ve partikül ilavesinin gözenek morfolojilerine etkilerini belirlemek için yapılan çalışmalar sonucu elde edilen

şekil faktörü değerleri Şekil 6.30, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32'de verilen grafiklerde görülmektedir. SiC ilave edilerek 650 °C köpürtme sıcaklığı ve 10 dakika köpürtme süresi kullanılarak üretilen ASK'lerde şekil faktörü 0,2 iken 12,14 ve 16 dakika köpürtme sürelerinde bu değer yaklaşık 0,4 olmuştur. Şekil faktörünün 670 °C köpürtme sıcaklığında 8 ve 10 dakika köpürtme süresindeki değerleri 0,2 civarında olmuştur. 12, 14 ve 16 dakika sonrasında 0,5 civarında şekil faktörü değeri elde edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 6 dakika 0,3 şekil faktörü değeri elde edilirken 8, 10 ve 12 dakika köpürtme süresinde ise 0,5 şekil faktörü değerine sahip olduğu görülmüştür. Köpürtme süresinin 14 dakikaya çıkarılmasıyla 0,6 şekil faktörü değeri elde edilmiştir. 710 °C köpürtme sıcaklığında 6 dakika köpürtme süresi şekil faktörü değerinin 0,4 olmasına neden olmuştur. 8, 10 ve 12 dakika köpürtme süresi şekil faktörü değerinin 0,5 olmasına neden olmuştur (Şekil 6.34).

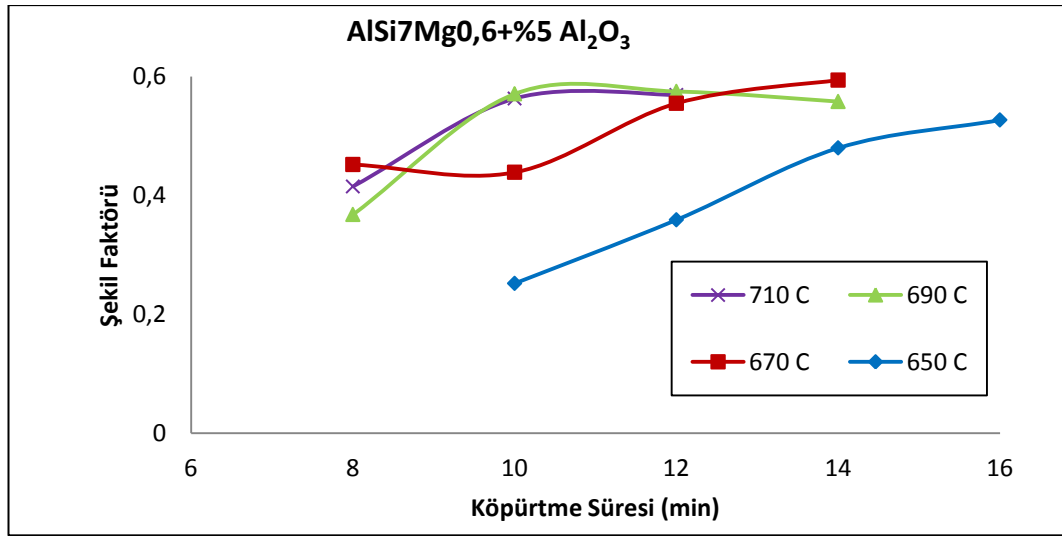


Şekil 6. 34. SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

Al₂O₃ ilavesinin şekil faktörüne etkileri

650°C köpürtme sıcaklığı ve 10 dakika köpürtme süresinde üretilen Al₂O₃ ilaveli ASK'lerde şekil faktörü 0,2 olmuştur. 12 dakika köpürtme süresi şekil

faktörünün 0,3 olmasına neden olmuştur. 14 ve 16 dakika köpürtme süresinde ise 0,5 şekil faktörü değeri elde edilmiştir. Şekil faktörünün 670 °C köpürtme sıcaklığı ve 8 ve 10 dakika köpürtme süresindeki değerleri 0,4 civarında olmuştur. 12 ve 14 dakika köpürtme süresinde ise 0,6 civarında şekil faktörü değeri elde edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 8 köpürtme süresinde şekil faktörü değerinin 0,4 olmasına neden olmuştur. 10, 12 ve 14 dakika köpürtme süresinde ise 0,6 şekil faktörü değerine sahip olduğu görülmüştür. 710 °C köpürtme sıcaklığında 8 dakika köpürtme süresi şekil faktörü değerinin 0,4 olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar şekil faktörü değerinin 0,5 olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla şekil faktörü değeri 0,6 olmuştur (Şekil 6.35).

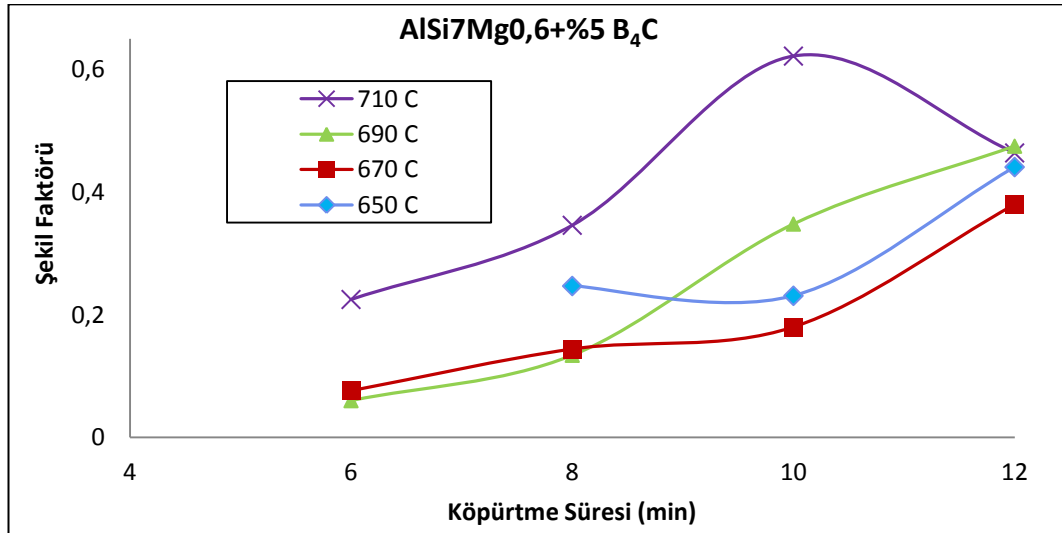


Şekil 6. 35. Al_2O_3 ilaveli ASK' lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen yoğunluk oranı.

B_4C ilavesinin şekil faktörüne etkileri

650 °C köpürtme sıcaklığı ve 10 dakika B_4C ilaveli ASK'lerde şekil faktörü 0,2 olurken 12 dakika şekil faktörünün 0,4 olmasına neden olmuştur. 14 ve 16 dakika köpürtme süresinde ise 0,6 civarında şekil faktörü değeri elde edilmiştir. Şekil faktörünün 670 °C köpürtme sıcaklığı ve 8 dakika köpürtme süresindeki değerleri 0,1 civarında olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde

0,2 şekil faktörü değeri elde edilmiştir. 12 ve 14 dakika köpürtme süresinde ise 0,4 civarında şekil faktörü değeri elde edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının 690 °C'ye çıkartılmasıyla 8 dakika köpürtme süresinde 0,1 civarında, 10 dakika köpürtme süresinde ise 0,3 şekil faktörü değerine sahip olduğu görülmüştür. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılmasıyla şekil faktörü değeri artarak 0,5 olmuştur. 14 dakika köpürtme süresinde ise sandviç yapı tamamen bozulduğu için şekil faktörü değeri dikkate alınmamıştır. 710 °C köpürtme sıcaklığında 6 dakika şekil faktörü değerinin 0,2 olmasına neden olmuştur. 8 dakika köpürtme süresi şekil faktörü değerinin kısmen artarak 0,3 olmasına neden olmuştur. 10 dakika köpürtme süresinde yapılan çalışmalar B₄C ilaveli ASK'lerin şekil faktörü değerinin 0,6 olduğunu göstermiştir. Köpürtme süresinin 12 dakikaya çıkarılması sandviç yapının bozulmasına neden olmuştur (Şekil 6.36).

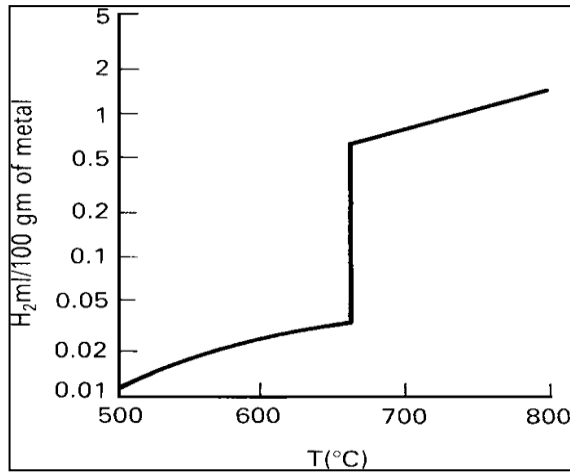


Şekil 6. 36. B₄C ilaveli ASK 'lerde köpürtme süresi ve köpürtme sıcaklığına bağlı olarak değişen şekil faktörleri.

Farklı partiküller ilave edilerek üretilen ASK'lerde köpürtme sıcaklığı ve köpürtme sürelerindeki artış küresel yapıya yakın gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur. Zhang ve arkadaşları [101] yaptıkları çalışmada kapalı gözenekli metal köpüklerde gözeneklilik, gözenek boyutu ve şekil faktörünün

üç temel faktör olduğunu ve artan sıcaklığın küreselliği arttırdığını belirtmişlerdir.

Partikül ilavesinin ASK'lerin köpürebilirliğine etkilerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda, köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin süresinin artmasıyla lineer genişleme oranları, gözeneklilik oranları ve gözenek boyutlarında artışa neden olurken yoğunluk değerlerinde azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresinin etkilerinin nedeni Bölüm 6. 4'de açıklanmıştır. Köpürtme sıcaklığının lineer uzama, gözeneklilik ve gözenek boyutunu arttırmasının diğer bir nedeni de alüminyumun sıcaklıktaki artışla birlikte hidrojen çözünürlüğünün artmasıdır. Şekil 6. 37'de hidrojen gazının çözünürlüğünün artan sıcaklıkla birlikte katlanarak arttığını gösteren grafik verilmiştir [102,103].

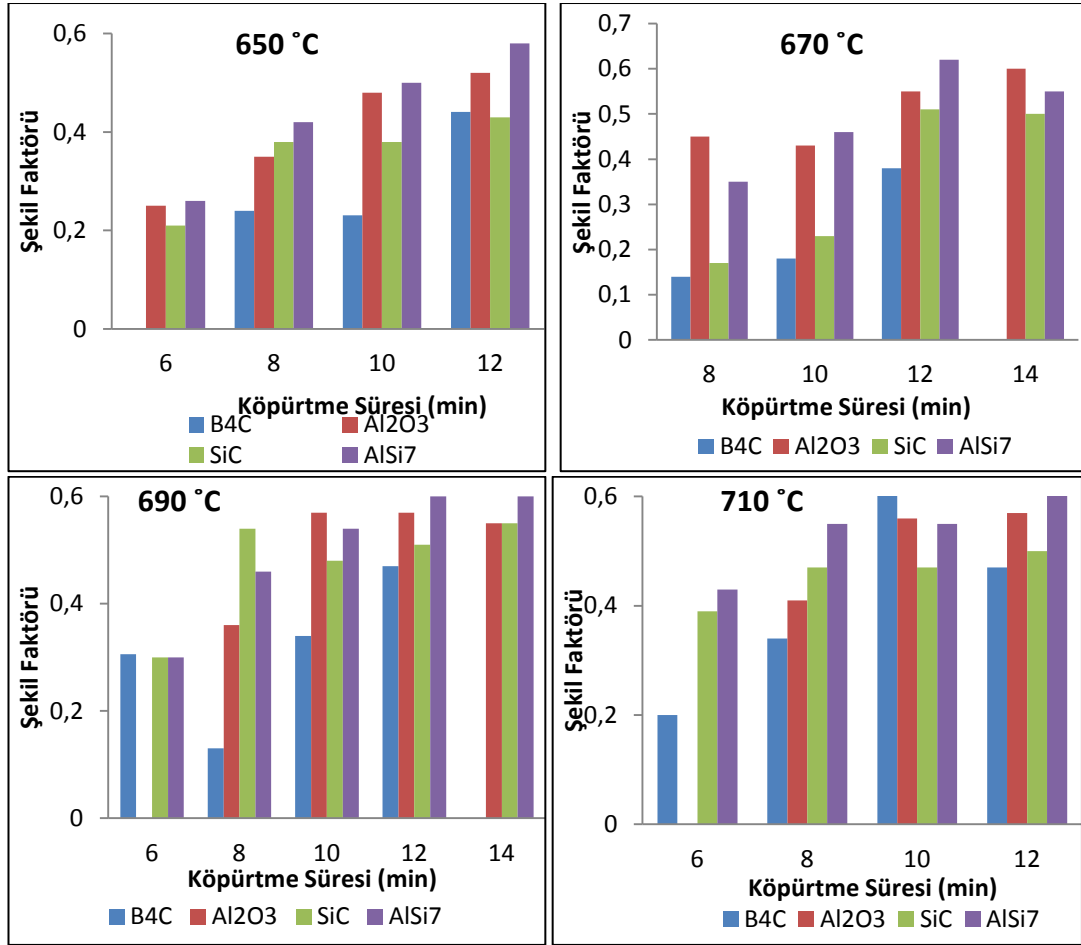


Şekil 6.37. Alüminyumda hidrojen çözünürlüğünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi [102].

Metalik köpüklerde gözenek oluşumu ve gözenek büyümesinin kaynağının biri köpürtücü maddeden (TiH_2) ayrılan hidrojen gazı iken diğer bir kaynağı da fırın içerisindeki atmosferdir. Köpürtülecek numune fırın içerisinde ne kadar fazla kalırsa ortamdaki o kadar hidrojen alacaktır. Dolayısıyla köpürtme süresinin artmasının gözeneklilik, gözenek boyutu ve lineer uzamayı arttırmasının diğer bir nedeninin de numunenin fırın içerisinde kaldığı süreçte ortamdaki daha fazla miktarda hidrojen gazı alması olduğu düşünülmektedir.

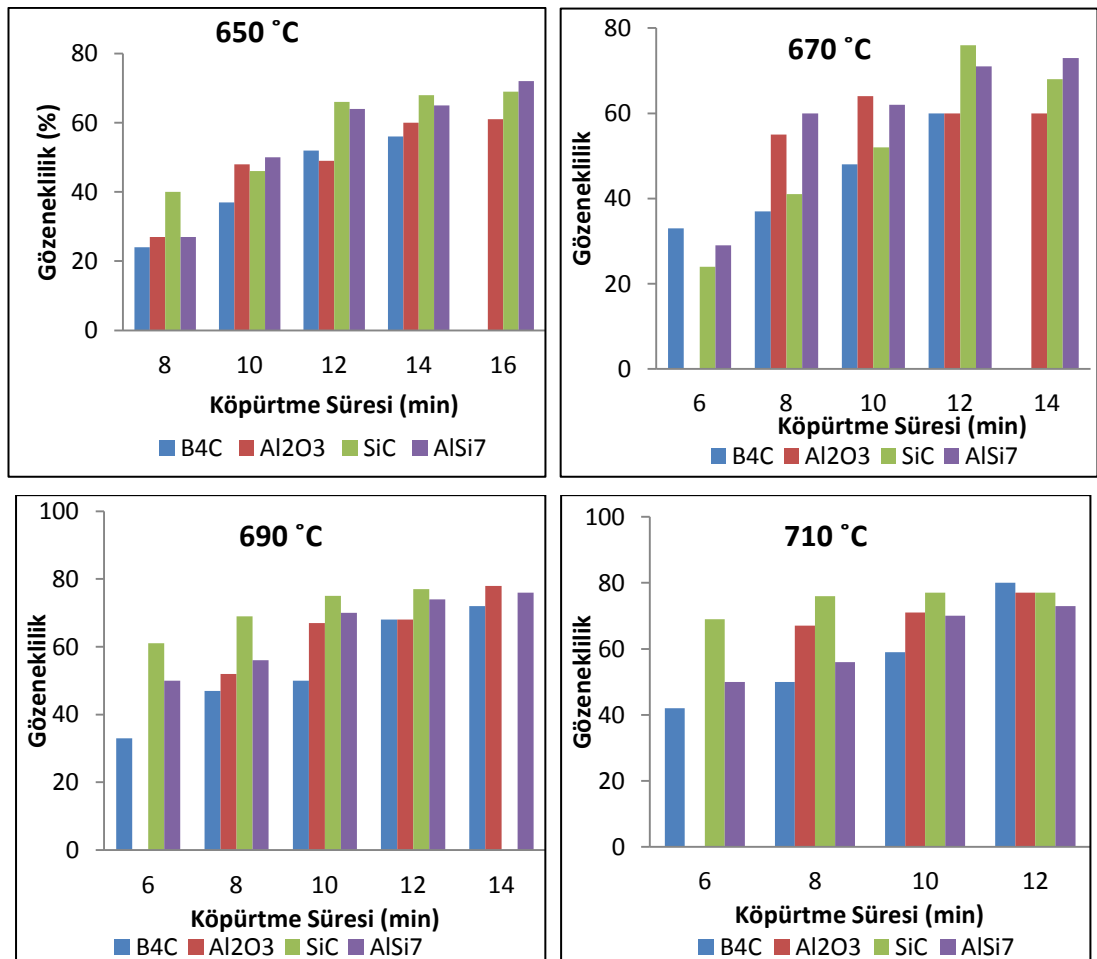
6.7. SiC, Al₂O₃ ve B₄C ilavesinin ASK'ların Köpürebilirliğine Etkilerinin Karşılaştırılması

650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında partikül türünün gözenek yapısındaki küreselleşmeye (şekil faktörüne) kısmi etkileri olmuştur. Bütün sıcaklıklarda AlSi7Mg0,6 karışımından üretilen ASK'lerde şekil faktörü değerleri yüksektir. Artan köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi, partikül ilaveli ASK'ların şekil faktörü değerlerinin artmasına neden olmuştur (Şekil 6. 38). Al₂O₃ ilavesi şekil faktörü değerinin SiC ilaveli sandviç köpüklerin şekil faktörü değerlerinden yüksek olmasına neden olmuştur. Haesche [104] tarafından yapılan çalışmalarda farklı oranlarda ve farklı boyutlarda Al₂O₃ ve SiC tozları kullanılmış ve Al₂O₃ ilaveli köpüklerin gözeneklerinin SiC ilaveli köpüklerin gözeneklerinden daha küresel olduğunu belirtmiştir.



