



**AL MATRİSLİ SİC TAKVİYELİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNE ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ**

Oğuzhan BAYRAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğuzhan BAYRAM

23/01/2023

AL MATRİSLİ SİC TAKVİYELİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİNE ALÇAK BASINÇLI DÖKÜM
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuzhan BAYRAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Bu çalışmada; alüminyum matrisli gözenekli silisyum karbür (SiC) preform takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzeme fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme üretilmiştir. Malzemelerin yarısı geleneksel döküm ve diğer yarısı yerçekimi yönünde vakum destekli döküm yöntemleriyle kil bağlayıcılı yaş kum kalıplara 650 ve 700°C’de dökülerek üretilmiştir. Vakum destekli dökümde 600 mmHg vakum uygulanmıştır. Takviye bileşeni olarak gözenek yoğunluğu 10 ve 30 ppi olan gözenekli SiC preform, döküm parçanın yarısını oluşturacak ölçülerde kullanılmıştır. Ayrıca aynı üretim şartlarında takviyesiz alüminyum alaşımları da dökülerek FDM’ler ile mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Her bir malzeme 2 parça halinde üretilmiştir ve her 2 parçadan birine sabit şartlarda T6 yaşlandırma ısı işlemi uygulanmıştır. Yüksek döküm sıcaklığı ve vakum desteği, FDM’lerin üretilebilme özelliğini artırmıştır. Isıl işlem ve değişen üretim şartları, kompozitlerin matris-takviye ara yüzeyinde belirgin fark oluşturmamıştır. Takviyesiz alüminyum ve FDM matris alüminyumlarındaki sertlik, vakum desteği ve ısıl işlemin etkisiyle artmıştır ve en sert malzeme grubu takviyesiz alüminyumdur. Vakum desteği ve ısıl işlemin etkisiyle bütün malzemelerin eğme ve basma dayanımı artmıştır ancak takviyesiz alüminyumların dayanımları belirgin olarak daha yüksektir. Eğme ve basma testlerindeki % deformasyon oranları da takviyesiz alüminyumlarda daha yüksektir. FDM’lerde 30 ppi takviyeli malzemelerin eğme dayanım daha yüksektir fakat basma dayanım 10 ppi takviyeli malzemelerde daha yüksektir.

Bilim Kodu : 91512
Anahtar Kelimeler : FDM, kompozit, alüminyum, gözenekli SiC preform, vakum destekli döküm
Sayfa Adedi : 119
Danışman : Doç. Dr. Hasan HASIRCI

EFFECTS OF LOW PRESSURE CASTING PARAMETERS ON AL MATRIX SiC
REINFORCED FUNCTIONALLY GRADED COMPOSITE PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Oğuzhan BAYRAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this study, aluminum matrix porous silicon carbide (SiC) preform reinforced functional graded composite material was produced. Half of the materials were produced by conventional casting and the other half were produced by vacuum assisted casting methods in the direction of gravity by casting into clay-binded green sand molds at 650°C and 700°C. A vacuum of 600 mmHg was applied in vacuum assisted casting. A porous SiC preform with porous densities of 10 and 30 ppi was used as reinforcement ingredient, in sizes to form half of the cast part. In addition, non-reinforced aluminum alloys were cast under the same production conditions and their mechanical properties were compared with FDMs. Each material was produced in 2 parts and T6 aging heat treatment was applied to one of each 2 parts under constant conditions. High casting temperature and vacuum assistance have increased the production capability of FDMs. Heat treatment and changing production conditions weren't explicit difference in the matrix-reinforcement interface of the composites. Hardness in non-reinforced aluminum and FDM matrix aluminum have increased with the effect of vacuum assistance and heat treatment and the hardest material group is non-reinforced aluminum. With the effect of vacuum assistance and heat treatment, the bending and compression strength of all materials have increased, but the strength of non-reinforced aluminum is explicitly higher. The % deformation rates in bending and compression tests are also higher in non-reinforced aluminum. In FDMs, 30 ppi reinforced materials have higher bending strength, but compressive strength is higher in 10 ppi reinforced materials.

Science Code : 91512
Key Words : FGM, composite, aluminum, porous SiC preform, vacuum assisted casting
Page Number : 119
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hasan HASIRCI

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca değerli vaktini ayırıp desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hasan HASIRCI'ya çok teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalarım sırasında yardımcı olan Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı akademik, teknik ve idari personeline teşekkür ederim. Tez çalışmaları süreci ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili annem, babam, ablam ve abime minnet duyarım. Tez çalışmalarımda yardımcı olan arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim. Laboratuvarlardan faydalanma imkânı sağladıkları için Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Başkanlığı'na teşekkür ederim. Malzemelerin kesiminde yardımcı oldukları için Elektrik Üretim A.Ş. Kimya Laboratuvarı personeline teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1. Matris Bileşenine Göre Kompozit Malzemeler.....	6
2.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK).....	6
2.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler (SMK)	7
2.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK).....	8
2.1.4. Karbon - karbon kompozit malzemeler (KKK)	9
2.1.5. Cam matrisli kompozit malzemeler (CMK).....	10
2.2. Takviye Bileşeninin Şekline Göre Kompozit Malzemeler.....	10
2.2.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	10
2.2.2. Partikül takviyeli kompozit malzemeler	11
2.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler	12
3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER (MMK)	15
3.1. Alüminyum Alaşımları ve Alüminyum Matrisli Kompozitler	17
3.1.1. Alüminyum – silisyum - bakır (Al-Si-Cu) döküm alaşımları	19
3.1.2. Alüminyum – silisyum - magnezyum (Al-Si-Mg) döküm alaşımları	19

	Sayfa
3.1.3. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler.....	20
3.1.4. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler (Al-MMK).....	22
3.2. SiC (Silisyum Karbür) Takviye Elemanı.....	23
3.3. Gözenekli Seramikler (Köpük Şekilli Seramikler).....	24
3.3.1. Gözenekli seramiklerin üretim yöntemleri.....	24
3.3.2. Gözenekli SiC	28
3.4. MMK'in Üretim Yöntemleri	28
3.4.1. Katı hal üretim yöntemleri	28
3.4.2. Sıvı hal üretim yöntemleri.....	30
3.4.3. Diğer üretim yöntemleri	34
3.5. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları	36
3.5.1. Havacılık	36
3.5.2. Otomotiv.....	37
3.5.3. Elektronik paketleme ve termal yönetim	37
3.5.4. Ticari ve endüstriyel ürünlerde potansiyel uygulamalar	38
4. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER	39
4.1. FDM'in Üretim Yöntemleri.....	40
4.2. FDM'lerin Uygulama Alanları	40
5. DÖKÜM YÖNTEMİYLE İMALAT	43
5.1. Döküm Yöntemleri	44
5.1.1. Yer çekimi döküm.....	44
5.1.2. Yatay transfer döküm	44
5.1.3. Yer çekimine ters döküm	45
5.1.4. Savurma döküm.....	46
5.1.5. Basınçlı döküm.....	47
5.1.6. Kayıp mum döküm.....	48

	Sayfa
5.1.7. Kayıp köpük döküm	49
5.1.8. Vakum destekli döküm.....	50
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
6.1. Malzeme	51
6.2. Vakum Destekli Alçak Basıncılı Döküm (VDABD) Ünitesinin İmalatı.....	52
6.3. Kalıp İmalatı	53
6.4. Döküm	54
6.5. T6 Yaşlandırma Isıl İşlemi	57
6.6. Döküm Parçalardan Test Numunelerinin Hazırlanması	58
6.7. Döküm Yöntemiyle FDM Üretim Başarısının İncelenmesi	59
6.8. Mikro Yapı İncelemeleri	59
6.9. Sertlik Testi İşlemleri	60
6.10. Eğme Testi İşlemleri	61
6.11. Basma Testi İşlemleri.....	62
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	65
7.1. FDM Malzeme Üretiminin Değerlendirilmesi	65
7.2. Mikroyapı İncelemeleri	69
7.2.1. Optik mikroskop incelemeleri	70
7.2.2. SEM incelemeleri ve EDS analizleri.....	75
7.3. Sertlik Testi Sonuçları	83
7.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	87
7.4.1. Eğme numunelerinin kırılma yüzeylerinin incelenmesi.....	93
7.5. Basma Testi Sonuçları	98
7.5.1. Test sonrası basma numunelerinin incelenmesi	105
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	113