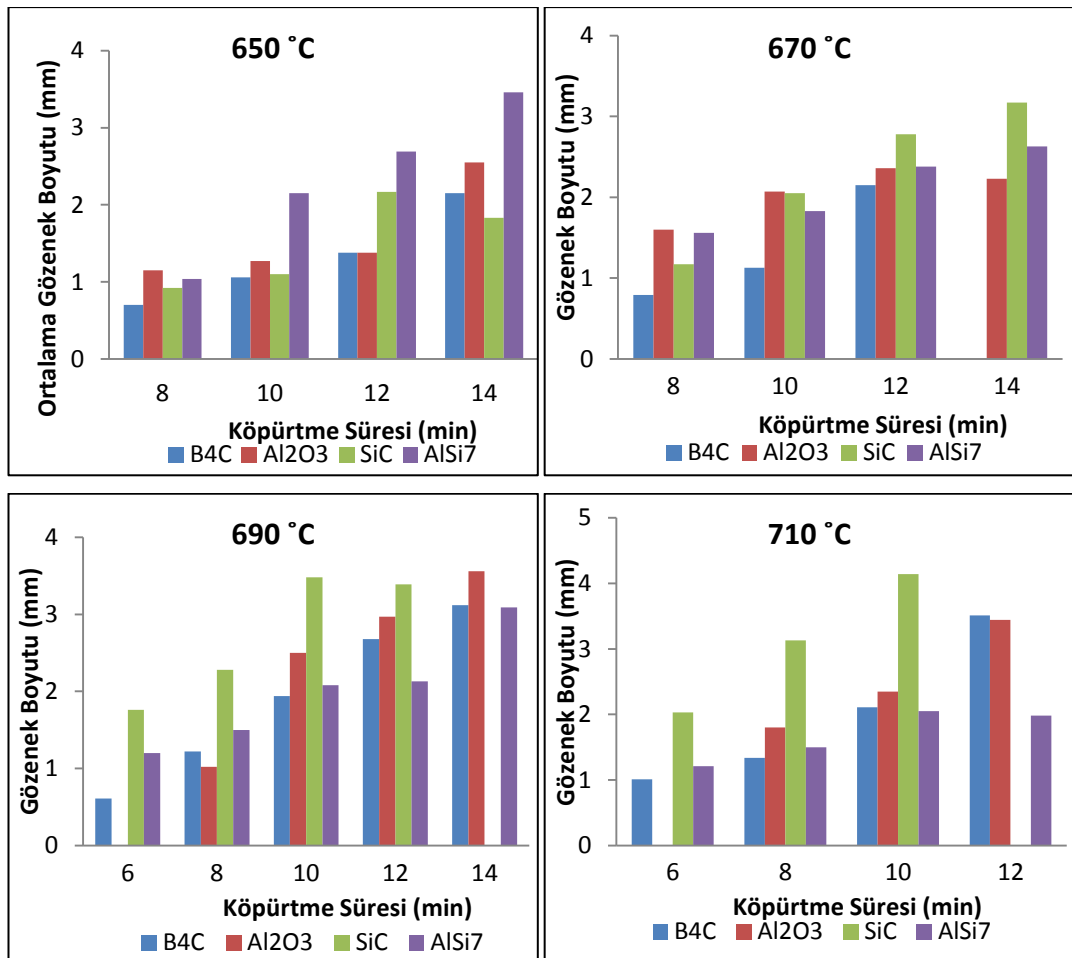
Şekil 6. 38. Partikül ilavesinin şekil faktörüne etkileri.

Şekil 6. 39' da 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında AlSi7Mg0,6, SiC ve Al₂O₃ ilaveli ASK'ların gözenekliliğinin yaklaşık aynı değerlerde, B₄C ilaveli ASK'ların gözenekliliğinin ise kısmen düşük olduğu görülmektedir. 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında ise partikül ilavesinin gözenekliliği kısmen arttırdığı söylenebilir. Ayrıca köpürtme süresinin artmasının gözeneklilik oranında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Burada gözeneklilik ifadesi birim alana düşen gözenek sayısı olmayıp yapı içerisindeki boşluk miktarını ifade etmektedir. Zira yapı içerisindeki boşluk miktarı hesaplanırken hacimsel değişim dikkate alınırken, gözenekliliğin belirlenmesi için kullanılan eşitlikte birim alandaki gözenek sayısı dikkate alınır.



Şekil 6. 39. Gözeneklilik oranına partikül ilavesinin etkileri.

Partikül ilavesinin 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında ortalama gözenek boyutlarını arttırdığı görülmüştür (Şekil 6.40). Degin ve Ziyuan [105] Al-Si alaşımına farklı boyutlarda SiC ve Al₂O₃ ilave ederek yaptıkları çalışmada SiC ve Al₂O₃ ilavesinin gözenekliliği ve gözenek boyutlarını artırdığı sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde köpürtme süresinin artması da ortalama gözenek boyutlarını arttırmıştır. Bu durumun partikül ilavesi ile artan viskozitenin gözenek duvarlarında kırılmayı geciktirerek gözenek birleşmelerini engellemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Köpüklere partikül ilavesinin kararlılığı etkilediği bilinmektedir. Gözenek duvarında partikülün varlığı sıvının viskozitesini artırır diğer taraftan sıvı metalin akışkanlığını azaltır [48].

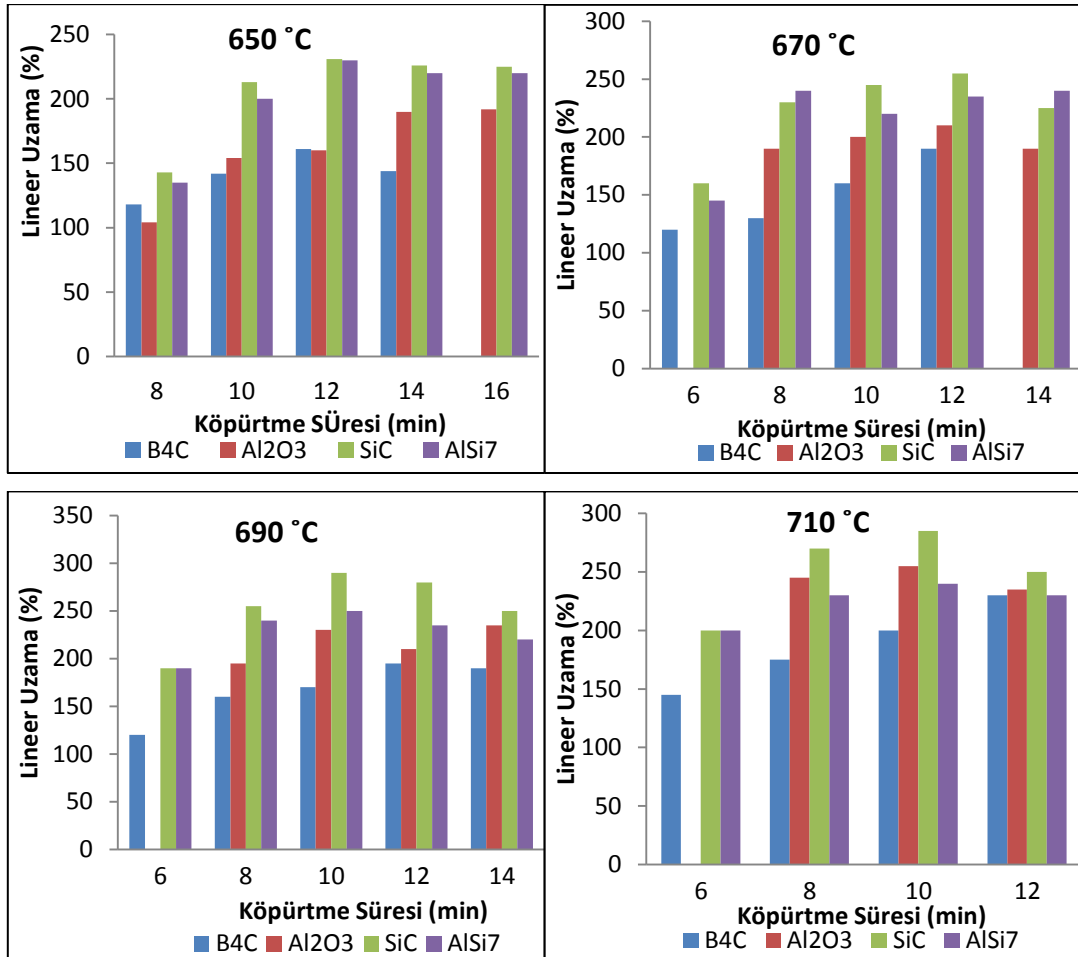


Şekil 6. 40. Partikül ilavesinin gözenek boyutuna etkileri.

Şekil 6.41'de partikül ilave edilerek farklı sıcaklıklarda üretilen ASK'lerin lineer uzama oranları verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, 650°C köpürtme sıcaklığında AlSi7Mg0,6 karışımından üretilen ASK'ler ile SiC ilaveli ASK'lerin lineer uzama oranlarının yakın değerlerde ve yaklaşık %200 civarlarında olduğu, Al₂O₃ ve B₄C ilaveli ASK'lerin lineer uzama oranlarının ise kısmen düşük (yaklaşık %150) olduğu görülmüştür. Artan köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresiyle lineer uzama oranlarının yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Al₂O₃ ve SiC ilaveli ASK'lerde köpürtme sıcaklığının ve köpürtme süresinin artmasıyla birlikte lineer uzama oranının AlSi7Mg0,6 karışımından elde edilen ASK'lerin lineer uzama oranlarından fazla olmuştur. Bunun nedeninin partikül ilavesinin gözeneklerin çekirdeklenmesini arttırarak gözenekliliği ve gözenek boyutlarını artırmasına neden olduğu varsayılmaktadır. Elbir ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [79] AlSi7 esaslı köpüklerde 750 °C köpürtme sıcaklığında yaklaşık %400 lineer uzama elde etmişlerdir. Esmaelzedeh ve arkadaşları [95] AlSi7 alaşımına %3 SiC ilave ederek 750 °C sıcaklıkta yaklaşık %500 oranında, Asavavithchai ve Kennedy [96] AlMg0,6 alaşımına %6 Al₂O₃ ilave edilerek 800 C sıcaklıkta üretilen alüminyum köpüklerde %500 civarında lineer uzama elde edilmiştir. Yapılan çalışma ile kıyaslandığında bu lineer uzama oranlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklılığın nedenlerinden birisi yapılan çalışmada sandviç köpük üretildiği için yüzey levhalarının lineer uzama oranlarına etki etmesi diğeri ise köpürtme sıcaklığı olarak daha düşük (650 ile 710 °C arasında) sıcaklıkların kullanılmasıdır.

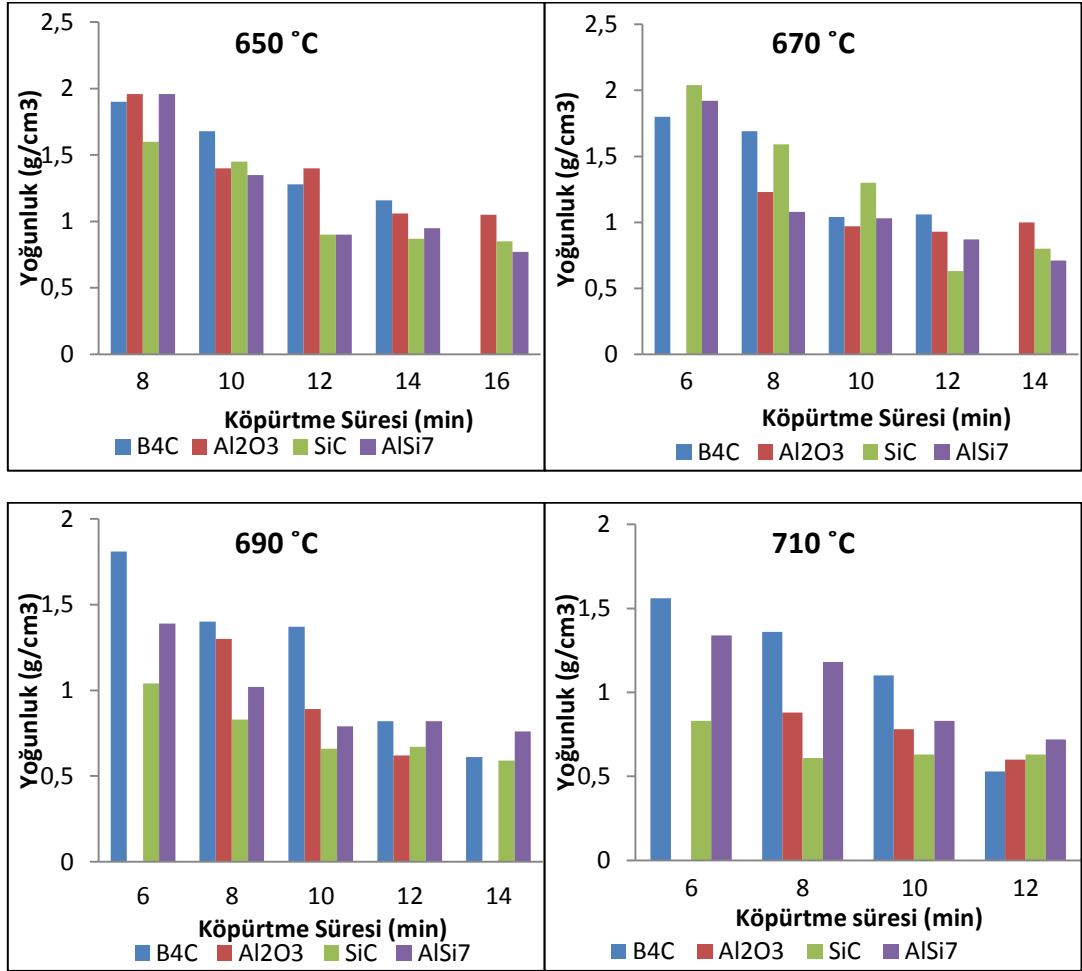
SiC ilaveli sandviç köpüklerin lineer uzama oranlarının Al₂O₃ ilaveli sandviç köpüklerin lineer uzama oranlarından fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun Al₂O₃ ve SiC parçacık boyutlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Zira yapılan çalışmada 8 mikron boyutlu Al₂O₃ ve 12 mikron boyutlu SiC parçacıkları kullanılmıştır. Haesche ve arkadaşları [104] yaptıkları çalışmada % 5 oranında 12 mikron boyutlu SiC ve Al₂O₃ ilave ederek 750 C sıcaklıkta yaptıkları çalışmada yaklaşık % 400 civarında lineer uzama oranları elde etmişlerdir. Partikül boyutları 3 mikron parçacık boyutu

kullandıklarında ise lineer uzama oranlarının %550 civarında olduğunu belirlemişlerdir [104].



Şekil 6. 41. Partikül ilavesinin lineer uzamaya etkileri.

Köpürtme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak partikül ilaveli ASK'lerin yoğunluk değerlerinin AlSi7Mg0,6 karışımından üretilen ASK'lerin yoğunluk değerlerinden düşük olduğu Şekil 6.42'de verilen grafiklerden anlaşılmaktadır. Partikül ilavesinin gözenekliliği ve gözenek boyutlarını arttırması lineer uzama oranlarının artmasına dolayısıyla yoğunluk değerlerinin azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. 42. Partikül ilavesinin yoğunluğa etkileri.

Wübben ve arkadaşlarına [103] göre, seramik partiküllerinin ilavesi köpük yapıyı üç farklı yönden etkiler. Bunlar, partiküllerin ergiyik metalin viskozitesini artırır (viskozite metalin akışkanlığını engeller), metalin yüzey gerilmesini azaltır ve kabarcık etrafındaki filmlerin kırılmasını engeller veya geciktirir.

Yang ve Nakae'ye göre [5] seramik partiküllerinin diğer bir rolde gözeneklerin oluşması ve büyümesi için çekirdekendirici olmasıdır. Degining ve Ziyuan [105] partikül boyutu ve partikül oranının köpüğe etkilerini araştırmışlar ve gözenek boyutu ve gözenek duvar kalınlığı büyük oranda SiC ve Al₂O₃ partikül ilavesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bunun

nedeninin partiküllerin gözenek duvarındaki drenajı geciktirmesinin olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca köpürtme sıcaklığının artmasının viskoziteyi azaltarak gözenek duvarı kalınlığını azaltmıştır.

6.8. ASK'lerin Mekanik Özellikleri

Levha kalınlığının ve partikül ilavesinin köpürebilirliğe etkilerinin belirlenmesi için yapılan çalışmalar 650 °C köpürtme sıcaklığında 14 dakika, 670°C' de 12 dakika ve 690 ile 710 °C köpürtme sıcaklıklarında 10 dakika köpürtme sürelerinde optimum sandviç yapının elde edildiğini göstermiştir. Bu nedenle mekanik özelliklerin belirlenmesinde 650 °C' de 14 dakika, 670 °C'de 12 dakika ve 690-710 °C' de 10 dakika köpürtme süreleri kullanılmıştır.

6.8.1. ASK'lerin basma dayanımı sonuçları

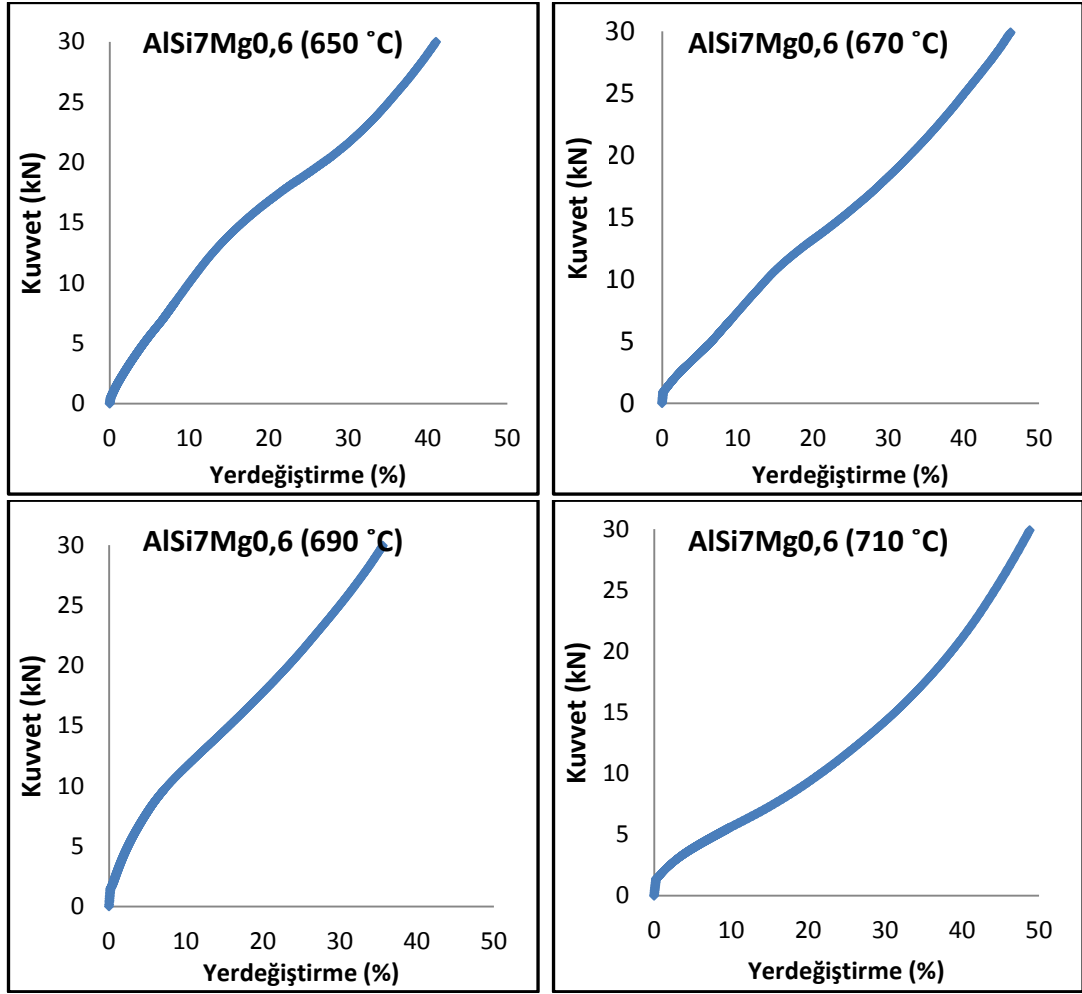
ASK'lerin basma dayanımlarını belirlemek için hazırlanan numunelerin ortalama yoğunluk değerleri Çizelge 6. 2' de verilmiştir.

Çizelge 6. 2. ASK'lerin ortalama yoğunluk değerleri

Köpürtme Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³) AlSi7Mg0,6 ilaveli	Yoğunluk (g/cm ³) SiC ilaveli	Yoğunluk (g/cm ³) Al₂O₃ ilaveli	Yoğunluk (g/cm ³) B₄C ilaveli
650	1,47	1,24	1,21	1,55
670	1,41	1,47	1,28	1,8
690	1,40	1,42	1,18	1,7
710	1,44	1,45	1,18	1,6

AlSi7Mg0,6 esaslı ASK'lerin basma dayanımları

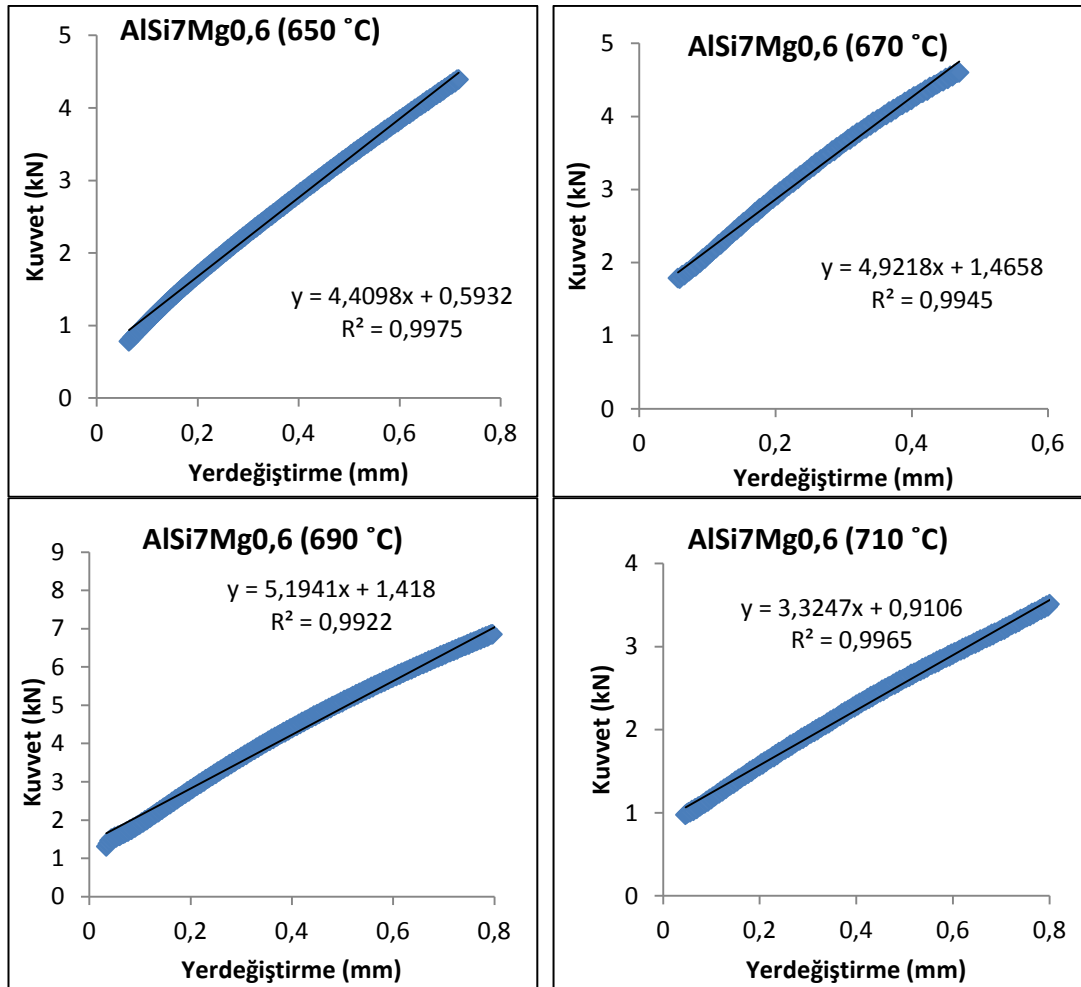
650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında AlSi7Mg0,6 karışımı ile üretilen metalik köpüklerin basma dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalara ait grafikler Şekil 6.43'te verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında yaklaşık %20 deformasyondan sonra ortalama 12 kN kuvvet altında çökme başlamış %30 deformasyon oranında ve ortalama 20 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. 650 °C köpürtme sıcaklığında metalik köpükte oluşan gözeneklilik oranının az olması ve yoğunluğun fazla olması nedeniyle çökme ve yoğunlaşma başlangıçları arasındaki deformasyon miktarının düşük olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen metalik köpüklerde de yaklaşık %15 deformasyondan sonra ortalama 10 kN yük altında çökme başlamış ve %35 deformasyon oranında ve yaklaşık 20 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. 690 °C köpürtme sıcaklığında ise yaklaşık %10 deformasyondan sonra ortalama 11 kN yük altında çökme başlamış ve %25 deformasyon oranında ve ortalama 20 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. Köpürtme sıcaklığının 710 °C' ye çıkartılmasıyla yaklaşık %10 deformasyon oranında ve ortalama 8 kN yük altında çökmenin başladığı yaklaşık %40 deformasyon oranında ve 20 kN yük altında yoğunlaşma görülmüştür. 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında metalik köpükte oluşan gözeneklilik oranının yüksek olması, gözenek boyutlarının büyük olması ve gözenek duvar kalınlığının düşük olması düşük deformasyon oranlarında çökme başlangıcının oluşmasına neden olmaktadır. Yapılan değerlendirmede köpürtme sıcaklığının artmasıyla çökme ve yoğunlaşma arasındaki mesafenin artmasının daha fazla enerji absorbe edilebileceği sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6. 43. AlSi7Mg0,6 esaslı metalik köpüklere ait basma dayanımı grafikleri.

Yapılan çalışmalarda elde edilen değerlerin literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen değerler ile benzerlik arz ettiği görülmüştür. Banhart [28] AlSi6Cu4 matris malzemesi ile ürettiği metalik köpüklerin basma dayanımını incelemiş ve yaklaşık $0,7 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahip metalik köpüğün 15 kN'luk yük altında çökmeye başladığını belirtmiştir. Benzer şekilde Markaki ve arkadaşları [106] tarafından yapılan çalışmada $0,6 \text{ g/cm}^3$ yoğunluktaki AlSi12Mg0,6 esaslı metalik köpüğün basma deneyinde 18 kN yük altında çökmenin başladığını tespit etmişlerdir. Baumister ve arkadaşları da [107] $0,6 \text{ g/cm}^3$ yoğunluktaki AlSi7 metalik köpüğün çökme başlangıcının 20 kN olduğunu bulmuşlardır.

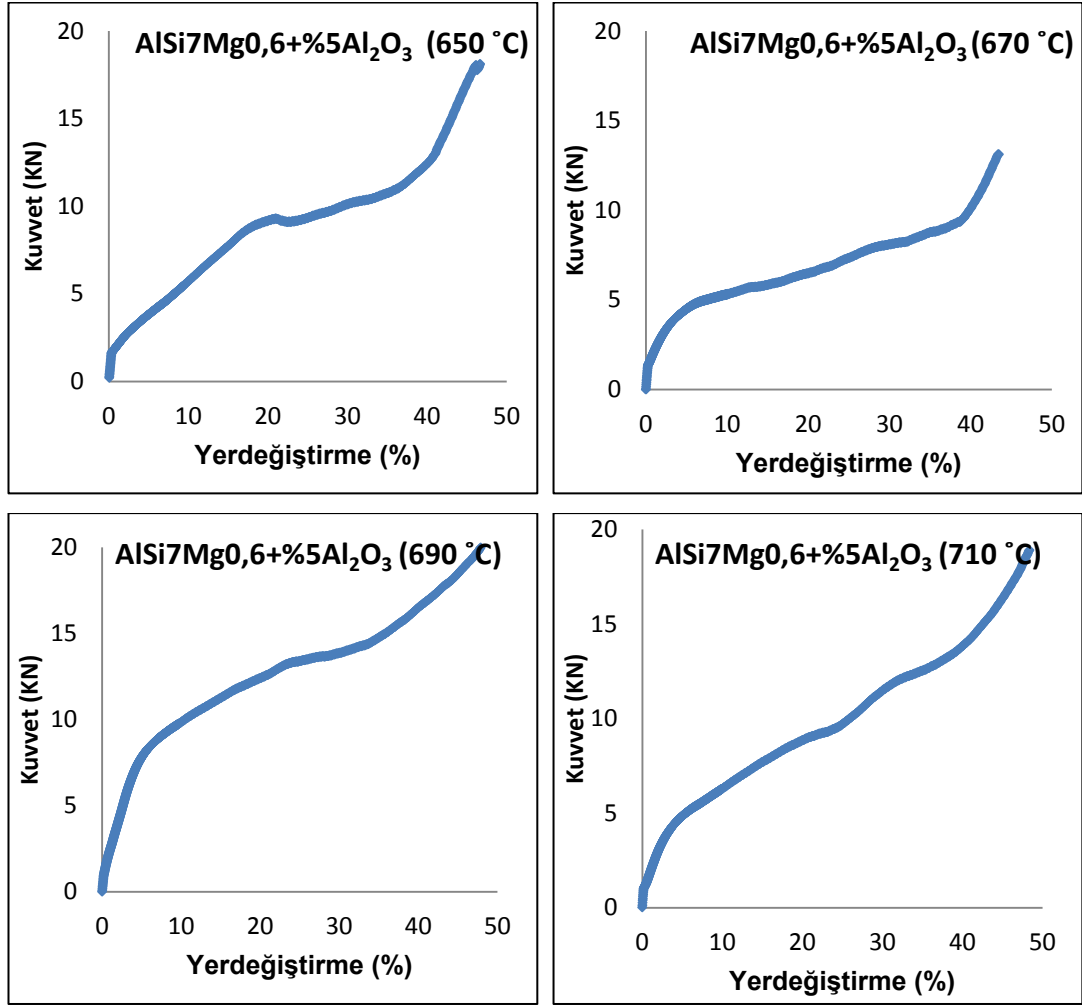
Yapılan basma dayanımı sonucunda ASK'lerde oluşan elastikiyet grafikleri Şekil 6. 44'de verilmiştir. Elastikiyet grafikleri, basma dayanımı grafiklerinin çökme başlangıcı öncesindeki lineer eğiminden elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde köpürtme sıcaklığının artmasının lineer eğimin azalmasına neden olduğu söylenebilir. Köpürtme sıcaklığındaki artışın gözenek duvarlarının kalınlığını azaltıcı yönde etkilemesinin lineer eğimin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Zira metalik köpüklerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinin önemli etkenlerinden birinin de gözenek yapısı olduğu bilinmektedir [108]. Köpürtme sıcaklığının artması elastikiyet eğiminin azalmasına neden olurken çökme başlangıcında yükün de azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 6. 44. AISi7Mg0,6 esaslı metalik köpüklere elastikiyet grafikleri.