ÖZGEÇMİŞ	119
----------------	-----



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Saf alüminyumun genel özellikleri	17
Çizelge 3.2. Al alaşımlarının ana alaşım elementleri ve ısıtıl işlem kabiliyetleri	19
Çizelge 3.3. Isıl işlemler için kullanılan kodlamalar (harfler, rakamlar) ve bunların açıklamaları	20
Çizelge 6.1. Alüminyum alaşımının kimyasal analiz değerleri.....	51
Çizelge 6.2. FDM numune üretim parametreleri ve kodlanması	56
Çizelge 7.1. Alüminyum ve FDM kompozit matris sertliklerinin döküm şartlarına bağlı olarak değişimi	84
Çizelge 7.2. Döküm koşullarına bağlı olarak alüminyum ve FDM'lerin üç nokta eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişimi.....	88
Çizelge 7.3. Alüminyum ve FDM'lerin basma dayanımları ile boyutsal kısalma miktarları.....	98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit malzemenin bileşenleri ve ara yüzeyin şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.2. a) Kısa fiber ve (b) sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.3. Partikül takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.4. (a) Tabakalı kompozit malzemenin şematik gösterimi ve örnek olarak (b) plywood malzemesi.....	13
Şekil 3.1. MMK'lerin üretiminde kullanılan matris ve takviye bileşen çeşitleri	16
Şekil 3.2. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementine göre sınıflandırılması	18
Şekil 3.3. A-B ikili faz diyagramı ve çökelmeyle sertleşebilen C ₀ bileşimi	21
Şekil 3.4. A-B ikili alaşımındaki C ₀ bileşiminin çökelme sertleşmesi işlem aşamaları	22
Şekil 3.5. Köpüklerin (a) açık ve (b) kapalı hücreli yapıları.....	24
Şekil 3.6. Replikasyon yöntemi ile gözenekli SiC üretim aşamalarının şematik gösterimi.....	25
Şekil 3.7. Harcanan malzeme yöntemi ile gözenekli seramik üretim aşamaları.....	27
Şekil 3.8. Doğrudan köpükleştirme ile gözenekli seramik üretimi	27
Şekil 3.9. Toz metalürjisi ile MMK üretim aşamalarının şematik gösterimi.....	29
Şekil 3.10. Basınçlı infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.11. Vakum infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi	32
Şekil 3.12. Gaz basınçlı infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi .	32
Şekil 3.13. Sıkıştırma döküm infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.14. Karıştırma döküm yöntemi ile Al matrisli MgO takviyeli MMK üretimi ...	33
Şekil 3.15. Yatay savurma makinesinde üretim.....	34
Şekil 4.1. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin kesit yapısının şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.2. FDM'lerin üretim sırasındaki haline göre sınıflandırılması	40

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Kapalı kum kalıp kesiti	43
Şekil 5.2. (a) açık kalıp, (b) kapalı kalıp, (c) iki aşamalı doldurma, (d) yatay istif kalıplama ve (e) dikey istif kalıplama yer çekimi döküm yöntemleri	44
Şekil 5.3. (a) seviye, (b) kontrollü eğimli, (c) yuvarlama ve (d) dökümden sonra yuvarlama yatay transfer döküm yöntemleri	45
Şekil 5.4. (a) sızdırmaz bir basınçlı kap kullanılarak işlenmiş geleneksel alçak basınçlı döküm, (b) açık bir fırında elektromanyetik pompa.....	46
Şekil 5.5. Bir harcanan elyaf pota ile karşı-yerçekimi; (a) hızlı ergime; (b) potayı desteklemek için mengene ile kısıtma; (c) potanın tabanını yukarı iterek döküm.....	46
Şekil 5.6. (a) soğuk kamara ve (b) sıcak kamara yüksek basınçlı döküm makineleri	47
Şekil 5.7. Sıkıştırma döküm	47
Şekil 5.8. Kayıp mum döküm yöntemlerinin şematik gösterimleri	48
Şekil 5.9. Kayıp köpük döküm yönteminin aşamaları; (a) model salkımın kum üzerine sabitlenmesi, (b) kumun doldurulması ve titreşim, (c) döküme hazır kalıp, (d) ergimiş metalin kalıba dökümü	49
Şekil 5.10. Vakum destekli dökümde döküm için sıralanmış bir vakum manifoldu üzerinde oturan alçı kalıplar.....	50
Şekil 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilen dikdörtgen döküm plaka ölçüleri	53
Şekil 6.2. Üretilmesi amaçlanan FDM parçanın şematik görünümü ve ölçüleri	55
Şekil 6.3. T6 ısıt işlemleri uygulama adımları ve işlem şartları.....	57
Şekil 6.4. (a) Döküm plakası üzerinde test numunelerinin alınma konumu, (b) numunelerin ölçüleri ve FDM yapısının şematik gösterimleri.....	59
Şekil 6.5. (a) Metal ve (b) FDM malzemeye eğme testinin uygulanması.....	62
Şekil 7.1. (a) Islanmayan ve (b) ıslanan sistemlerde temas açısının, ara yüzey enerjilerinin ve ıslatma olayının sıvı damlacığı metoduna göre şematik gösterimi.....	73
Şekil 7.2. Alüminyum ve FDM kompozit numune matris sertliklerinin döküm şartlarına bağlı olarak değişimi	85
Şekil 7.3. 650°C’de üretilen alüminyum ve FDM kompozit matrislerinin sertliği	86
Şekil 7.4. 700°C’de üretilen alüminyum ve FDM kompozit matrislerinin sertliği	87

Şekil	Sayfa
Şekil 7.5. Döküm koşullarına bağlı olarak alüminyum ve FDM'lerin üç nokta eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişimi.....	89
Şekil 7.6. 10 ppi preform gözenek yoğunluğuna sahip malzemelerin eğme dayanımı ve deformasyon oranlarının değişimi.....	90
Şekil 7.7. 30 ppi preform gözenek yoğunluğuna sahip malzemelerin eğme dayanımı ve deformasyon oranlarının değişimi.....	91
Şekil 7.8. Vakum uygulamasına bağlı olarak malzemelerin ortalama eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişim, a) Geleneksel ve b) vakum destekli döküm sonuçları	93
Şekil 7.9. Takviyesiz alüminyum ve FDM'lerin basma dayanımları ve boyutsal kısalma miktarları	100
Şekil 7.10. 10 ppi takviye gözenek yoğunluğuna göre basma dayanımları ve % deformasyon oranları	101
Şekil 7.11. 30 ppi takviye gözenek yoğunluğuna göre basma dayanımları ve % deformasyon oranları	102
Şekil 7.12. Döküm sıcaklığına bağlı olarak geleneksel yöntemle üretilen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları	103
Şekil 7.13. Döküm sıcaklığına bağlı olarak vakum uygulaması dökülen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları	103
Şekil 7.14. Döküm yöntemine bağlı olarak 650 °C'de üretilen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları	104
Şekil 7.15. Döküm yöntemine bağlı olarak 700 °C'de üretilen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları	105
Şekil 7.16. Basma testinde a)sünek, b)gevrek ve c)yarı gevrek malzemelerin deformasyon ve kırılma şekilleri.....	105

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Takviye bileşeninin şekline göre kompozit malzeme türlerinin yapısal olarak gösterimi.....	6
Resim 2.2. SiC matrisli Nextel 312 seramik fiber takviyeli mum tipi bir filtre.....	8
Resim 2.3. Su iletimi için üretilmiş bir filament sargılı boru.....	9
Resim 2.4. Boeing 767 uçağına ait bir karbon/karbon fren düzeneğı	10
Resim 3.1. Replikasyon yöntemi ile üretilmiş gözenekli seramik	26
Resim 6.1. (a) 10 ppi ve (b) 30 ppi SiC preformların fotoğrafları ve detay görüntüleri.....	51
Resim 6.2. (a) Vakum destekli döküm tezgâhı ve (b) vakum döküm makinası.....	52
Resim 6.3. (a) Kum mikseri ve (b) kalıp kumu.....	53
Resim 6.4. Döküm için kalıpların hazırlanma aşamaları	54
Resim 6.5. Elektrik dirençli ergitme fırını	55
Resim 6.6. Kalıp boşluğuna yerleştirilen preformların gösterimi	56
Resim 6.7. Üretilen numuneler.....	57
Resim 6.8. Çözündürme ve yaşlandırma işlemlerinin yapıldığı ısıtıl işlem fırınları.....	58
Resim 6.9. (a) Abrasif kesme cihazı (b) numune kesim işlemine ait görüntüler	58
Resim 6.10. Optik mikroskop ve yapısal inceleme çalışması görüntüsü	60
Resim 6.11. Detaylı yapısal inceleme ve EDS analizlerinin yapılması	60
Resim 6.12. Sertlik ölçüm işleminin uygulanması.....	61
Resim 6.13. 3 nokta eğme testlerinin yapılışı	61
Resim 6.14. Stereo mikroskopta kırık yüzey incelemesi	62
Resim 6.15. (a) basma test cihazı ve (b) FDM malzemeye basma testinin uygulanması	63
Resim 7.1. 650 °C döküm sıcaklığı ve 10 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri.....	67

Resim	Sayfa
Resim 7.2. 700 °C döküm sıcaklığı ve 10 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri	67
Resim 7.3. 650 °C döküm sıcaklığı ve 30 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri	67
Resim 7.4. 700 °C döküm sıcaklığı ve 30 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri	68
Resim 7.5. Döküm ve ısıtıl işlem sonrasında Al matris alaşımı mikroyapıları	70
Resim 7.6. 10 ppi gözenek yoğunluklu FDM malzemelerin matris-takviye ara yüzey görüntüleri	72
Resim 7.7. 30 ppi gözenek yoğunluklu FDM malzemelerin matris-takviye ara yüzey görüntüleri	73
Resim 7.8. 700°C'de dökümü yapılan ve ısıtıl işlem uygulanan malzemelerin SEM görüntüleri	75
Resim 7.9. Döküm 700-10-G'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması	78
Resim 7.10. Yaşlanmış 700-10-G'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması	79
Resim 7.11. Döküm 700-10-V'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması ...	79
Resim 7.12. Yaşlanmış 700-10-V'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması	80
Resim 7.13. Döküm 700-30-G'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması ...	80
Resim 7.14. Yaşlanmış 700-30-G'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması	81
Resim 7.15. Döküm 700-30-V'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması ...	81
Resim 7.16. Yaşlanmış 700-30-V'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması	82
Resim 7.17. Al malzemelerde döküm durumu ve yaşlanmış numuneler ait üç nokta eğme testi kırılma yüzeyleri	94
Resim 7.18. 10 ppi gözenek yoğunluklu takviye bulunan FDM numunelerde döküm durumu ve yaşlanmış numunelere ait üç nokta eğme testi kırılma yüzeyleri	96