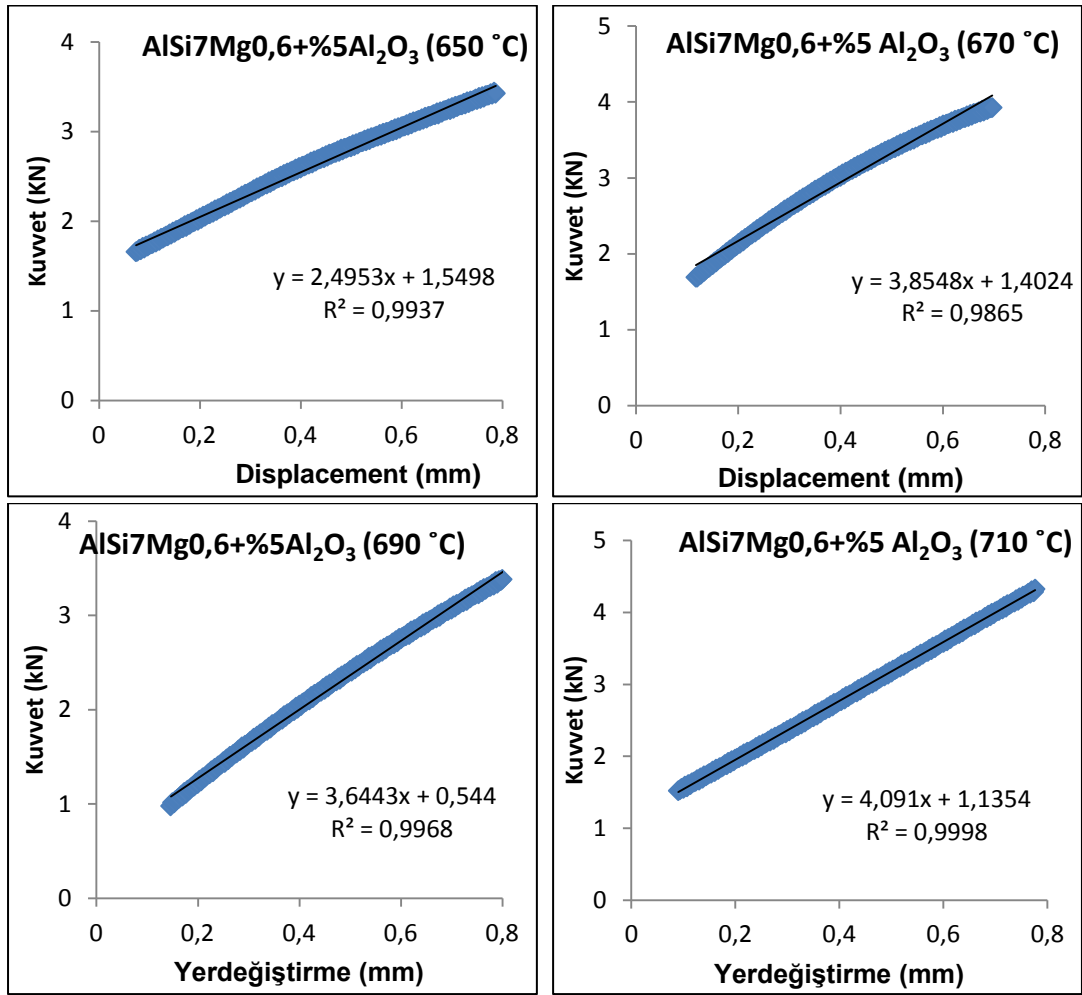
Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımları

AlSi7Mg0,6 karışımına %5 Al₂O₃ ilave edilerek 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen metalik köpüklerin basma dayanımlarını gösteren grafikler Şekil 6.45'te verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında yaklaşık %20 deformasyondan sonra ortalama 7,5 kN yük altında çökme başlamış ve %35 deformasyon oranında ve ortalama 10 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başladığı görülmüştür. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen metalik köpüklerde yaklaşık %5 deformasyondan sonra ortalama 6,5 kN yük altında çökme başlamış ve %40 deformasyon oranında ve yaklaşık 10 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. 690 °C köpürtme sıcaklığında ise yaklaşık %10 deformasyondan sonra ortalama 6,5 kN yük altında çökme başlamış ve %35 deformasyon oranında ve ortalama 15 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. Köpürtme sıcaklığının 710 °C'ye çıkartılmasıyla yaklaşık %5 deformasyon oranında ve ortalama 6 kN yük altında çökmenin başladığı ve %40 deformasyon oranında ortalama 15 kN yük altında yoğunlaşma başladığı görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda 650°C köpürtme sıcaklığında çökme ve yoğunlaşma bölgeleri arasındaki deformasyon oranının 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığındaki çökme ve yoğunlaşma bölgeleri arasındaki deformasyon oranından daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 690 ve 710 °C'de çökme başlangıcı ve yoğunlaşma bölgeleri arasındaki grafik eğimlerinin 650 ve 670 °C'deki çökme başlangıcı ve yoğunlaşma bölgeleri arasındaki grafik eğimlerinden fazla olduğu görülmüştür. Bu durumdan 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında gözenek duvarlarının dayanımının yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6. 45. Al₂O₃ ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri.

Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımı grafiklerinin çökme başlangıcı öncesindeki lineer eğiminden elde edilen elastikiyet grafikleri aşağıda Şekil 6. 46'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde köpürtme sıcaklığının artması lineer eğimi artırmıştır. Köpürtme sıcaklığının artması elastikiyet eğiminin artmasına neden olurken çökme başlangıcında yükün azalmasına neden olmaktadır. Artan köpürtme sıcaklığının Al₂O₃ ilaveli ASK'ların gözenek duvarlarında kısmen gevrekleşmeye neden olduğu söylenebilir. Bu gevrekleşmenin de daha düşük yüklerde çökmenin başlamasına neden olduğu düşünülmektedir.

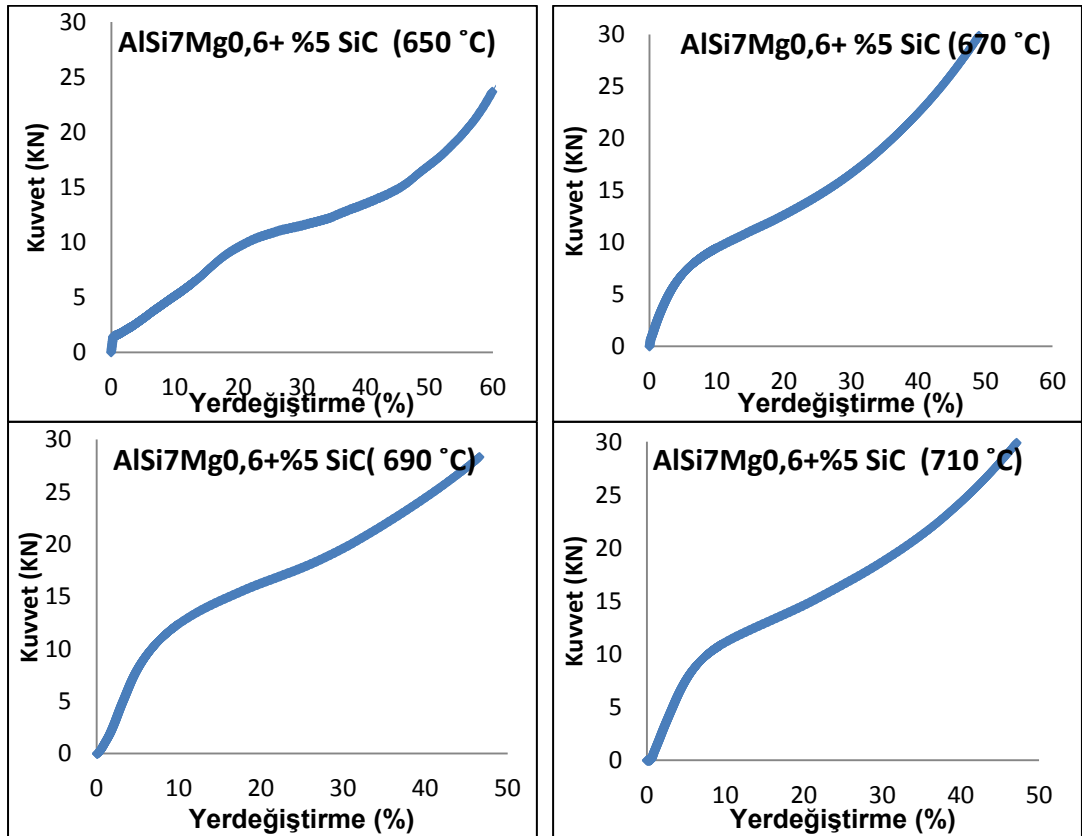


Şekil 6. 46. Al₂O₃ ilaveli ASK'lere elastikiyet grafikleri.

SiC ilaveli ASK'lerin basma dayanımları

Şekil 6. 47'de %5 SiC tozlarının AlSi7Mg0,6 karışımına ilave edilmesiyle 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerin basma dayanımlarını gösteren grafikler görülmektedir. 650 °C köpürtme sıcaklığında yaklaşık %20 deformasyondan sonra ortalama 10 kN yük altında çökmenin başladığı ve %40 deformasyon oranında ortalama 15 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşmanın başladığı görülmüştür. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen metalik köpüklerde yaklaşık %10 deformasyondan sonra ortalama 11 kN yük altında çökme başlamış ve %30 deformasyon oranında yaklaşık 15 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. 690 °C köpürtme

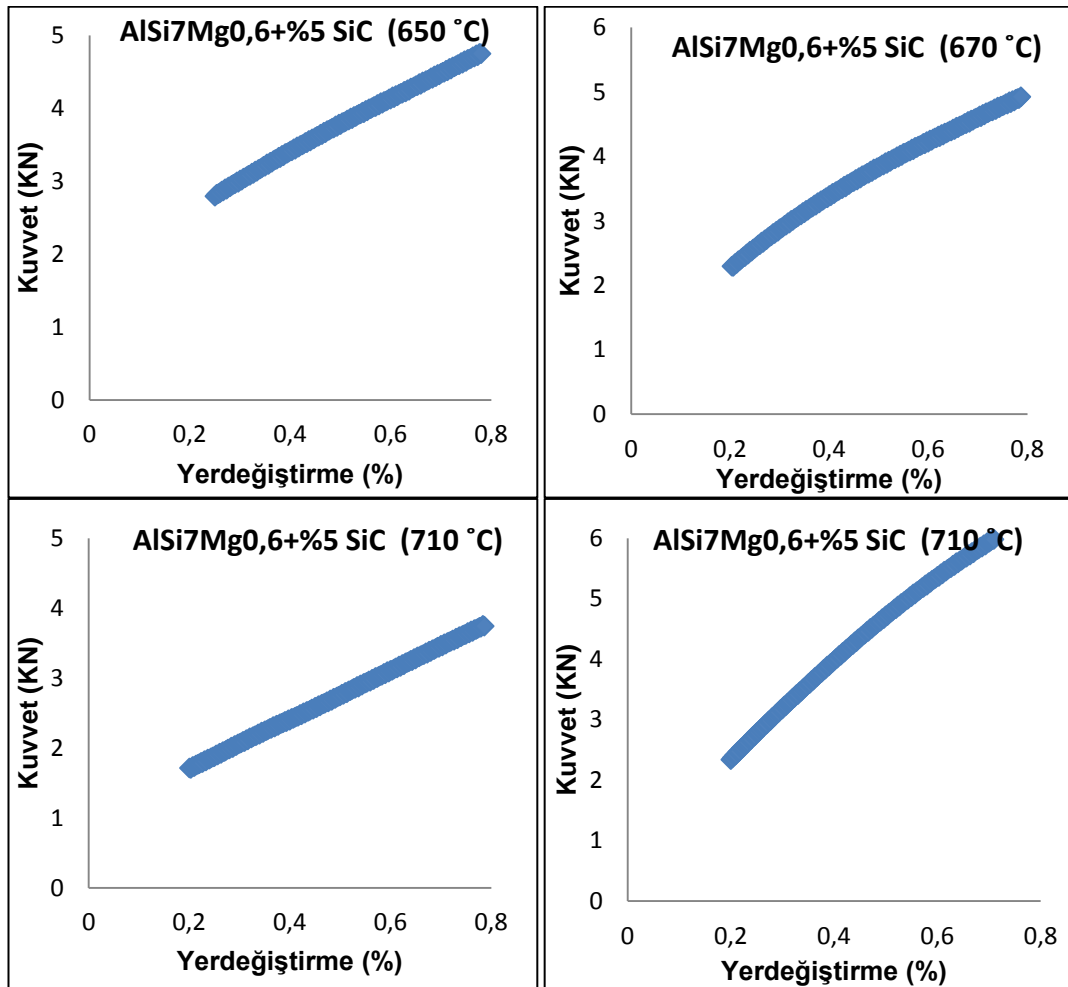
sıcaklığında ise yaklaşık %10 deformasyondan sonra ortalama 10 kN yük altında çökme başlamış ve %30 deformasyon oranında ortalama 20 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. Köpürtme sıcaklığının 710 °C'ye çıkartılmasıyla yaklaşık %10 deformasyon oranında ortalama 12 kN yük altında çökmenin başladığı ve %30 deformasyon oranında ortalama 20 kN yük altında yoğunlaşma başladığı görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında çökme başlangıcı yüklerinin ve çökme- yoğunlaşma bölgeleri arasındaki deformasyon oranlarının benzer olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çökme ve yoğunlaşma bölgeleri arasında grafik eğimlerinin köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Artan köpürtme sıcaklığı ile çökme başlangıcındaki yükler ve çökme-yoğunlaşma bölgeleri arasındaki deformasyon oranları yakın değerlerdeyken çökme-yoğunlaşma bölgeleri arasındaki grafiğin eğimi artmıştır. Bu grafiğin eğiminin artmasından, artan sıcaklıkla birlikte enerji absorbesinin artacağı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6. 47. SiC ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri.

Esmazelzadeh ile Simchi [72] yaptıkları çalışmalarda AlSi7 tozları içerisinde %3 SiC ilave ederek 750 °C' de elde ettikleri metalik köpüklerin basma dayanımının 4 kN olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde Surace ve arkadaşları [109] farklı oranlarda SiC ilave ederek yaptıkları çalışmalarda %5 SiC ilavesinin basma dayanımının 6 kN olduğunu tespit etmişlerdir.

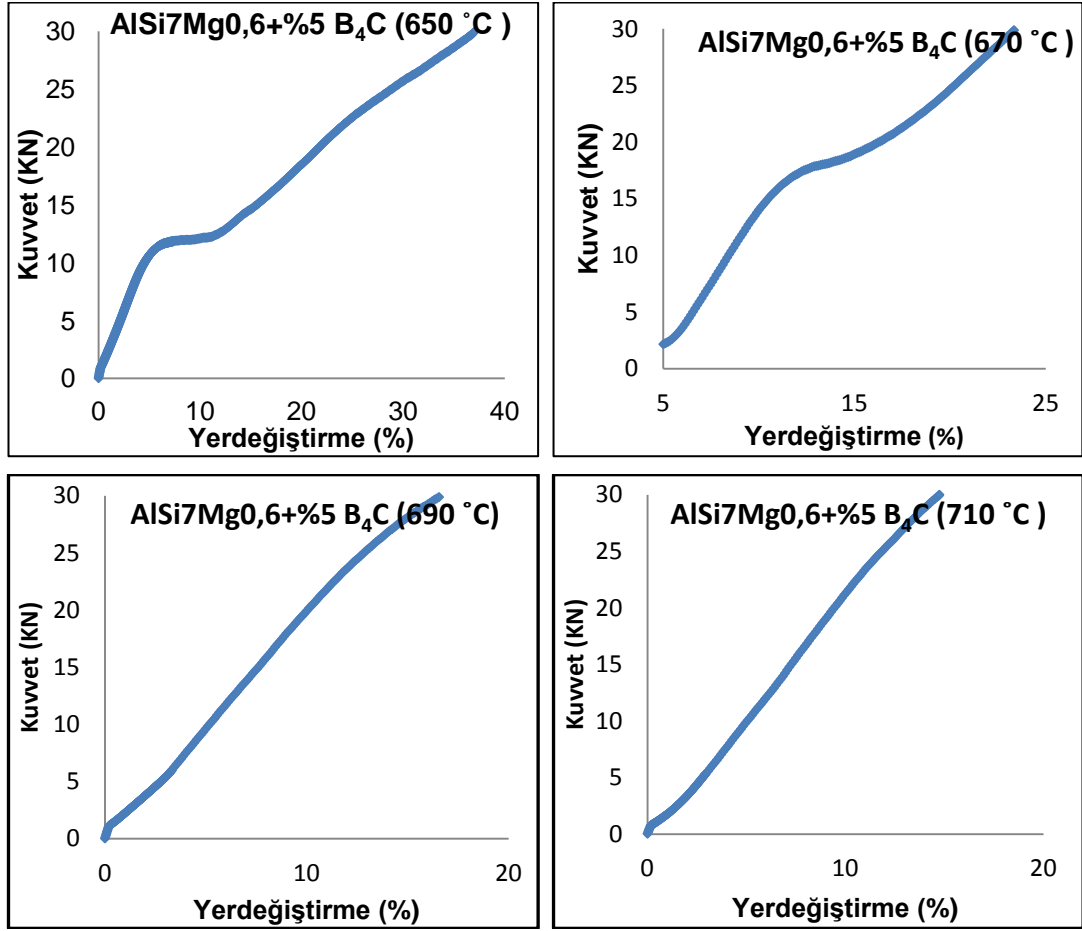
SiC ilaveli ASK'lerin basma dayanımı grafiklerinin çökme başlangıcı öncesindeki lineer eğiminden elde edilen elastikiyet grafikleri Şekil 6. 48'de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde köpürtme sıcaklığının artması lineer eğimi artırmıştır. Köpürtme sıcaklığının artması elastikiyet eğiminin artmasına neden olmuştur.