Resim	Sayfa
Resim 7.19. 30 ppi gözenek yoğunluklu takviye bulunan FDM numunelerde döküm durumu ve yaşlanmış numunelere ait üç nokta eğme testi kırılma yüzeyleri.....	97
Resim 7.20. Takviyesiz alüminyum numunelerin basma testi sonrası görüntüleri.....	107
Resim 7.21. 10 ppi takviyeli FDM numunelerin basma testi sonrası görüntüleri.....	108
Resim 7.22. 30 ppi takviyeli FDM numunelerin basma testi sonrası görüntüleri.....	109



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
μm	Mikrometre
Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Mg	Magnezyum
mm	Milimetre
nm	Nanometre
$^{\circ}\text{C}$	Derece Santigrat
SiC	Silisyum Karbür

Kısaltmalar	Açıklamalar
Al-MMK	Alüminyum Matrisli Kompozitler
EDS	Enerji Dağılımlı Spektroskopi Analizi
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
HB	Hardness Brinell
MMK	Metal Matrisli Kompozitler
MPa	Megapascal
PPI	İnç Başına Düşen Gözenek Sayısı
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte aynı anda birçok mekanik özellikleri içeren, insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur [1]. Uygulamalarda malzemelerden istenilen en önemli özellikler; mukavemet, tokluk, hafiflik ve düşük maliyettir ancak özellikle geleneksel malzemelerde aşınma, mukavemet, kırılma tokluğu ve hafiflik gibi özellikler ihtiyaçlara cevap vermemektedir [2]. Otomotiv, havacılık, nükleer enerji üretimi, okyanusun derinliklerindeki çalışmalarda ve diğer yapısal alanlarda bu malzemelerin özelliklerinin sınırlamaları nedeniyle kompozit formunda karma malzemelerin geliştirilmesi söz konusu olmuştur [3].

En az iki malzemenin kombinasyonu sonucu oluşan kompozit malzemeler, biri takviye elemanı diğeri ise ana malzeme veya diğer adıyla matris malzemesinden oluşmaktadır [2]. Matris malzemesine göre; polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler (MMK) şeklinde sınıflandırılabilir [4].

Çok fazla çeşitliliğe sahip matris alaşımları ve özellikleri sayesinde MMK takviye malzemesinin tipi, şekli ve oranı ile farklı özellikler de üretilebilir [2]. MMK'ler genel olarak, yüksek elastik modülü, çekme-basma dayanımı ve kayma dayanımlarının yanı sıra, metallerin sünekliği ve tokluğu; seramiklerin yüksek dayanımı ve yüksek elastik modülü özelliklerinden dolayı son derece önemli mühendislik malzemeleridir [5].

Alüminyum ve alaşımları, MMK üretiminde matris malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemelerdir [6]. Günümüzde otomotiv endüstrisi, uçak, savunma ve havacılık bileşenleri gibi mühendislik uygulamalarında Alüminyum-MMK (Al-MMK) kullanılmaktadır. Al-MMK'de Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Mg gibi alüminyum alaşımları ana bileşenlerdir. Alüminyum alaşımı ile birleştirilmek için silisyum karbür (SiC), alümina (Al_2O_3), karbon (C), bor karbür (B_4C), alüminyum nitrür (AlN), silisyum dioksit (SiO_2) ve bor nitrür (BN) gibi takviyeler kullanılır. Al-MMK, daha yüksek mukavemet, yüksek spesifik modül, iyi aşınma direnci ve daha düşük termal genleşme gibi en iyi geliştirilmiş özelliklere sahiptir [7].

MMK üretim yöntemleri genel olarak sıvı faz yöntemleri ve katı hal yöntemleri olarak sınıflandırılır. Sıvı hal yöntemleri, karıştırılmalı döküm, karma döküm, sıkıştırılmalı döküm, ultrasonik destekli döküm, infiltrasyon, termal sprey, lazer eriyik parçacık enjeksiyon

yöntemi vb. içerir. Katı hal yöntemleri ise, toz metalurjisi, yüksek enerjili bilyalı değirmen, kıvılcım plazma sinterleme, soğuk püskürtme, difüzyon bağlama ve sürtünmeli karıştırma işlemi vb. içerir [8].

Günümüzde, düşük yakıt tüketimi ve daha güvenli araç taleplerinden dolayı araçların temel sistemlerini geliştirmek için çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle; araç üretimi sırasında kullanılan her bir sistem, malzeme ya da tasarım geliştirmeleri üzerine yapılan çalışmalarla araçlarda ağırlık azaltmak amaçlanmaktadır [9].

Araçlardaki temel sistemler; hava yastığı, süspansiyon, direksiyon ve fren sistemi olarak sıralanabilir [9].

Fren disk sistemi bir aracın hareketiyle oluşan kinetik enerjiyi sürtünmeyle sönmleyerek ısı enerjisine çevirmekte ve ortaya çıkan ısınn hızlı şekilde diskten ve karşı yüzeyde balatalardan atılması gerekmektedir. Bu nedenle fren disklerinin ısıl iletkenlik ve ısıl kapasitenin yanında tekrarlı gerilmelere karşı yorulma dayanımı, aşınma ve korozyon direnci gibi özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır [10].

Otomobillerde fren diski malzemesi olarak genellikle gri dökme demir kullanılmaktadır [11]. Dökme demirin mikro yapısındaki grafit tabakalar sayesinde bu malzemenin termal iletkenliği ve aşınma direnci yüksektir [12]. Ancak, dökme demir oldukça ağır ve sulu korozyona karşı direnci oldukça düşük bir malzemedir [11, 12]. Al-MMK'in, dökme demire göre oldukça hafif olmaları, dökme demire göre oldukça üstün olan mekanik özellikleri ve aşınma dirençleriyle, fren disk malzemesi olarak cazip hale gelmektedir [11]. Ayrıca, yüksek korozyon direnci, yüksek termal iletkenlik, yüksek spesifik modül gibi özelliklerinden ötürü Al-MMK otomobillerde uygulanmaktadır [13].

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM), geleneksel homojen malzemelerde bulunmayan yenilikçi özelliklerin elde edilmesi için ortaya çıkan bir kavramdır. FDM, bir konum fonksiyonuna bağlı olarak, yüzey değiştirirken malzeme özellikleri kademeli veya sürekli değişim gösteren malzemelerdir [14].

Gözenekli SiC preform, fiyat bakımından avantajlı olmakla birlikte MMK'in aşınma dayanımının ve mukavemetinin önemli ölçüde artmasına neden olur. Ayrıca Al₂O₃'dan daha

sert ve ısıya daha dayanıklı olmakla birlikte korozyona karşı yüksek dayanım gösterdiği için bu çalışmada tercih edilmiştir [2].

Fren disklerinde sürtünme bölgesinin aşınma direncinin yüksek olması gerekir. Al-MMK'in aşınma direnci yüksek olduğundan plakanın ortasına konumlandırılması gerekir [7]. Frenleme sırasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan ısıyı absorbe edilebilmesi için ısı iletkenliği yüksek olan Al alaşımı, malzemenin bütününe hacimsel olarak çoğunluğunu sağlayacak şekilde kompozitten geriye kalan kısımda konumlandırılmıştır [2].

Fren pabucunun aracı yavaşlatmak için diskin yüzeyine dik basma kuvvetinin sonucunda sıkıştırma kuvveti oluşur [15].

Bu çalışmada; kum kalıba hem geleneksel döküm hem de vakum destekli döküm yöntemiyle, plaka şeklinde bir kısmı Al-SiC kompozit ve diğer kısmı takviyesiz Al alaşımı olan bir fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) üretilmiştir.

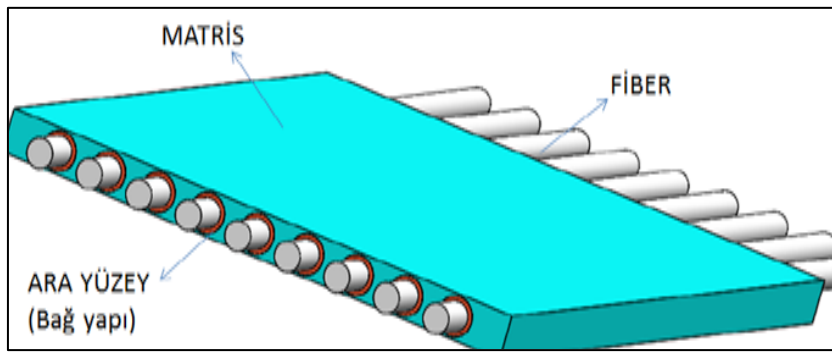


2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, kimyasal bileşimi ve özellikleri farklı olan iki veya daha fazla bileşenin makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen yapılardır. Bu bileşenler yapı içerisinde kendi özelliklerini koruyarak daha üstün performanstaki kompozitlerin üretimini sağlamaktadırlar [1].

Kompozitler çözen ve çözünen bileşenlerden oluşmaz. Bileşenleri birbiri içinde çözünen malzemelere alaşım denir. Kompozitlerin bileşenleri arasında atom alışverişi gerçekleşmez. İnsanların üretebildiği kompozitlerin bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler. Bazı metalik sistemlerde, bileşenler arasında bir miktar çözünme nedeniyle oluşan ara geçiş bölgeleri bileşenler arasında güçlü bağların oluşmasına katkı sağlamaktadır [1].

Kompozitler, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi matris ve takviye olarak ifade edilen bileşenlerinden oluşmaktadır. Matris, kompozitin %50’sinden fazlasını oluşturur ve yapısal bütünlüğü sağlar. Matris bileşimi, kullanım amacına uygun olarak seçilir. Takviye, kompozitlere uygulanan yükün taşınmasını, matrisin rijitliği ve dayanımın artmasını sağlamaktadır. Matris ise gevrek olan takviye bileşenlerini dış etkilerden korur, üzerine uygulanan yükü takviye bileşenlerine iletir ve plastik deformasyona geçerken oluşan çatlakların engellenmesine neden olur [16].

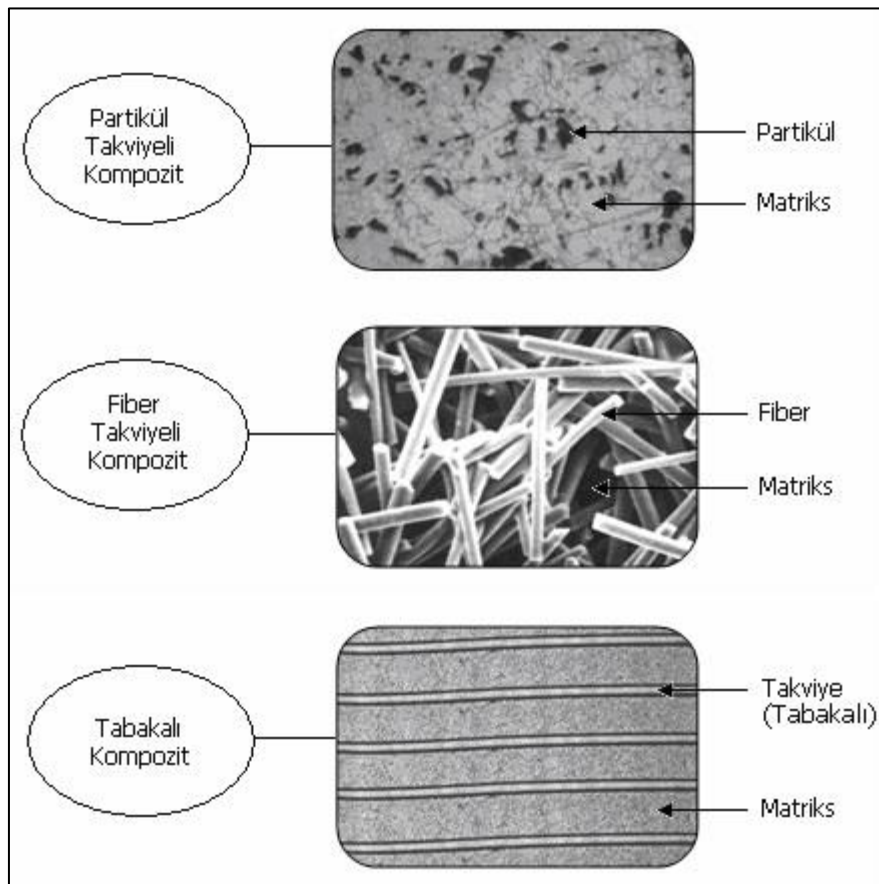


Şekil 2.1. Kompozit malzemenin bileşenleri ve ara yüzeyin şematik gösterimi [17]

Kompozit malzemelerin üretimi sırasında matris ve takviye bileşenlerinin etkileşimi sonucu oluşan ara geçiş bölgesi nedeniyle ara yüzey kavramı ortaya çıkmıştır. Çok ince bir yapıya sahip olmasına rağmen kompozitin özelliklerini belirleyen en önemli yapısal unsurlardan birisidir. Matris ve takviye bileşenlerinin sahip olduğu bağ kuvvetinin yüksek olması,

kompozitin uygulanan yükler karşısındaki davranışını belirlemektedir. Ara yüzeydeki yüksek bağ kuvveti kompoziti daha dayanıklı ve sert yaparken, düşük bağ kuvveti bu özellikler yönünden zayıf bir yapı oluşmasına neden olmaktadır [17].

Kompozit malzemeler matris bileşenine göre; metal, seramik, polimer, cam ve karbon matrisli kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır [18]. Kompozit malzemeler, takviye bileşeninin çeşidine göre ise; Resim 2.1’de yapısal olarak gösterilen fiber takviyeli, partikül takviyeli ve tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılır [1].



Resim 2.1. Takviye bileşeninin şekline göre kompozit malzeme türlerinin yapısal olarak gösterimi [2]

2.1. Matris Bileşenine Göre Kompozit Malzemeler

2.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK)

MMK’ler, gelişmiş özellikleri nedeniyle geleneksel mühendislik malzemelerine göre birçok avantaj sunmaktadır. Takviye kullanılmayan metallere göre; yüksek ortam sıcaklığında

kullanılabilme, yüksek özgül dayanım, rijitlik, sertlik, aşınma dayanımı, sürünme direnci ve boyutsal kararlık özelliklerine ihtiyaç olduğunda kompozit malzemeler vazgeçilmezdir. [19].

Alüminyum, magnezyum, demir, nikel, bunların alaşımları ve bazı süper alaşımlar en çok kullanılan matris malzemeleridir. Takviye malzemeleri; sürekli ve kısa fiber ile whisker veya parçacık şeklindedir. Bunlar genellikle; bor, karbon, silisyum karbür ve alümina gibi seramikler veya çelik, tungsten gibi malzemelerden üretilmektedir. MMK'nın özellikleri, takviye ve matris alaşımlarının özelliklerine, üretim şartlarına, takviye/matris ara yüzeyi ile bunların yapısal özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. MMK üretimindeki ana amaçlar, yüksek özgül mukavemet ve sertlik ile hafif malzemeler elde etmek olarak sıralanabilir [18].

2.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler (SMK)

Seramikler malzemeler; yüksek sert ve kırılgan, düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanında, termal şok dirençleri ve toklukları da düşüktür. Bu nedenle; kullanımları sırasında ani hasar gösterdiklerinden dolayı, yapısal yüksek tahribata uğrayabilirler. Seramik malzemelerin uygun fiber takviyelerle ani kırılmalara karşı dayanımları artırılabilirken, tokluklarının da artırılması amaçlanmaktadır [20].

MMK'de olduğu gibi SMK'de de, fiber ve parçacık takviyelerden söz edilebilir [20]. SMK'de SiO_2 , $\text{Li}_2\text{O}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Si}_3\text{N}_4$ (SiC) gibi seramikler matris bileşeni olarak tercih edilir. SiC, Al_2O_3 , B_4C , Si_3N_4 , ZrO_2 , ZrB_2 , AlN, BN malzemeler ise takviye bileşeni olarak tercih edilir [20].

SMK'ler üstün mekanik özellikleri nedeniyle; yüksek sıcaklıklara maruz kalan türbin motorlarında, ısı değiştiricilerinde, otomotiv fren disklerinde, yüksek korozyon direnci gerektiren endüstriyel uygulamalarda, askeri uygulamalarda, motor yalıtım parçaları ve egzoz valflerinde kullanılabilmektedir [21]. 1.000 °C'ye kadar gaz akışındaki parçacıkları çıkarmak için kullanılan Resim 2.2'deki SiC matrisli Nextel 312 seramik fiber takviyeli mum tipi filtreler örnek verilebilir [22].



Resim 2.2. SiC matrisli Nextel 312 seramik fiber takviyeli mum tipi bir filtre [22]

2.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK)

PMK, üretim kolaylığı ve maliyetinin düşük olması nedenleriyle genel endüstride en yaygın kullanılan kompozit malzeme sınıfıdır. Bu malzemelerde takviye bileşeni; metal, seramik veya polimer malzemelerden olabilmektedir. Matris bileşeni olarak, polimerik reçine türevlerinden oluşmaktadır. Polimerik reçineler, sahip oldukları bağa göre termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır [23].

Termosetler çapraz bağa sahiptir. Isıtıldığında sertleşerek rijit hal aldıklarından, şekillendirilmeleri zordur. Termoplastiklerden daha gevreklerdir. Kompozit endüstrisinde genellikle epoksi, polyester, fenolik, melamin, ürefoaldehit, silikon ve poliüretan gibi termosetler matris bileşeni olarak kullanılmaktadır [23].

Termoplastikler ise zayıf ve düz zincir bağa sahiptir. Isıtılarak kolaylıkla yeniden şekillendirilirler. Kompozit endüstrisinde genellikle polietilen, polipropilen, polivinilklorür (PVC), akrilonitril bütadien stiren (ABS), poliamid, akrilik, polikarbonat gibi termoplastikler matris bileşeni olarak kullanılmaktadır [23].

Rüzgar türbini, bisiklet gövdesi, sandalye, sehpa, müzik enstrümanları, spor ekipmanları ve tekstili, yangınla mücadele kıyafetleri, meyve suyu, süt gibi hazır içeceklerin paketlenildiği kutular gibi pek çok ürün PMK'den üretilmektedir [23]. Bunların yanı sıra su iletimi için

üretmiş cam elyaf takviyeli filament sargılı 2 metre çapındaki silindir (Resim 2.3) örnek gösterilebilir [22].