Şekil 6.48. SiC ilaveli ASK'lere elastikiyet grafikleri.

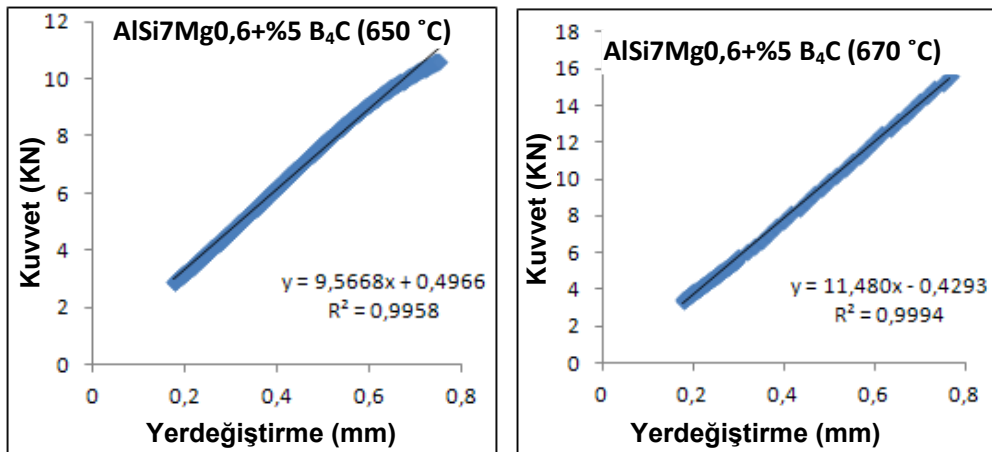
B₄C ilaveli ASK'lerin basma dayanımları

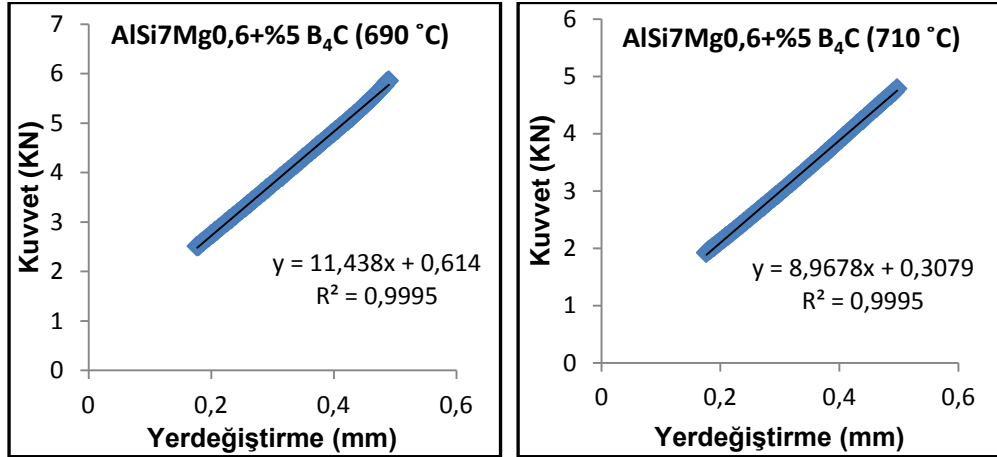
%5 oranında B₄C ilavesinin 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerin basma dayanımlarına etkisini gösteren grafikler Şekil 6. 49'da görülmektedir. 650 °C köpürtme sıcaklığında yaklaşık %5 deformasyondan sonra ortalama 9,5 kN yük altında çökmenin başladığı ve %15 deformasyon oranında ortalama 15 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşmanın başladığı görülmüştür. 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde yaklaşık %10 deformasyondan sonra ortalama 8,5 kN yük altında çökme başlamış ve %25 deformasyon oranında yaklaşık 20 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. 690 °C ve 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise yaklaşık %5 deformasyondan sonra ortalama 4,5 kN yük altında çökme başlamış ve yaklaşık %15 deformasyon oranında ortalama 20 kN yük uygulandıktan sonra yoğunlaşma başlamıştır. Yapılan çalışma sonucunda 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerde çökme ve yoğunlaşma bölgelerinin arasındaki deformasyon oranının düşük olduğu, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise çökme ve yoğunlaşma bölgelerinin belirgin olmadığı ve kuvvet-şekil değiştirme eğrisinin lineer artış gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 6. 49. B₄C ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri.

Şekil 6.50'de B₄C ilaveli ASK'lerin basma dayanımı grafiklerinin çökme başlangıcı öncesindeki lineer eğiminin köpürtme sıcaklığının artmasıyla arttığı görülmektedir.





Şekil 6. 50. B₄C ilaveli ASK'lere elastikiyet grafikleri.

6.8.1. ASK'lerin üç nokta eğme dayanımları

Partikül ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımının belirlenmesi için hazırlanan numunelerin yoğunluk değerleri Çizelge 6. 3'de verilmiştir.

Çizelge 6. 3. ASK'lerin ortalama yoğunluk değerleri

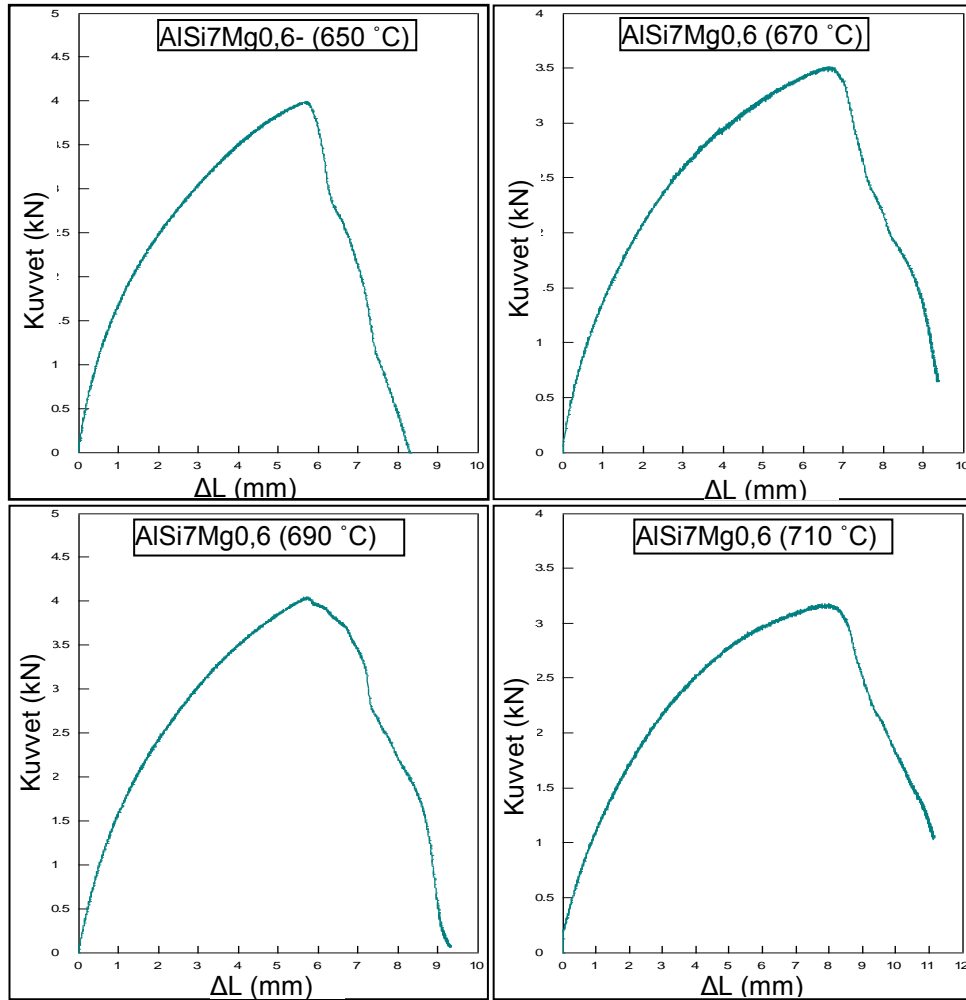
Köpürtme Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³) AlSi7Mg0,6	Yoğunluk (g/cm ³) SiC ilaveli	Yoğunluk (g/cm ³) Al ₂ O ₃ ilaveli	Yoğunluk (g/cm ³) B ₄ C ilaveli
650	1,45	1,45	1,24	1,35
670	1,47	1,47	1,3	1,9
690	1,36	1,42	1,16	1,6
710	1,41	1,45	1,27	1,06

AlSi7Mg0,6 esaslı ASK'lerin üç nokta eğme dayanımları

AlSi7Mg0,6 karışımının üç nokta eğme dayanımına ait farklı temel özellikleri Şekil 6. 51'de verilmiştir. Yapılan üç nokta eğme testlerinde maksimum yükler yaklaşık aynı toplam yer değiştirme değerlerinde meydana gelmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 4 kN, 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 3,8 kN, 690 °C köpürtme

sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 3,6 kN, 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise ortalama 3,1 kN maksimum kuvvet olduğu tespit edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak yük boşalması sonrasında toplam yer değiştirme değerlerinin kısmen arttığı söylenebilir. Grafikler, başlangıçta lineer bir artışın olduğunu ve maksimum kuvvet değerine yaklaşıldığında lineer artışta küçük bir sapmanın olduğunu göstermektedir. Maksimum kuvvet değerine ulaşıldıktan sonra kuvvet başlangıçta belirgin şekilde azalmış ve daha sonra aşamalı olarak azalmıştır. Kuvvette aşamalı olarak meydana gelen azalmaya köpükteki deformasyonun neden olduğu düşünülmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında da benzer durumlarla karşılaşılmıştır [108]. Ayrıca V. Curipi ve arkadaşları [110] tarafından yapılan çalışmalarda da ilk lineer elastik bölgenin bir tepe değerine ulaşıncaya kadar elesto-plastik faz olarak devam ettiği ve daha sonra yükün başlangıçta belirgin şekilde ve daha sonra yumuşakça azaldığı belirtilmiştir.

Yapılan çalışmada AlSi7Mg0,6 esaslı sandviç köpüklerin 650 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında üretiminde eğme dayanımlarının 3-4 kN aralığında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla örtüştüğü söylenebilir. Zira metalik köpüklerin mekanik özellikleri köpüğü oluşturan malzeme türü, yoğunluk, gözenek morfolojisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Simancık ve arkadaşları [111] AlSi12 köpükte yaptığı çalışmada maksimum yük değerinin 5 kN olduğunu tespit etmişlerdir. Peroni ve arkadaşları [112] ise yaptıkları çalışmalarda 6060 alaşımıyla ürettikleri metalik köpüklerin maksimum eğme dayanımının 4 kN olduğunu bulmuşlardır. Benzer şekilde Crupi ve Montanini [110] AlSi10 alaşımı ile yaptıkları çalışma maksimum eğme dayanımının 2,5 kN civarında olduğunu göstermiştir.

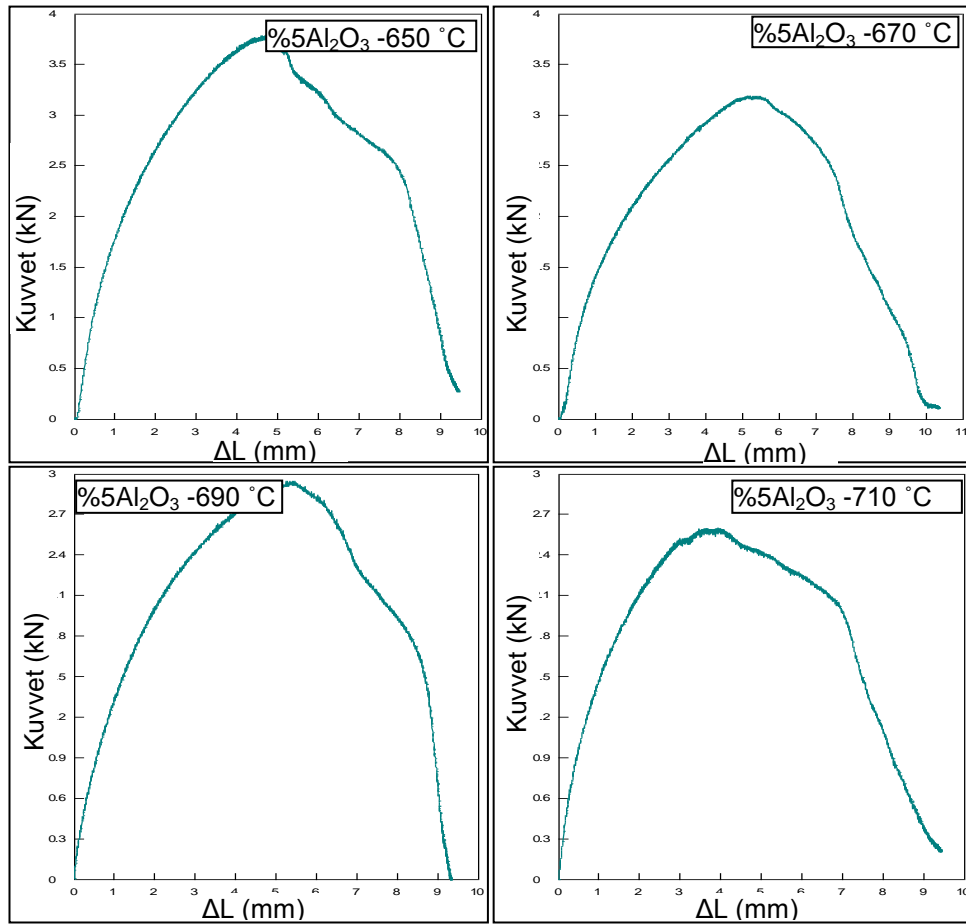


Şekil 6. 51. AISi7Mg0,6 esaslı ASK'lere ait Kuvvet- ΔL eğrisi.

Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımları

ASK'lerin üç nokta eğme dayanımına %5 Al₂O₃ ilavesinin etkisini gösteren grafikler Şekil 6.52'de verilmiştir. 650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 3,5 kN, 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 3,1 kN, 690°C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 2,9 kN, 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise ortalama 2,6 kN maksimum yük değerleri elde edilmiştir. 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerde yaklaşık aynı toplam yer değiştirme değerlerinde maksimum yükler elde edilmiştir. Yük boşalması sonrasında meydana gelen toplam yer değiştirme değerlerinin aynı olduğu ve maksimum

yük değerine yakın lineer artışta meydana gelen sapmaların benzer olduğu söylenebilir. 650, 670 ve 690 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerde maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra yükünaşmalı olarak azaldığı görülmüştür. 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise yük başlangıçta kısmen ani şekilde azalmış daha sonra ise aşamalı olarak azalmıştır. Markaki ve Clyne [108] AlSi12Mg0,6 tozlarına Al₂O₃ ilave ederek yaptıkları üç nokta eğme dayanımı deneylerinde maksimum yükün 1,5 kN olduğunu belirtmişlerdir.