Resim 2.3. Su iletimi için üretilmiş bir filament sargılı boru [22]

2.1.4. Karbon - karbon kompozit malzemeler (KKK)

Genellikle KKK olarak adlandırılan malzemeler, karbon matrisli karbon fiber takviyelidir. Bu malzemeler en gelişmiş ve gelecek vaat eden mühendislik malzemelerinden birisidir [24]. Bu malzemelerden; 2000 °C'yi aşan sıcaklıklara kadar yüksek elastik modülü, çekme dayanımı, sürünme direnci, nispeten yüksek kırılma tokluğu ve iyi tribolojik özellikler beklenmektedir [22, 24].

KKK'ın özellikleri; kullanılan karbon fiber tipine, fiber hacim oranına, fiber dağılımına ve gözenek miktarına bağlıdır. Özellikle grafitik yapıya sahip yüksek oranda yönlendirilmiş karbon fiberlere sahip mezofaz zift bazlı karbon fiberler kullanılıyorsa, KKK malzemeler yüksek termal iletkenliğe sahip olmaktadır. Bu kompozitler; fiber boyunca yüksek termal iletkenlik, ancak enine yönde ise düşük iletkenlik göstermektedir. Bu yüzden; KKK'ların istenen termal iletkenliği elde etmek için uygun fiber konfigürasyonu ve yönlenmesine sahip olmaları gerekmektedir [22].

KKK'lar, roket motorlarında, uçaklarda ve yüksek performanslı otomobillerde sürtünme malzemeleri olarak, sıcak presleme kalıpları ve gelişmiş türbin motorlarına ait bileşenlerde

ve atmosfere dönüş araçlarında ablatif kalkanlar olarak kullanılmaktadır [24]. Boeing 767 uçağında kullanılan Resim 2.4'teki karbon/karbon fren düzeneği, örnek olarak verilebilir [22].



Resim 2.4. Boeing 767 uçağına ait bir karbon/karbon fren düzeneği [22]

2.1.5. Cam matrisli kompozit malzemeler (CMK)

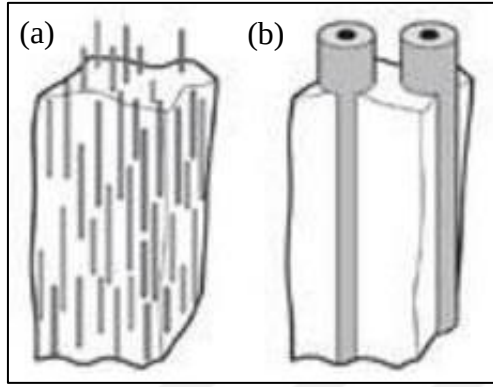
Yüksek sıcaklıklardaki mukavemet, cam ya da seramik matrisli kompozitlerin en karakteristik özelliğidir [18]. Yüksek modül, yüksek dayanım ve/veya yüksek süneklik gibi özelliklere sahip bir bileşen takviye edilerek camın kırılma tokluğu geliştirilebilir. Toklaştırma mekanizmalarını etkin hale getirmek amacıyla kompozitlerin mikro yapısını optimum duruma getirmek, kırılma tokluğunu önemli ölçüde artırabilir [25]. Motorlarda ısı-rezistans parçaları, egzoz sistemleri ve elektrikle ilgili parçalar CMK'in başlıca kullanıldıkları yerlerdendir [18].

2.2. Takviye Bileşeninin Şekline Göre Kompozit Malzemeler

2.2.1. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Çekme, eğilme ve darbe dayanımı düşük olan gevrek matris malzemelerinin zayıf teknolojik özelliklerini iyileştirmek, malzemenin tokluk ve sünekliğini artırmak için kullanılan yapısal bileşenlere fiber takviye denilmektedir. Fiberler; kesit (en)/boy oranı en az 1:100 olan ve

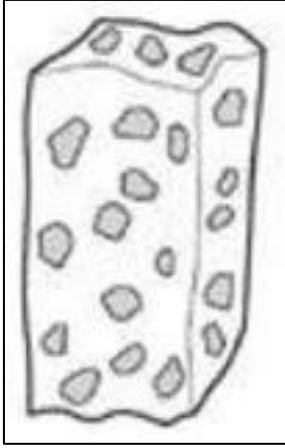
katı olmasına rağmen kalıplanabilecek kadar esnek malzemelerdir [17]. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde cam, karbon, bazalt ve Kevlar gibi sentetik fiberlerin dağılım durumu; yüksek mukavemet, sertlik ve aşınmaya karşı direnç gibi gelişmiş malzeme özelliklerini belirlemektedir. Günümüzde, doğal fiber takviyesinin kullanımı araştırmacılar arasında yaygınlaşmaktadır. Kimyasal olarak işlenerek gelişmiş darbe tokluğu ve yorulma dayanımına sahip olan doğal fiberler; ucuzlukları, bol miktarda bulunabilmeleri, biyolojik olarak parçalanarak geri dönüştürülebilir çevre dostu ve daha düşük yoğunluğa sahip olmaları nedenleriyle sentetik fiberlere göre avantajlara sahip olmaktadır [26]. Fiber takviyeli kompozitler Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. a) Kısa fiber ve (b) sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin şematik gösterimi [1]

2.2.2. Partikül takviyeli kompozit malzemeler

Makro veya mikro boyuttaki parçacıkların matris ile oluşturdukları malzemelere partikül takviyeli kompozitler denir. Takviye edilen ortalama partikül boyutu 1 mm’ den büyük ve takviye hacim oranı genellikle % 50’den daha azdır [2]. Partikül takviyeli kompozit Şekil 2.3’te şematik olarak gösterilmiştir.

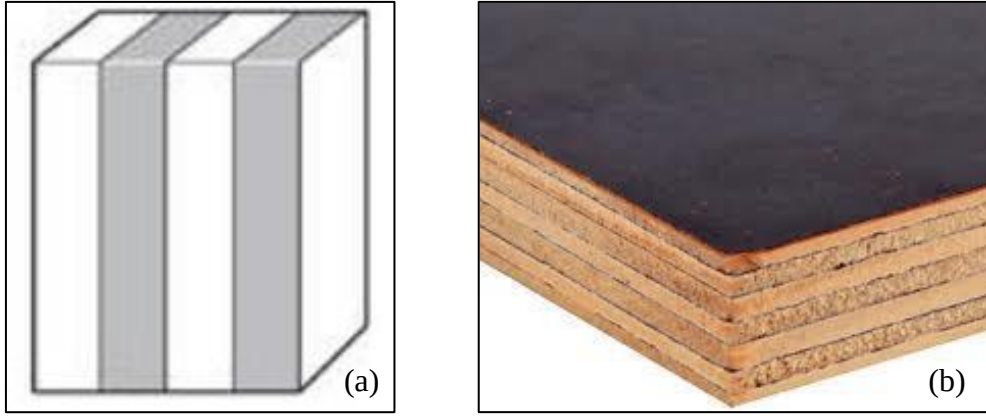


Şekil 2.3. Partikül takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi [1]

Partikül takviyeli kompozitler, yüksek düzeyde aşınma direncinin gerekli olduğu uygulamalarda daha çok tercih edilir. Bu kompozitler; düşük maliyetleri, üretim ve şekillendirme kolaylık avantajlarına sahiptir [23]. Bu malzeme grubu için sermetler örnek verilebilir. Sermetler, yüksek sıcaklık çalışma şartlarına uygun hale getirilmiş partikül takviyeli metal-seramik kompozittir. Başka bir örnek olarak elastomer parçacıkları, kırılğan polimer matrislere takviye edilerek çatlama için gerekli hassasiyeti azaltılıp; malzemenin kırılma ve darbe özellikleri geliştirilebilir [3].

2.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Bu malzemeler, farklı özelliklerdeki tabakaların yan yana veya üst üste bir araya getirilmesiyle elde edilir. Bir başka ifadeyle; hem matris hem de takviye elemanı tabakalar halinde olan malzemelerdir. Kompoziti oluşturan tabakaların özelliklerine bağlı olarak; yüksek aşınma direncine, yüksek korozyona dayanımına ve yük taşıma kapasitesine sahip vb. malzemeler üretmek mümkündür. Tabakalar, farklı matris ve takviye malzeme türlerinden oluşabilir. Kullanım amacına göre değişik formlarda tasarlanabilen bu malzemeler, özellikle askeri ekipmanlar ve hafif zırhlarda kullanılmaktadır [1]. Ayrıca inşaat sektöründe kullanılan en bilindik örneği “plywood”dur. Plywood, 7-9-11 veya 13 adet tek sayıda katman halinde üretilerek alt ve üst katmanların aynı doğrultuda çalışması sağlanmaktadır [27]. Tabakalı kompozit malzemenin şematik gösterimi ve plywood malzemesi Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4. (a) Tabakalı kompozit malzemenin şematik gösterimi ve örnek olarak (b) plywood malzemesi [1, 27]



3. METAL MARTİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER (MMK)

MMK, mevcut metalik malzemelerin ısı özelliklerinin yeterli olmadığı daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecek ve daha yüksek özgül dayanıma sahip malzemelere ihtiyaç duyulması nedeniyle 1960'lı yılların başında geliştirilmiştir [28]. Yüksek sıcaklığa, neme ve radyasyona karşı dayanıklılığın yanında, ısı ve elektriksel iletkenlik, yüksek mekanik özellikleri nedeniyle MMK'ler seramik, polimer ve karbon matrisli kompozitlere göre avantajlara sahiptir. MMK; başka bir metal, organik bileşik, seramik veya polimer malzemelerden üretilen takviye elemanının matris içerisine yerleştirilmesiyle üretilmektedir [29].

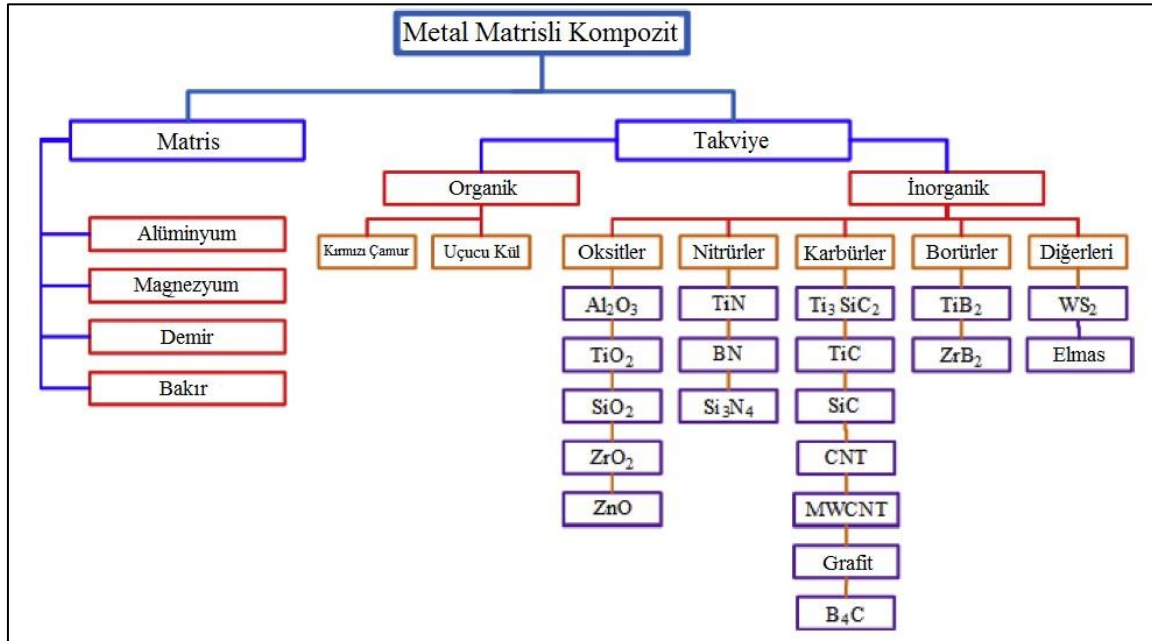
MMK'in birçok karakteristik özelliği bulunmaktadır. Mekanik özellikler bakımından partikül takviyeli MMK yönden bağımsız özellik gösterirken, fiber takviyeli MMK ise heterojen ve yöne bağlı özellik göstermektedir. Bu nedenle partikül takviyeli kompozitlerin özellikleri, fiber takviyeli kompozitlerin özelliklerinden daha kolay belirlenir. MMK'de takviye bileşeni olarak kullanılan fiberler kuvvet yönüne paralel, dik doğrultuda veya rasgele dağılmış durumda bulunurlar [2,3]. MMK'lerin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Takviye bileşenin hacminin artışı MMK'in elastik modülünü ve mukavemetini artırması [16],
- Tek yönlü sürekli fiber takviyeli MMK'in fiber hacmi arttıkça kompozitin fiber yönünde elastik modülü de doğrusal bir artış gösterirken, fiberlere çapraz yönde kuvvet uygulandığında elastik modülün azalması [22],
- Malzemedeki takviyenin hacmi arttıkça uzama değeri azalmakta, ancak kırılma tokluğunun artması [16],
- Düşük sünekliliğe sahip olmasından dolayı MMK'e ikincil şekil verme işleminin genellikle talaşlı imalat yöntemleri ile yapılabilmesi [16],
- Kompozit malzemedeki matrisin mekanik özelliklerinin ve SiC, TiC gibi sertliği yüksek takviye elemanı hacminin artmasıyla aşınma direncinin de artması [16],
- Hafif metal alaşım matrisli MMK'lerde seramik fiber ya da partiküllerin takviye edilmesi sonucunda kompozitin ısı genleşme katsayısının azalması [2],
- Metalik matris nedeniyle MMK'in ısı iletkenliğinin, diğer kompozit malzemelerden genellikle yüksek olması [3],

- Elektrik iletkenlilerinin yüksekliği, yoğunluğunun nispeten düşük olması ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi [1, 3],

gibi kendine has özelliklerindendir.

Bu özellikleri ve daha fazlası matris ve takviye elemanı seçimine bağlı olarak daha da geliştirilebilir [29]. Bu matris ve takviye bileşen çeşitleri aşağıda Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. MMK’lerin üretiminde kullanılan matris ve takviye bileşen çeşitleri [29]

MMK’ler için halihazırdaki matris malzemeleri (Al, Mg, Cu, Fe, Ti) arasında en yaygın olanlar Al ve Mg’dur. Magnezyum matrisli kompozitler, monolitik alaşıma kıyasla yüksek mekanik özellikleri barındırmasına rağmen düşük süneklik, düşük kırılma direnci ve magnezyumun yüksek sıcaklıkta yüksek derecede reaktif olması gibi dezavantajları da vardır. Mg-MMK’ler üretilirken, inert bir atmosfer sağlanarak çevre ile oksidasyonu önlenmelidir. Demiri matris olarak kullanmanın önemli bir dezavantajı, kompozitlerden daha yüksek kırılma direnci ve daha az darbe dayanımıdır. Bu yüzden, çelik matrisli MMK’ler, yalnızca aşınma dirençli uygulamalar için büyük potansiyel gösterir. Bakır matrisli MMK’ler esas olarak ısı ve elektriksel iletkenliğin önem arz ettiği uygulamalar için kullanılır. Saf Cu, düşük dayanımı nedeniyle birçok uygulama için matris olarak kullanılamaz. Halihazırdaki birkaç matris malzemesinden, alüminyum ve alaşımları MMK’leri üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekonomik olarak uygulanabilme, daha az ağırlık, farklı tekniklerle

kolay işlenebilme, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve mükemmel korozyon direnci; alüminyumun çekici özelliklerinden bazılarıdır [29].

Kompozitin amaçlarına ve uygulamalarına dayanılarak takviye malzemesi tercih edilmektedir. Ağırlık azaltmak öncelikli ise hafif metallere takviye yapmak uygulama imkanı sunar. Al matrisli SiC veya Al_2O_3 veya B_4C takviyeli kompozit, nispeten daha düşük maliyette üretilerek geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip en yaygın kullanılan MMK'lerden biridir. Kompozitlerdeki ara yüzey yapıştırma, kompozit üretimi sırasında büyük bir endişe arz etmektedir. Matris ve takviye bileşenleri uygun şekilde uyarlanmazsa, üretilen kompozitlerin arzu edilen özellikleri kazanması zordur [29].

3.1. Alüminyum Alaşımları ve Alüminyum Matrisli Kompozitler

Endüstriyel olarak alüminyum (Al), çelikten sonra en çok kullanılan metallerden biri olmakla yanı sıra, tabiatta en çok bulunan elementlerden biridir [1]. Alüminyum'un, dünyada oksit halinde en önemli ham maddesi boksittir. İlk olarak; 1808 yılında İngiltere'de ortaya çıkarılan alüminyum, endüstriyel çapta 1886 yılında geliştirilen elektroliz yöntemi ile üretilmeye başlamıştır. Günümüzde alüminyum üretimi sırasıyla; boksit madeninden çıkarılan boksit cevherinden alümina üretimi, alüminadan elektroliz yolu ile saf alüminyum üretimi, ergitme sonrasında sıvı alüminyumun alaşım yapılarak dökülmesi, ekstrüzyon, haddeleme işlemleriyle yarı mamül veya tam mamül üretimini kapsamaktadır [4].

Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metaldir. Alüminyumun oksijene karşı olan yüksek ilgisi nedeni ile yüzeyde havanın teması sonucu ince, fakat yoğun bir oksit tabakası (Al_2O_3) oluşmaktadır. Bu tabaka, alüminyuma mat gümüşümsü renk vererek, diğer etkilere koruması nedeniyle korozyona dayanıklı olmasını sağlar [24]. Çizelge 3.1'de saf alüminyumun genel özellikleri verilmiştir.

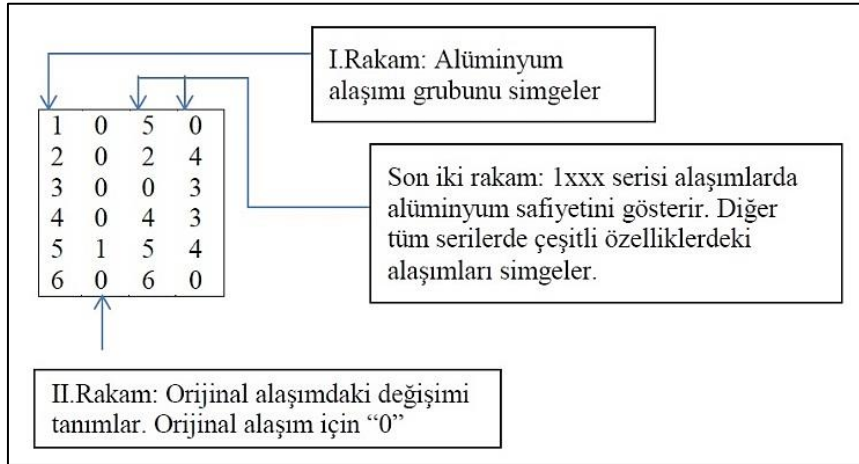
Çizelge 3.1. Saf alüminyumun genel özellikleri [4]

Özellik	Değer
Atom numarası	13
Atom ağırlığı (g/mol)	26,98
Atom yarıçapı ($\text{\AA}$)	1,82
Kristal yapısı	YMK

Çizelge 3.1. (devam) Saf alüminyumun genel özellikleri [4]

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3) (20 °C’de)	2,6989
Ergime sıcaklığı (°C)	660,2
Özgül ısısı (JK^{-1}/g)	0,90
Isıl iletkenliği (WK^{-1}/m)	237
Lineer genleşme katsayısı ($10^6/\text{K}$)	23,86
Elastisite modülü (GPa)	68,3
Elektrik iletkenliği ($\text{m}\Omega^{-1}/\text{mm}^2$)	37,6
Sertliği (HB)	~21
Çekme dayanımı (MPa)	<80
Poisson oranı	0,34

Mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebilmek için saf alüminyuma alaşım elementleri ilave edilir. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında Alüminyum Topluluğu’nun (Aluminum Association) sınıflandırma sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlarının, içerdği alaşım elementine göre sınıflandırılmasında 4 rakamlı bir kodlama sistemi kullanılır (Şekil 3.2) [1].