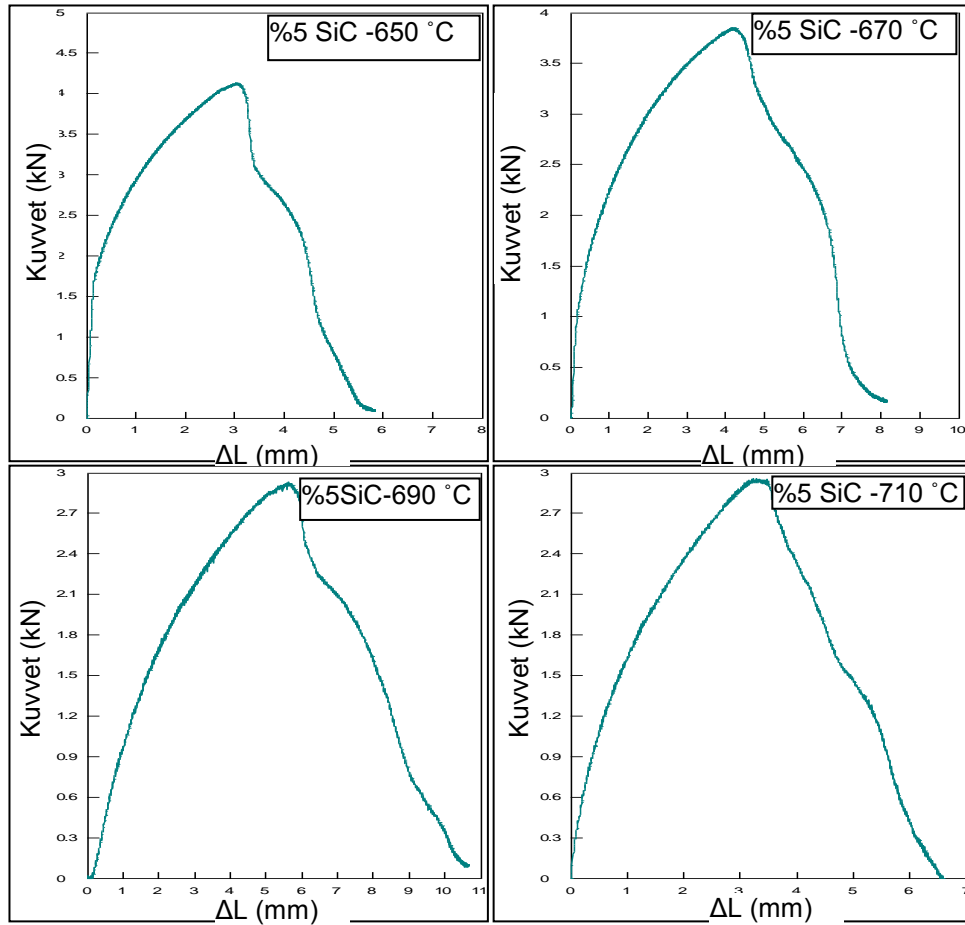


Şekil 6.52. Al₂O₃ ilaveli ASK'lere ait Kuvvet- ΔL eğrisi.

SiC ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımları

%5 SiC ilave edilerek üretilen ASK'lerin üç nokta eğme dayanımına ait farklı temel özellikleri Şekil 6. 53'te gösterilmiştir. Üç nokta eğme deney sonuçları

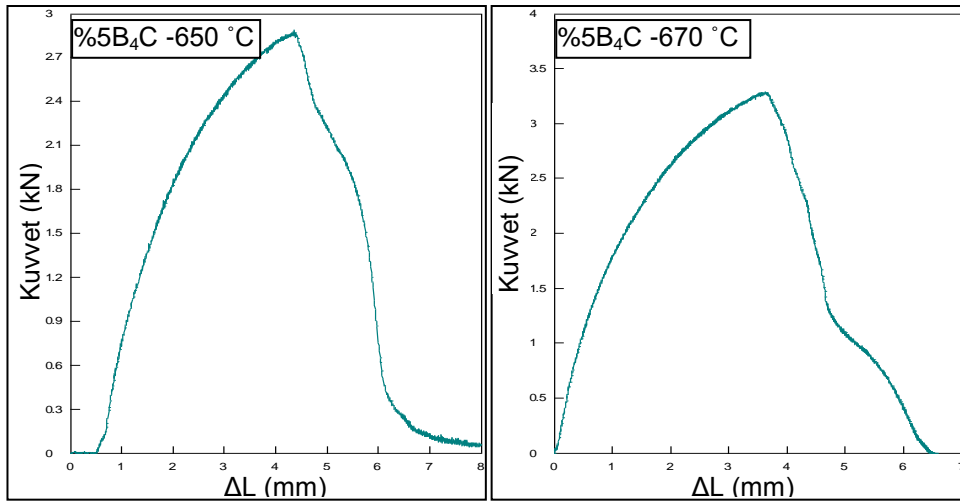
650 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama maksimum yükün 4 kN, 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde 3,5 kN, 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde 2,5 kN ve 710°C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise ortalama 3 kN olduğunu göstermiştir. Ayrıca 650, 670 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerde yük boşalması sonrasında toplam yer değiştirme değerleri yakın iken 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde toplam yer değiştirme değerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Grafiklerde maksimum yük değerine yakın lineer artışta meydana gelen sapmanın köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak azaldığı görülmektedir.



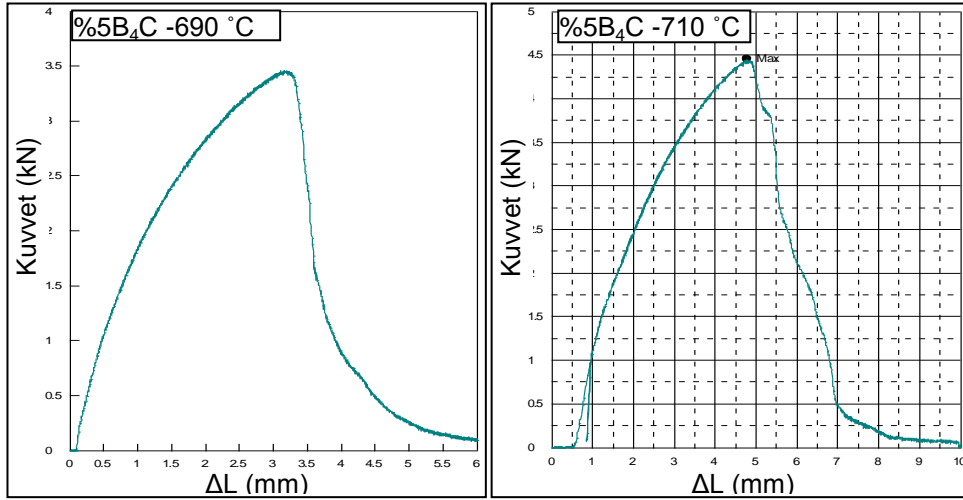
Şekil 6. 53. SiC ilaveli ASK'lere ait Kuvvet- ΔL eğrisi.

B₄C ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımları

650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen %5 B₄C ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımına ait grafikler Şekil 6. 54'te verilmiştir. 650°C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 3,2 kN, 670°C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 3,4 kN, 690°C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ortalama 2,8 kN, 710°C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise ortalama 3,7 kN maksimum yük değerleri elde edilmiştir. 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerde yaklaşık aynı toplam yer değiştirme değerlerinde maksimum yükler elde edilmiştir. Yük boşalması sonrasında meydana gelen toplam yer değiştirme değerlerinin aynı olduğu ve maksimum yük değerine yakın lineer artışta meydana gelen sapmaların benzer olduğu söylenebilir. 650, 670 ve 690 °C köpürtme sıcaklıklarında üretilen ASK'lerde maksimum yük değerine ulaşıldıktan sonra yükte meydana gelen azalmanın ani olduğu ve yükteki azalma değerinin daha fazla olduğu görülmüştür. 710 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise yük aşamalı olarak azalmıştır.



Şekil 6.54. B₄C ilaveli ASK'lere ait Kuvvet- ΔL eğrisi.



Şekil 6.54. (Devam) B₄C ilaveli ASK'lere ait Kuvvet- ΔL eğrisi.

6.8.2. Partikül ilavesinin ASK'lerin basma dayanımlarının etkilerinin karşılaştırılması

Partikül ilavesinin ASK'lerin basma dayanımlarına etkilerini belirlemek amacıyla AlSi7Mg0.6, AlSi7Mg0,6+%5 SiC, AlSi7Mg0,6+%5 Al₂O₃ ve AlSi7Mg0,6+%5 B₄C karışımından oluşan tozlar sıkıştırma, ekstrüzyon ve haddeleme işleminden sonra köpürtmeye hazır numuneler hâline getirilmiştir. Bu numuneler kalıp içerisinde köpürtülerek ASTM C 365 standardına göre basma numuneleri hâline getirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler ASTM C 365 standardında belirtilen ve Eşitlik 6. 5' de verilen formülde yerlerine konularak basma dayanımları hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6. 5)$$

Burada;

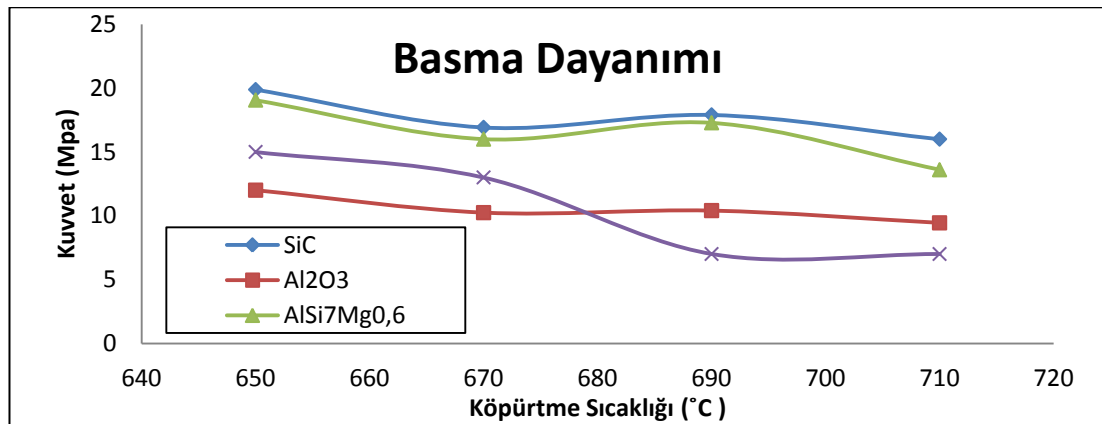
σ = Merkezdeki köpüğün basma dayanımı (MPa)

P = Kırılma kuvveti (N) ve

A = Kesit alanı (mm²) olarak ifade edilmektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerler kullanılarak elde edilen grafik Şekil 6. 55'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde 650 °C köpürtme

sıcaklığında AlSi7Mg0.6 ve %5 SiC ilaveli ASK'lerin basma dayanımlarının yaklaşık aynı değerde ve %5 Al₂O₃ ile %5 B₄C ilaveli ASK'lerin basma dayanımı değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Benzer durum 670 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde de görülmektedir. 650 ve 670 °C köpürtme sıcaklıklarında %5 B₄C ilaveli ASK'lerin basma dayanımının %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımlarından yüksek olduğu görülmüştür. Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin yoğunluk değerlerinin düşük olmasının basma dayanımı değerlerinin de düşük olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Zira Banhart ve Baumister [28] farklı yoğunluğa sahip Al köpüklerin basma deneyleri sonucunda artan yoğunluk değerlerini basma dayanımlarını artırdığını belirtmişlerdir ve basma dayanımının yoğunluğa bağlı olduğunu sonucuna varmışlardır. 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde AlSi7Mg0,6 ve %5 SiC ilaveli ASK'lerin basma dayanımlarının yaklaşık aynı değerdedir. Bu sıcaklıkta %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımının kısmen arttığı ve %5 B₄C ilaveli ASK'lerin basma dayanımı değerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Köpürtme sıcaklığının 710 °C' ye çıkartılması %5 SiC ilaveli ASK'lerin basma dayanımının AlSi7Mg0,6 ilaveli ASK'lerin basma dayanımlarından yüksek olmuştur. AlSi7Mg0,6 karışımından elde edilen ASK'lerin basma dayanımının %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımından fazla olmasına ve %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımının da %5 B₄C ilaveki ASK'lerin basma dayanımından fazla olmasına neden olmuştur.



Şekil 6. 55. Partikül ilaveli ASK'lere ait basma dayanımı grafikleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %5 SiC ve %5 Al₂O₃ ilavesinin AlSi7Mg0,6 esaslı ASK'lerin basma dayanımlarını artırdığı sonucuna varılabilir. Her ne kadar %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma dayanımı düşük olduğu görülse de bunun nedeninin %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin yoğunluk değerlerinin düşük olmasının basma dayanımlarının da düşük olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma sonucunda köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak ASK'lerin basma dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Artan köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözenekliliğin ve gözenek boyutunun artmasının basma dayanımlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Zira metalik köpüklerin mekanik özelliklerinin sadece alaşımın kompozisyonuna bağlı olmadığı, aynı zamanda yoğunluk, gözenek yapıları ve gözenek boyutlarına da bağlı olduğu bilinmektedir. Köpürtme sıcaklığının artmasına bağlı olarak mekanik özelliklerin azalmasının bir diğer sebebinin de, Bölüm 6.6.3'te bahsedilen artan köpürtme sıcaklığına bağlı olarak gözenek duvarlarında meydana gelen girinti ve çıkıntıların artmasına bağlanabilir. Bu girinti ve çıkıntıların uygulanan yükler altında çentik etkisi yaptığı ve dayanımı düşürdüğünü düşünülmektedir.

Şekil 6. 52'de köpürtme sıcaklığı ve parçacık türüne bağlı olarak sandviç yapının düzlemsel modüllerini gösteren grafik verilmektedir. Bu grafik basma dayanımı deneyinden elde edilen değerlerin ASTM C 365 standardında verilen (Eş. 6. 6) formülde yerlerine konularak hesaplanmasıyla elde edilmiştir.

$$E = \frac{St}{A} \quad (6. 6)$$

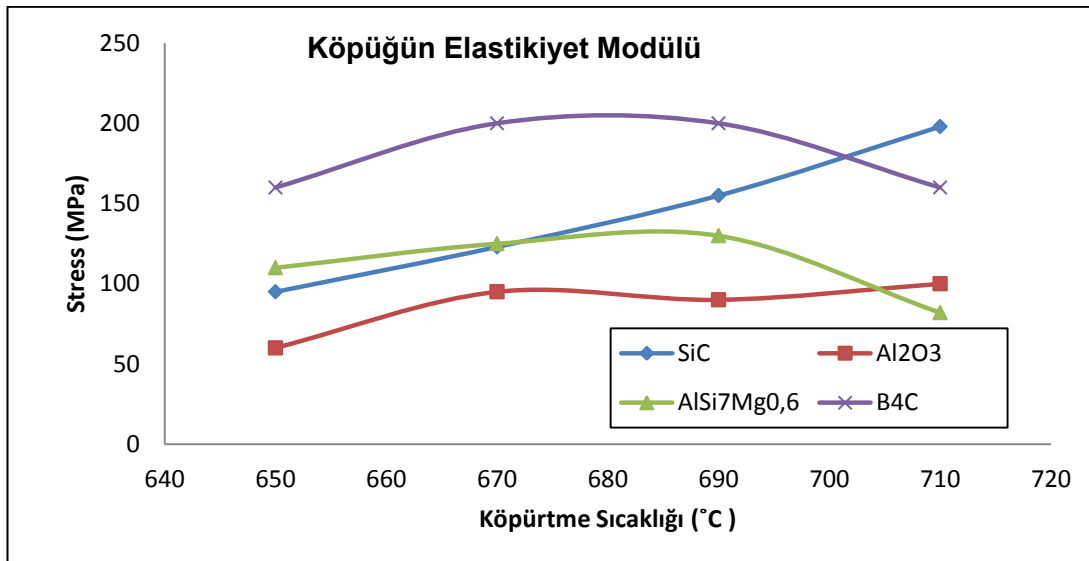
burada:

E = Sandviç yapıdaki köpüğün basma modülü, (MPa);

S = Kuvvet-şekil değişim eğrisinde ilk bölümün lineer eğimi (N/mm);

t = Sandviç yapıdaki köpüğün kalınlığı, (mm).

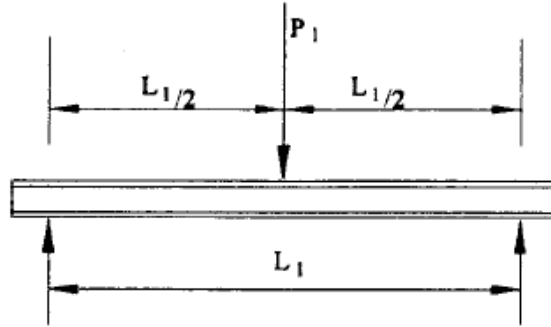
Şekil 6. 56'da verilen grafik incelendiğinde 650, 670 ve 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen % 5 B₄C ilaveli ASK'lerin basma modülü değerinin AlSi7Mg0,6 karışımından üretilen, %5 SiC ilaveli ve %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma modülü değerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun %5 B₄C ilaveli ASK'lerin yoğunluk değerinin yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir. 710 °C köpürtme sıcaklığında ise %5 B₄C ilaveli ASK'lerin ve AlSi7Mg0,6 karışımından elde edilen ASK'lerin basma modülü değerleri azalmışken %5 Al₂O₃ ilaveli ve %5 SiC ilaveli ASK'lerin basma modülü değerleri artmıştır. Köpürtme sıcaklığının artması ASK'lerin basma modülü değerinin artmasına neden olmuştur. Yapılan çalışmada %5 B₄C ilaveli ve %5 SiC ilaveli ASK'lerin basma modülü değerlerinin AlSi7Mg0,6 karışımından elde edilen ASK'lerin basma modülü değerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin basma modülü değerlerinin ise AlSi7Mg0,6 karışımından elde edilen ASK'lerin basma modülü değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin yoğunluk değerlerinin düşük olmasının, basma modüllerinin düşük olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Yapılan çalışma sonucunda, AlSi7Mg0,6 karışımına partikül ilavesinin ASK'lerde basma modülü değerlerinin artmasına neden olduğu söylenebilir.



Şekil 6. 56. Partikül ilaveli ASK'lere ait elastikiyet grafikleri

6.8.3. Partikül ilavesinin ASK'lerin üç nokta eğme dayanımlarının etkilerinin karşılaştırılması

Partikül ilavesinin ASK'lerin üç nokta eğme dayanımlarına etkilerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler sonucunda elde edilen değerler ASTM C 393 standardında belirtilen ve Eşitlik 6. 7'de verilen formülde yerlerine konularak gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b}$$

(6. 7)

Burada;

σ = Yüzey eğme dayanımı (MPa)

P = Kuvvet (N)

d = Sandviç kalınlığı (mm)

c = Köpük kalınlığı (mm)

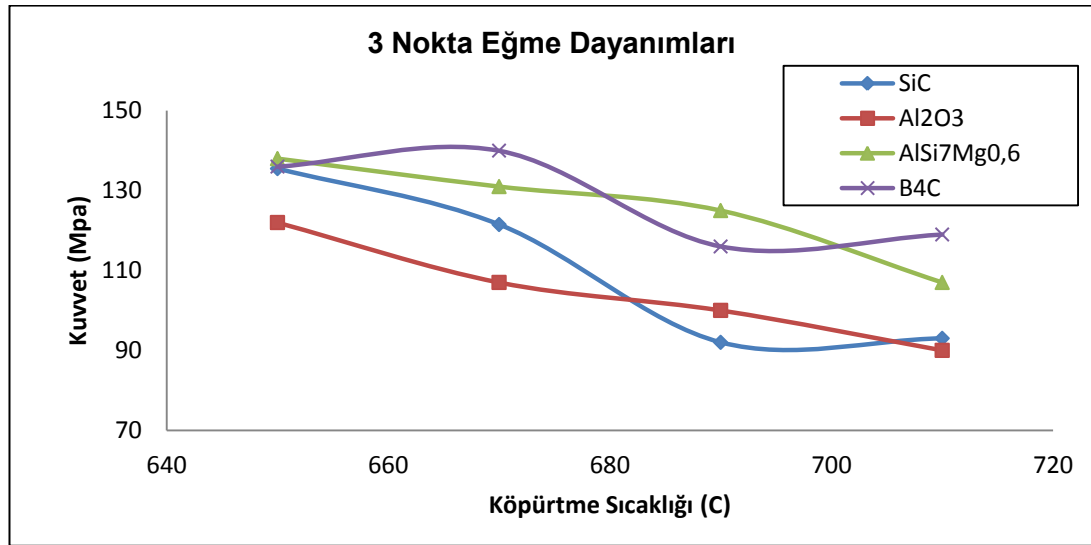
b = Sandviç genişliği (mm)

t = Yüzey levha kalınlığı (mm) ve

L = Destekler arası uzunluk (mm) olarak ifade edilmektedir.

Üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen değerler Eşitlik 6. 7' de verilen formülde yerine konularak elde edilen grafik Şekil 6. 57'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, 650 °C köpürtme sıcaklığında %5 B₄C, %5 SiC ilaveli ve AlSi7Mg0,6 karışımından oluşan ASK'lerin üç nokta eğme dayanımlarının yakın değerlerde ve %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımından yüksek olduğu görülmektedir. 670 °C köpürtme sıcaklığında en yüksek üç nokta eğme dayanımı değeri %5 B₄C ilaveli ASK'lerde elde edilirken en düşük üç nokta eğme dayanımı değeri %5 Al₂O₃ ilaveli ASK'lerde elde

edilmiştir. 690 °C köpürtme sıcaklığında üretilen ASK'lerde ise en yüksek üç nokta eğme dayanımı değeri $AlSi7Mg0.6$ ' de görülmüşken en düşük üç nokta eğme dayanımı değeri %5 Al_2O_3 ilaveli ASK'lerde görüldüğü söylenebilir. 710 °C köpürtme sıcaklığı ise %5 B_4C ilaveli ve %5 SiC ilaveli ASK'lerin üç nokta eğme dayanımlarının kısmen artmaya, $AlSi7Mg0.6$ ASK'lerin ve %5 Al_2O_3 ASK'lerin üç nokta eğme dayanımlarında azalmaya neden olmuştur. Yapılan çalışma sonucunda, $AlSi7Mg0.6$ karışımına %5 B_4C ilavesinin üç nokta eğme dayanımını kısmen artırdığı, % 5 SiC ve %5 Al_2O_3 ilavesinin ise üç nokta eğme dayanımının azalmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca köpürtme sıcaklığının artmasıyla üç nokta eğme dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, artan köpürtme sıcaklığının gözenek boyutu ve gözenekliliği artırması dolayısıyla üç nokta eğme dayanımını azaltması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. 57. Partikül ilaveli ASK'lere ait üç nokta eğme dayanımı grafikleri

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

TM yöntemi ile Al esaslı parçacık takviyeli sandviç metalik köpük üretimi, balistik ve mekanik özelliklerinin araştırılması üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Köpürtme sıcaklığı ve köpürtme süresi artmasıyla viskozitenin azalması nedeniyle gözenek boyutları ve gözeneklilik oranları artmış, yoğunluk değerleri azalmıştır.
2. 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında sırasıyla 14, 12, 10 ve 8 dakika köpürtme sürelerinde sandviç yapı elde edilmiştir. Bu sürelerde elde edilen yoğunluk, gözeneklilik ve lineer uzama oranları yakın değerlerdedir. Artan köpürtme süresi sandviç yapının bozulmasına neden olmuştur.
3. Lineer uzama oranlarının ise artan köpürtme süresine bağlı olarak arttığı ve belli bir süre sonra azaldığı görülmüştür.
4. Levha kalınlığındaki artışın köpürtme özellikleri üzerine kısmi etkileri olduğu görülmüştür.
5. 650, 670, 690 ve 710 °C köpürtme sıcaklıklarında partikül türünün gözenek yapısındaki küreselleşmeye (şekil faktörüne) kısmi etkileri olmuştur.
6. 650 °C'de üretilen ASK'lerin basma dayanımları 20 MPa civarındayken 710 °C köpürtme sıcaklıklarında 12 MPa civarındadır.
7. 650 °C'de üretilen ASK'lerin üç nokta eğme dayanımları 5,5 MPa civarındayken 710 °C köpürtme sıcaklıklarında 3,5 MPa civarındadır.
8. %5 SiC ve %5 Al₂O₃ ilavesi AlSi7Mg0.6 esaslı ASK'lerin basma dayanımlarını arttırmıştır.
9. AlSi7Mg0,6 karışımına partikül ilavesinin ASK'lerde basma modülü değerlerinin artmasına neden olmuştur.

10. AlSi7Mg0.6 karışımına %5 B₄C ilavesinin üç nokta eğme dayanımının kısmen artmasına, % 5 SiC ve %5 Al₂O₃ ilavesinin ise üç nokta eğme dayanımının azalmasına neden olduğu görülmüştür.
11. Köpürtme sıcaklığının artmasıyla ASK'lerin üç nokta eğme dayanımlarının ve basma dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.
12. ASK'lerin önde bulunduğu tasarımlarda, ASK'lerde zımba şeklinde hasar meydana gelirken, ASK'lerin arkada bulunduğu tasarımlarda ASK'lerde taç yaprağı şeklinde hasar meydana gelmiştir.
13. Partikül ilavesi, ASK'nin önde olduğu tasarımlarda kopan parçacık çapını kısmen azaltırken ASK'nin arkada olduğu tasarımlarda kopan parçacık çapının kısmen artmıştır.
14. Partikül ilaveli ASK'lerin arkada olduğu tasarımlarda, kopan parçacık boyutunun artmasından dolayı zırh sisteminin dayanımının arttığı sonucu çıkarılabilir.

7.2. Öneriler

1. 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda köpürtme işlemi yapılabilir.
2. Farklı boyutlarda ASK'ler üretilerek köpürtme süreleri optimize edilebilir.
3. Yapılan çalışmada lineer uzamanın belirlenmesi için serbest köpürtme ortamı kullanılmıştır. Köpürtme işleminin kalıp içerisinde yapılması lineer uzama oranlarını daha net bir şekilde ortaya koyacaktır.
4. ASK üretiminde levha olarak farklı alüminyum alaşımları kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degischer, H.P., "Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam", **Acta Mechanica**, 125: 95-103, (1997).
2. Hanssen, A.G., Langseth, M., Hopperstad, O.S., "Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler", **Int. J. of Impact Eng.**, 24 (5): 475-507, (2000).
3. Elbir, S., Yılmaz, S., Güden, M., "Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metodları ve mekanik özellikleri", **TMMOB Metalurji Dergisi**, 23 (120): 35-42, (1999).
4. Davies, G.J., Zhan, S., "Review metallic foams, their production, properties and applications", **J. Mat. Sci.**, 18: 1899-1911, (1983).
5. Yang, C.C., Nakae, H., "Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam" **Journal of Alloys and Compounds**, 313: 188-191, (2000).
6. Davies, G.J., Zhen S., "Metallic Foams: Their production, properties and applications" **J. Material Sci.**, 18: 1899-1911, (1983).
7. Banhart, J., Weaire, D., "On the road again - metal foams find favor" **Physics Today**, 55: 37-42, (2002).
8. Davies, G.J., Zhen, S., "Metallic Foams: Their production, properties and applications" **J. Material Sci.**, 18: 1899-1911, (1983).
9. Stöbener, K., Lehmkus, D., Avallé, M., Peroni, L., Buse, M., "Aluminum foampolymerhybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing", **International Journal of Solids and Structures**, 45: 5627-5641 (2008).
10. Banhart, J., "Manufacturing Routes for Metallic Foams", **Journals of Materials**, 52(12): 22-27 (2001).
11. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams" **Prog. Mat. Sc.**, 46: 559, (2001).
12. Drolet, J.P., "Metallic Foams" **International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology**, 13: 35-44, (1977).
13. Kulkarni, S.B., Ramakrishnan, P., "Porous and cellular materials for structural applications" **Int.J. Powder Met.**, 9: 41-45 (1973).

14. Banhart, J., "Aluminium Foams: On the Road to Real Applications", *Mrs Bulletin*, 290-295 (2003).
15. Amjad, S., "Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams", Yüksek Lisans, *University of Cambridge*, 2-9 (2001).
16. Hintz, C., Wagner, I., Sahm, P.R., Stojanov, P., "Investment cast near net shape components based on cellular metal materials", *1st International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures*, Bremen, 153-159 (1999).
17. Banhart, J., "Properties and applications for cast aluminium sponges", *Adv. Eng. Mat.*, 2: 168 (2000).
18. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metallic foams", *Progress in Materials Science*, 46: 559-632, (2001).
19. Wood, J.T., "Production and applications of continuously cast, foamed aluminum", *Fraunhofer USA metal foam symposium*, Delaware, 31-35 (1997).
20. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., Kitahara, A., "ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications", *Adv. Eng. Mat.*, 2(4): 179-183 (2000).
21. Babcsan, N., Banhart, J., Leitmelet, D., "Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming", *International Conference Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia, 5-15 (2005).
22. Shapovalov, V., "Porous and Cellular Materials for Structural Applications" *Phys. Metals Metallogr.*, 76: 335–337 (1993).
23. Gergely, V., Clyne, B., "The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors", *Advanced Engineering Materials*, (4): 175-178 (2000).
24. Prakash, G.O., Sang, H., Embury, J. D., "Structure and properties of Al-Si foam", *Mater. Sci. Eng.*, A 199: 195-203, (1995).
25. Sang, B., Duck, Y.K., Ahn, K., Park, S.H., "A Study on the Foaming Properties of Porous Aluminum by Used Aluminum Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29: 2497-2503, (1998).
26. Zhao, Y.Y., Sun, D.X., "A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams", *Scripta Mat.*, 44: 105-110 (2001).

27. Ashby, M.F., Evans, A., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., "Making Metal Foams", Metal Foams, **Butterworth Heinemann**, USA, 6-11, (2000).
28. Banhart, J., Baumeister, J., "Deformation characteristics of metal foams" **J.Mater.Sci.**, 33: 1431-1440, (1998).
29. Shapolov, V., "Porous and cellular materials for structural applications", **Mater. Sci. Forum**, 215/216: 485-486, (1996).
30. Gibson, L.J., Simone, A.E., "Aluminium foam: structure and properties", Ultralight Metal structures, **Harvard University**, 46: 3109-3123, (1998).
31. Harte, A.M., Fleck, N.A., Ashby, M.F., "Sandwich panel design using aluminium foam", **Adv. Eng. Mat.**, 2 (4): 175-178, (2000).
32. Yu, C., Eifert, H.H., Banhart, j., Baumeister, j., "Metal foaming by powder metallurgy method : production, properties and application" **Mat. Res. Innovat**, 2: 181-188, (1998).
33. Gibson, L.J., Ashby, M.F., "Cellular Solids-Structure & Properties" **Pergamon Press**, Germany, 120-167, (1988).
34. Sigumura, Y., Meyer, J., He, M.Y., Smith, H.B., Grenstedt, J., Evans, A.G., "On the mechanical performance of closed cell Al alloy foams", **Acta Mat.**, 12: 5245-5259, (1997).
35. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", **Progress in Materials Science**, 46 (6): 557-632 (2001).
36. Stöbener, K., Lehmuß, D., Avallé, M., Peroni, L., Buse, M., "Aluminum foampolymerhybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing", **International Journal of Solids and Structures**, 45: 5627-5641 (2008).
37. Bazle, A.G., Travis, A.B., Bruce K.F., Chin-jye, Y., Dennis, C.T., Harald, H.E., John, W.G., "Aluminium foam integral armor: a new dimension in armor design" **Composite Structures**, 52: 381-395 (2001).
38. Wilkins, ML, "Mechanics of penetration and perforation" **Int. J. Eng. Sci.**, 16: 793-807 (1978).
39. Cortes, R., Navarro, C., Martinez, MA., Rodriguez, J., Sanchez-Galvez, V., " Numerical modeling of normal impact on ceramic composite armours" **Int. J. Imp. Eng.**, 12(4): 639-651, (1992).