Şekil 3.2. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementine göre sınıflandırılması [1]

Alüminyum alaşımları, ürüne şekil verme yöntemlerine göre dövme ve döküm alaşımlar olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Dövme alaşımları, genellikle kütük halinde dökülür ve daha sonra plastik deformasyona tabi tutularak arzu edilen nihai şekli verilmektedir. Döküm alaşımları ise ergitildikten sonra üretilecek parçanın şekli bulunan kalıba dökülür ve katılaşarak son şeklini alır [30]. Farklı ısıtım uygulamaları yapılarak özellikleri daha da

geliştirilebilir. Ancak her alaşıma ısıtıl işlem uygulaması yapılamamaktadır. Al alaşımlarına ait ana alaşım elementleri ve ısıtıl işlem kabiliyetleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Al alaşımlarının ana alaşım elementleri ve ısıtıl işlem kabiliyetleri [1, 30, 31]

Alaşım Sınıfı	Ana Alaşım Elementi	Isıl İşlem Kabiliyeti
1xxx (Dövme)	Saf Alüminyum (>99.00% Al)	Uygulanmaz
2xxx (Dövme)	Bakır	Uygulanabilir
3xxx (Dövme)	Mangan	Uygulanmaz
4xxx (Dövme)	Silisyum	Uygulanmaz
5xxx (Dövme)	Magnezyum	Uygulanmaz
6xxx (Dövme)	Magnezyum ve Silisyum	Uygulanabilir
7xxx (Dövme)	Çinko	Uygulanabilir
8xxx (Dövme)	Diğer elementler (demir, kalay...)	Uygulanabilir
1xxx (Döküm)	Saf Alüminyum (> 99.00% Al)	Uygulanmaz
2xxx (Döküm)	Bakır	Uygulanabilir
3xxx (Döküm)	Silisyum ve bakır ve/veya magnezyum	Uygulanabilir
4xxx (Döküm)	Silisyum	Uygulanabilir
5xxx (Döküm)	Magnezyum	Uygulanmaz
7xxx (Döküm)	Çinko	Uygulanabilir
8xxx (Döküm)	Kalay	Uygulanmaz
9xxx (Döküm)	Diğer elementler	Uygulanmaz

3.1.1. Alüminyum – silisyum - bakır (Al-Si-Cu) döküm alaşımları

Alüminyuma farklı oranlarda silisyum ve bakır ilavesiyle elde edilirler. Bakır dayanım ve işlenebilirliği iyileştirme yönünde etki gösterirken, silisyum ise dökülebilirlik kabiliyeti ve sıcak gevreklik özelliklerini geliştirmektedir. Karmaşık dökümler için basınçlı döküm ve metal (kokil) kalıba döküm işlemleri için yüksek ötektikaltı silisyum oranlarını içeren alaşımlar kullanılmaktadır. Al-Si-Cu alaşımının içerdiği bakır oranı %5,6’dan az ise ısıtıl işleme tabi tutularak daha iyi sonuçlar elde edilmektedir [30].

3.1.2. Alüminyum – silisyum - magnezyum (Al-Si-Mg) döküm alaşımları

Al-Si alaşımına magnezyum ilavesiyle elde edilmektedir. Bu alaşımlar, mükemmel döküm özelliklerine sahiptir ve uygulanan ısıtıl işlem sonrasında çok daha iyi özelliklere sahip olmaktadır. Korozyona karşı dirençleri son derece iyi olmasının yanı sıra, düşük termal

genleşme özellikleri ile öne çıkmaktadır. Yüksek mukavemete sahip Al-Si-Cu alaşımları kadar dayanıklı olmasalar da, birçok Al-Si-Mg alaşımı da birçok malzemeye göre yüksek seviyesinde mekanik özelliklere sahiptir [30].

3.1.3. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler

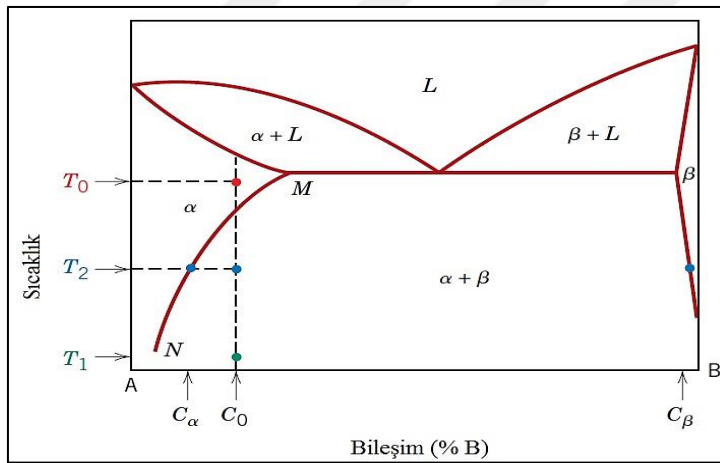
Metal bir ürünün metalurjik yapısını değiştirmek, mekanik özelliklerini geliştirmek ve kalıntı gerilmeleri azaltmak için yapılan ısıtma ve soğutma işlemlerine ısıt işlem denir. Alüminyum alaşımlarının ısıt işlemi, çeliklerden göre önemli ölçüde farklıdır. Mg ve Cu, alüminyum alaşımına ısıt işlem yapılabilir ve yaşlandırılabilir özelliği kazandıran ana alaşım elementleridir [32]. Isıt işlemler için kullanılan kodlamalar (harfler, rakamlar) ve bunların açıklamaları Çizelge 3.4'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. Isıt işlemler için kullanılan kodlamalar (harfler, rakamlar) ve bunların açıklamaları [31]

Isıt İşlem	Açıklama
F	İmalat sonrası herhangi bir işlem görmemiştir.
O	Dövme alaşımlara işlenebilirlik için yumuşatma tavı uygulanmıştır
H1	Sadece plastik şekil verilmiştir.
H2	Plastik şekil verme işlemi ve ardından parçaya ek bir ısıt işlem uygulanmıştır.
H3	Düşük sıcaklıklarda ısıt işlem veya imalat sırasındaki sıcaklıktan yararlanılarak normalleştirilir.
H4	Plastik şekil verilmiş ve boyanmıştır.
T1	Döküm ve ekstrüzyon sırasında oluşan sıcaklıktan soğumaya bırakılarak doğal yaşlandırılmıştır.
T2	Yüksek sıcaklıktan soğutulmuş, soğuk plastik şekil verilmiş ve doğal yaşlandırılmıştır.
T3	Çökelme sertleştirilmesi yapılmış, soğuk dövülmüş ve doğal yaşlandırılmıştır.
T4	Çökelme sertleştirilmesi yapılmış ve doğal yaşlandırılmıştır.
T5	Yüksek sıcaklıktan soğutulduktan sonra yapay yaşlandırılmıştır.
T6	Çökelme sertleşmesi yapılmış ve yapay yaşlandırılmıştır.
T7	Çökelme sertleşmesi yapılmış ve fazla yaşlandırılmıştır.
T8	Çökelme sertleşmesi yapılmış, soğuk dövülüş ve yapay yaşlandırılmıştır.
T9	Çökelme sertleşmesi yapılmış, yapay yaşlandırıldıktan sonra soğuk dövülmüştür.
T10	İmalat sıcaklığından soğutulup soğuk dövüldükten sonra yapay yaşlandırılmıştır.

Çökelme sertleşmesi; birbiri içerisinde çözünebilen ve faz denge diyagramlarında çözünme eğrisi bulunan alaşımlarda, ısıtma ve belirli hızda soğutulularak ikincil fazın ana faz içerisinde homojen çökeltiiler şekilde dağıtılmasıyla alaşımın sertlik ve mukavemetinin artırılması işlemidir. İkincil faz partikülleri, çökelti oluşturur ve tane sınırlarına homojen olarak dağılır. Bunlar, dislokasyon hareketlerini kısıtlayarak veya sonlandırarak alaşımın mukavemetinin artmasını sağlar [31].