40. Navarro, C., Martinez, MA., Cortes, R., Rodriguez, J., Sanchez-Galvez V., " Same observations on the normal impact on ceramic faced armours backed by composite plates" *Int. J. Imp. Eng.*,13(1): 145-456 (1993).
41. Shockey, DA., Marchand, AH., Skaggs, SR., Cort, GE., Burkett, MW., Parker, R., " Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods." *Int. J. Imp. Eng.*,9: 263-275 (1990).
42. Lundberk, P., Renstrom, R., Lundberk, B., " Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration" *Int. J. Imp. Eng.*, 24: 259-275 (2000).
43. Kuang, K.S.C., Zhang, L., Cantwell, W.J., Bennion, I., "Process monitoring of aluminum-foam sandwich structures based on thermoplastic fibre-metal laminates using fibre Bragg gratings" *Composites Science and Technology*, 65: 669-676 (2005).
44. Baumeister, J., Meyer-Piening, H.R. and Zenkert, D., "Sandwich Construction 5", *EMAS Publishing*, Solihull UK, 339-340 (2000).
45. Seeliger, W. in Banhart, J., Ashby, M.F. and Fleck, N.A., "Metal Foams and Porous Metal Structures", *1st Int. Conf.*, Berlin, MIT-Verlag, Bremen, 29. (1999).
46. Seeliger, W. in Banhart, J., Ashby, M.F. and Fleck, N.A., "Cellular Metals and Metal Foaming Technology", *2nd Int. Conf.*, Berlin, MIT-Verlag, Bremen, 5. (2001).
47. Kumar, P.S., Ramachandra, S, Ramamurthy, K., Ramamurthy, U., "Effect of displacement-rate on the indentation behavior of an aluminum foam" *Mat Sci and Eng A*, 347: 330 (2003).
48. Simone, A.E., Gibson, L.J., "Aluminum foams produced by liquid-state processes" *Acta Mat.*, 46: 3109-3123 (1998).
49. Zenkert, D., Shipsha, A., Persson, K., "Static indentation and unloading response of sandwich beams" *Composites Part B*, 35: 511-522 (2004).
50. Olurin, O.B., Fleck, N.A., Ashby, M.F. "Indentation resistance of an aluminium foam" *Scrip Mat.*, 43: 983-989 (2000).
51. Andrews, E.W., Gioux, G., Onck, P., Gibson, L.J., "Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results" *Int. Jour. Mech Sci* 43: 701-713 (2001).

52. Ramamurthy, U., Kumaran, M.C., "Mechanical property extraction through conical indentation of a closed-cell aluminum foam", ***Acta Mat.***, 52: 181-189, (2004).
53. Banhart, J., Seeliger, H.W., "Aluminium foamsandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications" ***Advanced Engineering Materials***, 10: 793-801 (2008).
54. Seeliger, H.W., "Manufacture of aluminium sandwich foam components", ***Adv. Eng. Mat.***,4: 753-758 (2002)
55. Banhart, J., Stanzick, H., Helfen, L., Baumbach, T. and Nijhof, K., "Real-time X-ray Investigation of Aluminum Foam Sandwich Production" ***Advanced Engineering Materials***, 3: 407-411 (2001).
56. Mohan, K., Yip, T.H., Sridhar, I., Seow H. P., "Effect of face sheet material on the indentation response of metallic foams" ***J Mater Sci.***, 42: 3714–3723 (2007).
57. Zhao, H., Elnasri, I., Girard, Y., "Perforation of aluminium foam core sandwich panels under impact loading—An experimental study" ***International Journal of Impact Engineering***, 34: 1246–1257 (2007).
58. Styles, M., Compston, P., Kalyanasundaram, S., "The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures" ***Composite Structures***, 80: 532–538 (2007).
59. Kesler, O., Gibson, L.J., "Size effects in metallic foam core sandwich beams" ***Materials Science and Engineering A***, 326: 228–234 (2002).
60. Crupi, V., Montanini, R., "Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending", ***International Journal of Impact Engineering***, 34: 509–521 (2007).
61. Yu, J.L., Wang, X., Wei, Z.G., Wang, E.H., "Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminum-foam core" ***International Journal of Impact Engineering***, 28: 331–347 (2003).
62. Kapil, M., Tick-Hon, Y., Idapalapati, S., Seow, P., "Effect of face sheet material on the indentation response of metallic foams" ***J Mater Sci.***, 42: 3714–3723 (2007).
63. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams" ***Prog Mat Sc.***, 46: 559-562 (2001).

64. Banhart, J., Baumister, J., Methods for manufacturing foamable meal bodies, **US Patent**, 5151246 (1997)
65. Neugebauer, R., Lies, C., Hohlfeld, J., Hipke T., "Adhesion in sandwiches with aluminum foam core" **Prod. Eng. Res. Devel.**, 1: 271–278 (2007).
66. Banhart J., "Aluminium foams for lighter vehicles" **Int. J. Vehicle Design**, 37: 1-5 (2005).
67. Seeliger, H.W., Vecchionacci, C., Alwes, D., Dittrich J., "Aluminium foam sandwich structures for space applications" **Acta Astronautica**, 61: 326–330 (2007).
68. John, R., "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook Eleventh edition" **Brown**, Oxford, 49 (1995).
69. Sirong, Y., Jiaan, L., Yanru, L., Yaohui L., "Compressive behavior and damping property of ZA22/SiCp composite foams", **Materials Science and Engineering A**, 457: 325–328 (2007).
70. Babcsan, N., Garcia Moreno, F., Banhart, J., " Metal Foams-High Temperature Colloids", **Colloids and Surface**, 309: 254-263 (2007).
71. Asavavisithchai, S., Kennedy A.R., "The effect of Mg addition on the stability of Al-Al₂O₃ foams made by a powder metallurgy route", **Scripta Materialia**, 54: 1331-1334 (2006).
72. Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., " Foamability and compressive properties of AlSi7-3 vol.% SiC-0.5 wt.%TiH₂ powder compact", **Materials Letter**, 112-116 (2007).
73. Garcia M.F., Banhart, J. " Foaming of blowing agent-free aluminium powder compact", **Colloids and Surfaces**, 309: 264-269 (2007).
74. Battezzati, L., Greer A.L., "The viscosity of liquid metals and alloys" **Acta Materialia**, 37: 1791-1802 (1989).
75. Andrade, E.N., "Theory of viscosity of liquids", **Phil. Mag.**, 17, 698-702 (1934).
76. Hirai, M., "Structural changes of jack bean urease induced by addition of surfactants studied with synchrotron radiation small-angle X-ray cattering" **European Journal of Biochemistry**, 215: 55-61 (1993).
77. John, R., "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook Eleventh edition" **Brown**, Oxford, 142 (1995).

78. Wadley, H.N.G., "Cellular Metals Manufacturing", **Advanced Engineering Materials**, 4: 726-733 (2004).
79. Uzun, A., Çinici, H., Türker, M., "Effect of deformation rate and foaming duration on the properties of spherical aluminum foam produced by powder metallurgy", **5th International Powder Metallurgy Conference**, Ankara, 801- 807 (2008).
80. Duarte, I., Banhart, J., "A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure", **Acta mater.**, 48: 2349-2362 (2000).
81. Song, Z. L., Ma, L., Wu, Z. J., He, D. P., "Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process" **Journal of Materials Science**, 35: 15-20 (2000).
82. Saravanan, R.A., Molina, J.M., Narciso, J., -Cordovilla, C., Louis, E., "Effects of nitrogen on the surface tension of pure aluminium at high temperatures", **Scripta Materialia**, 44: 965-970 (2001).
83. Mueller, W. M., Blackledge, J.P., Libowitz, G. G., "Metal Hydrides", **U.S. Atomic Energy Commission**, Academic pres, 128-150 (1968).
84. Sarıkaya, Y., "Fizikokimya", **Gazi Büro Kitapevi**, Ankara, 189-225 (1993).
85. Pamuk, F., "Genel Kimya", **Gazi Büro Kitapevi**, Ankara, 68-128 (1988).
86. Helwig, H. M. and Banhart, J., "Heat Distribution During Metal Foaming", **International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology**, Berlin, Germany, 53 (2003).
87. Duarte, I. and J. Banhart, "A Study of Aluminium Foam Formation - Kinetics and Microstructure", **Acta Materialia**, 48: 2349-2362, (2000).
88. Kennedy, A. R., "Effect of Foaming Configuration on Expansion", **Journal of Materials Science**, 39: 1143-1145, (2004).
89. Çinici H., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Al Esaslı Metalik Köpük Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2004).
90. Uzun A. "TM Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Küresel Şekilli Metalik Köpük Üretimi Ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2009)

91. Cox, S.J., Bradley, G. and Weaire, D. "Modelling metallic foam formation In *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*", **MIT-Verlag**, Bremen, 99-104. (2001).
92. Simancik, F., Behulova, K., Bors, L., "Proceedings of the International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology", **MIT**, Bremen, Germany, 89 (2001).
93. Mcnaught A D, Wilkinson A., "IUPAC Compendium of Chemical Terminology Volume: 2nd", **IUPAC**, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 98-121 (1997).
94. Elbir S."Preparation and Characterization of Aluminum Composite Closed-Cell Foams", Yük. Lis. Tezi, **İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü**, İzmir (2001).
95. Esmaeelzadeh, S., Simchi, A., Lehmus, D., "Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam" **Materials Science and Engineering A**, 424: 290–299 (2006).
96. Asavavisithchai, S., Kennedy A.R., "The effect of Mg addition on the stability of Al-Al₂O₃ foams made by a powder metallurgy route", **Scripta Materialia**, 54: 1331-1334 (2006).
97. Turker, M., "Production of Ceramics Reinforced Al Foams by Powder Metallurgy Techniques", **Materials Science Forum**, 672: 39-46(2011).
98. Sergei, A., Fomin, A., Wilchinsky, V., "Shape-factor effect on melting in an elliptic capsule", **International Journal of Heat and Mass transfer**, 45: 3045-3054 (2002).
99. Budiman, H., Omar, M.Z., Jalar, A., Jaharah A.G. "Effect of Water Cooling on the Production of Al-Si Thixotropic Feedstock by Cooling Slope Casting", **European Journal of Scientific Research**, 32(2): 158-166 (2009).
100. Özer, M., "Yarı-katı döküm tekniği ile üretilen Al-si alaşımlarında yapı-özellik ilişkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi**, Ankara (2010).
101. Zhang, B., Kim, T., Lu, T.J., "Analytical solution for solidification of close-celled metal foams" **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 52: 133–141 (2009).
102. Stefanescu D.M. "ASM Metals Handbooks 15 second printing" **ASM international**, 989 (1992).

103. Wübben, T., Stanzick, H., Banhart, J., Odenbach, S., *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 128 (2002).
104. Haesche M., Weise J., Garcia-Moreno f., Banhart, J., “Influence of particle additions on the foaming behaviour of AlSi11/TiH₂ composites made by semi-solid processing” *Materials Science and Engineering A*, 480: 283–288 (2008).
105. Deqing, W., Ziyuan, S., “Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam” *Materials Science and Engineering A*, 361: 45-49 (2003).
106. Markaki, A.E., Clyne, T.W., “The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams” *Acta Materialia*, 49: 167-1686 (2001).
107. Baumister, J., Stöneber, K., Lehmhus, D., “ Composites based on metallic foams: phenomenology, production, properties and principles” *International Conference Advanced metallic materials*, Slovakia, 281-286 (2003).
108. Markaki, A.E., Clyne, T.W., “Energy absorption during flexural failure of layered metal foam / ceramic composites”, *Twelfth International Conference on Composite Materials*, Woodhead, 587-597(1999).
109. Surace, R., Filippis, L.A., Boghetich, G., “Experimental analysis of the effect of control factors on aluminium foam produced by powder metallurgy”, *Proc. Estonian Sci. Eng.*, 13, 156-167 (2007).
110. Crupi, V., Montanini, R., “Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending”, *International Journal of Impact Engineering* 34, 509–521(2007).
111. Simancik, F., Kovacik, J., Jerz, J., “ Reinforced aluminium foams”, *International Conference Advanced Metallic Materials*, Slovakia, 154-159 (2003).
112. Peroni L. “ The mechanical behaviour of aluminium foam structures in deifferent loading conditions” *International Journal of Impact Engineering*, 1-10, (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇİNİCİ, Hanifi
 Uyuşu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.08.1974 Erzurum
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 202 87 69
 Faks : 0 (312) 212 00 59
 e-mail : hcinici@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Metal Eğt. Böl.	2004
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Metal Eğt. Böl.	2000
Lise	Erzurum Atatürk Teknik Lisesi	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2002-2009	Gazi Üniversitesi	Arş. Gör.
2009-Devam Ediyor	Gazi Üniversitesi	Öğr. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Okuyucu, H., Cinici, H., Konak, T., "Coating of nano sized ionically conductive Sr and Ca doped LaMnO₃ films by sol-gel route" Ceramics International, in pres, (2012).

2. **Cinici, H.**, Karacif, K., Kafkas, F., Citak, R. "Effect of electrolytic nickel coating on fatigue life of iron based P/M parts", **Kovove Materialy-Metallic Materials**, 49, 355-359 (2011).
3. Turgut, Y., **Cinici, H.**, Şahin, İ., Findik, T., "Study Of Cutting Force And Surface Roughness In Milling Of Al/Sic Metal Matrix Composites" **Scientific Research And Essays** 6 (2), 2056-2062, (2011).
4. Gökmen, U., Uzun, A., **Çinici, H.**, Özçatalbaş, Y., Türker, M., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al ve Alumix231 Köpüklerin Yapı ve Morfolojisine Köpürtücü Maddenin Etkileri", **Materials Science Forum**, 672, 297-302, (2011).
5. **ÇİNİCİ, H.**, TÜRKER, M., "Effect Of Foaming Duration And Temperature On The Foamability Behaviour Of Alsi7mg0.6 Sandwich" **Toz Metalurjisi Dünya Kongresi**, Floransa/İtalya, (2010).
6. UZUN, A., **ÇİNİCİ, H.**, KARAKOÇ H., ve TÜRKER, M., "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Köpürebilir Preform Malzemelerin Tıg Kaynağı İle Birleştirilmesi Ve Köpürebilirliğinin Araştırılması" **6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi**, Ankara, 19-23 (2011).
7. KARAMAN, Y., **ÇİNİCİ, H.**, ÇALIN, R., "Al+%5MgO Kompozit Malzemenin Özelliklerine Sinterleme Sıcaklığı Ve Sinterleme Süresinin Etkileri" **6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi**, Ankara, 445-448 (2011).
8. GÖKMEN, U., KARAKOÇ, H., **ÇİNİCİ, H.**, TÜRKER, M., "SiC İlavesinin Alumix 231 Esaslı Metalik Köpüğün Köpürme Özelliklerine Etkileri" **6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi**, Ankara, 787-792 (2011)
9. Yurtkuran, E., Sur, G., Gürün, H., **Çinici, H.**, Polat, R., " Alüminyum Esaslı T/M Malzemelerin Tel Elektro Erozyon Tezghasında İşlenebilirliklerinin Araştırılması", **6th International Advanced Technologies Symposium** Elazığ, (2011).
10. **ÇİNİCİ, H.**, TÜRKER, M., ATEŞ, H., BAHÇECİ, E., "Production of Sandwich Foam by Using Diffusion Welding Technique" **Toz Metalurjisi Dünya Kongresi**, Floransa/İtalya, (2010).
11. GÖKMEN, U., **ÇİNİCİ, H.**, ÖZÇATALBAŞ Y., and TURKER, M., "Al₂O₃ Takviyeli Metalik Köpüğe Köpürtme Sıcaklığı ve Köpürtücü Madde Miktarı Etkisinin Araştırılması", **5th International Powder Metallurgy Conference**, 822-828, Ankara, 8-12, (2008).

12. Mitca L., KURT, A., **ÇINICI, H.**, ORBAN, R.L., “Influence Of Al₂O₃ Content On The Density And Mechanical Properties Of Cu-Al₂O₃”, **5th International Powder Metallurgy Conference**,337-343, Ankara, (2008).
13. Türker, M., Cinici, H., Gokmen, U., Uzun, A., and Saritas, S., “Effects Of Foaming Agent And Boron Carbide Additions On The Foamability Behaviour Of Al Based Metallic Foam Produced By Powder Metallurgy”, **PM 2008**, Washington, 8-12 (2008).
14. UZUN, U., **ÇINICI, H.**, and TURKER, M., “Effect Of Deformation Rate And Foaming Duration On The Properties Of Spherical Aluminum Foam Produced By Powder Metallurgy”, **5th International Powder Metallurgy Conference**, Ankara, 801-807, (2008).
15. **Çinici, H.**, Türker, M., Günebakmaz, S., Gülen, H., “TM İle Üretilen Al Esaslı Metalik Köpükte Bor Oksit İlavesinin Köpürmeye Etkisinin Araştırılması”, **13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 9-11 (2006).
16. **Çinici, H.**, Türker, M., “TM yöntemi ile üretilen Al esaslı metalik köpüğe, deformasyon miktarının etkilerinin araştırılması”, **13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, 9-11, İstanbul (2006).
17. **Cinici, H.**, Türker, M., “Effect of foaming agent content on the foamability of Al based metallic foams by powder metallurgy”, **Third International Conference on Powder Metallurgy RoPM 2005**, Sinaia, Romania, 229-236 (2005).
18. **ÇINICI, H.**, TÜRKER, M., “TM yöntemi ile üretilen Al esaslı metalik köpüğe, köpürtme süresinin etkilerinin araştırılması”, **Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı**, Sakarya, 1001-1007 (2005).