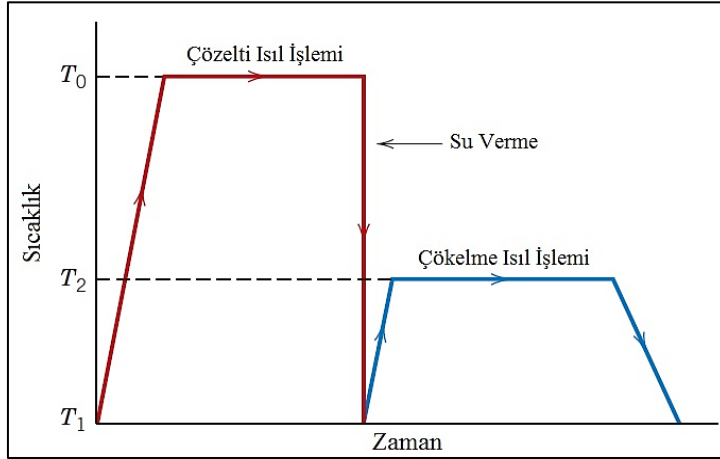
Çökelme sertleşmesi, genel olarak iki farklı ısıl işlemle yapılmaktadır. Birincisi, Şekil 3.3'te C_0 bileşimine sahip bir alaşımı α fazı alanında, T_0 sıcaklığına ısıtma ve mevcut olabilecek tüm β fazının T_0 'da bekletilmesiyle tamamen çözünmesini sağlayan bir çözelti ısıl işlemidir. Bu noktada alaşım, C_0 bileşiminde sadece bir α fazından oluşur. Bu işlemi, herhangi bir β fazının oluşumu önlenildiği ölçüde, su verme ile birçok alaşım için oda sıcaklığı olan T_1 sıcaklığına soğutma takip eder. Bu sebeple, T_1 'de yalnızca B atomları ile aşırı doymuş α -fazı katı çözeltisinin bulunduğu bir dengesizlik mevcut olup, bu durumda alaşım nispeten yumuşak ve zayıftır [24].



Şekil 3.3. A-B ikili faz diyagramı ve çökelmeyle sertleşebilen C_0 bileşimi [24]

İkinci olarak çökelme ısıl işleminde; aşırı doymuş katı çözelti, $\alpha+\beta$ iki fazlı bölgedeki bir sıcaklık olan Şekil 3.3'teki T_2 'ye ısıtılır. β çökelti fazı, C_β bileşiminin ince dağılmış parçacıkları olarak oluşmaya başlar ve bu süreç yaşlanma olarak da adlandırılır. T_2 'de uygun yaşlandırma süresinden sonra alaşım oda sıcaklığına soğutulur. Bu aşamada soğutma hızı önemli değildir. Çözelti ve çökelme ısıl işlemleri Şekil 3.4'teki zaman-sıcaklık grafiğinde gösterilmiştir. Oluşan β parçacıklarının karakterleri, işlem sonrasında alaşımın mukavemeti ve sertliği bakımından çökelme sıcaklığı (T_2) ve yaşlandırma süresine bağlıdır (T_6 işlemi).

Bazı alaşımlar için uzun zaman boyunca oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanma da sağlanmaktadır (T4 işlemi) [24].



Şekil 3.4. A-B ikili alaşımındaki C_0 bileşiminin çökelme sertleşmesi işlem aşamaları [24]

3.1.4. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler (Al-MMK)

Al-MMK ile ilgili araştırmalar 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Bu malzemeler üzerinde bugüne kadar çapta hem teorik hem de teknik araştırmalar yapılması için dünya genelinde Ar-Ge çalışmalarına çok fazla insan ve kaynak ayrılmıştır. Al-MMK en çok çalışılan ve araştırılan kompozit malzemelerdendir [6].

Alüminyum ve alaşımları; hafifliği, korozyon direncinin yüksek olması, işlenmesinin kolaylığı, yüksek özgül mukavemeti, çok iyi termal ve elektriksel özelliklere sahip olmasına karşın, sertliği ve aşınma direncinin azlığı ile düşük ergime sıcaklığına bağlı olarak düşük termal özellikleri bulunan bir malzemedir. Bu özellikleri geliştirmek için alüminyum ve alaşımlarına genellikle takviye ilaveleri yapılarak Al-MMK malzemeler üretilir. Bunun sonucunda genel olarak termal ve mekanik özellikler geliştirilmektedir [6].

Al-MMK'de matris bileşenleri olarak; Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Mg gibi alaşımları kullanılmaktadır. Al-MMK üretiminde; Al_2O_3 , C, B, B_4C , BN, SiC ve SiO_2 gibi takviyeler kullanılır. Alüminyum alaşımına SiC takviyesi kullanıldığında, daha yüksek çekme dayanımı, daha iyi sertlik ve aşınma direnci elde edilir. Al_2O_3 takviyesi aşınma direnci ve basma dayanımını artırmaktadır. Çok yüksek sertlik için B_4C takviyesi tercih edilir [7].

Al-MMK'in günümüzde birçok mühendislik uygulaması vardır. Endüstriyel uygulamalardan bazıları aşağıda verilmiştir. Bunların arasında;

- Otomobil Sektörü: Fren diski, fren rotorları, biyel kolları, motor blokları, akım kollektörleri ve kardan milleri gibi bileşenler,
- Havacılık ve Uçak Endüstrisi: Havayollarında, uçak gövdesinde, askeri uçaklarda ve kargoda uçak kanatları ve destekleyici yapı elemanları,
- Demiryolu Taşımacılığı: Vagon imalatında kullanılan yapısal parçalar,
- Deniz taşımacılığı: Gemi ve tekne yapısal elemanları,
- Açık Deniz Uygulamaları: Açık deniz platformları ve deniz duvarları,
- Yapı ve inşaat malzemeleri: İnşaat ve mobilyalarında,
- Ambalaj ve Konteyner Sektörü: İçecek şişeleri, konserve kutuları, endüstriyel folyo ve besin ambalajları,
- Spor ve Rekreasyon: Alüminyum matrisli B ve SiC takviyeli spor malzemeleri,
- Elektrik iletimi: Yüksek korozyon direnç iletim elemanları yer almaktadır [33].

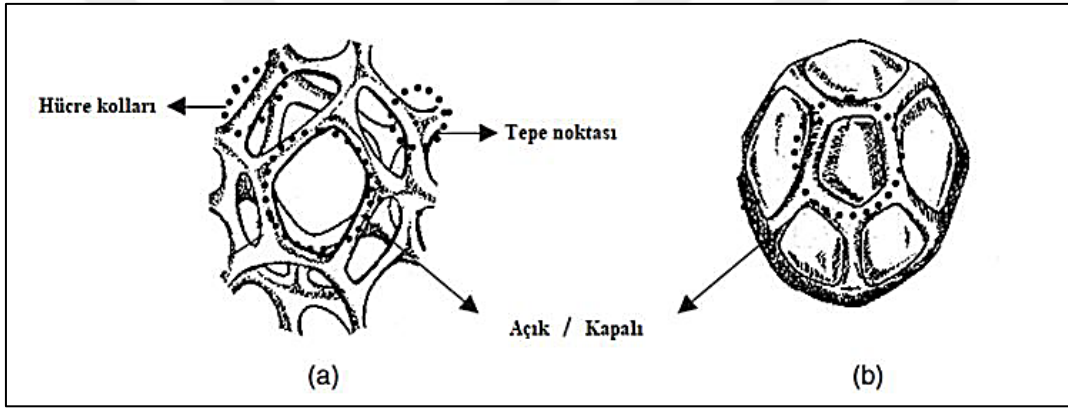
3.2. SiC (Silisyum Karbür) Takviye Elemanı

SiC, kuvvetli kovalent bağa sahip yapay bir malzemedir. 1891'de Acheson tarafından tesadüfen sentezlenmiştir [2]. SiC, kum formundaki SiO_2 ve kok formundaki C'nun elektrikli bir fırında 2400 °C'deki reaksiyonu ile elde edilir [18]. SiC'ün ergime sıcaklığı 2730 °C, yoğunluğu 3,22 g/cm³, tetrahedral kristal yapılı, oda sıcaklığında katı, rengi koyu gri ve seramik formunda bir malzemedir [2].

SiC, MMK'nin mekanik ve aşınma dayanımını önemli ölçüde artırır. Yaygın olarak hem refrakter hem de aşındırıcı olarak kullanılan SiC; demir-çelik yapımında metalürjik katkı olarak, elektriksel özellikleri sayesinde ısıtıcı direnç elemanlarında ve elektrik devrelerinde de kullanılmaktadır [2]. SiC'ün öne çıkan bazı özellikleri arasında; mükemmel sertlik ve aşınma direnci, mükemmel korozyon direnci, ani sıcaklık değişimlerine karşı direnç, çeliğe göre daha yüksek ısı iletimi, çok düşük ısıl genleşme sayılabilir [18].

3.3. Gözenekli Seramikler (Köpük Şekilli Seramikler)

Üretimi ve kullanımı son yıllarda önemli oranda ilgi gören gözenekli seramikler; teknolojik uygulamalarda düşük yoğunluk, yüksek yüzey alanı, yüksek geçirgenlik, yüksek ısı yalıtımı ve düşük özgül ısı gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Bunlar hücreli yapısına göre; açık ve kapalı hücreli olarak sınıflandırılırlar (Şekil 3.5). Kapalı hücreli seramik köpükler genellikle yangın koruma ve ısı yalıtımı uygulamaları için kullanılırken, açık hücreli seramik köpükler ise özellikle sıvı metal filtrasyonu, sıcak gaz filtrasyonu ve dizel motor egzoz filtreleri ile MMK veya PMK üretiminde takviye bileşeni olarak da kullanımları yaygındır [34].



Şekil 3.5. Köpüklerin (a) açık ve (b) kapalı hücreli yapıları [34]

Gözenekli malzemeler; IUPAC (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) tarafından, gözenek çapına (d) göre makro gözenekli ($d > 50$ nm), orta gözenekli (50 nm $> d > 2$ nm) ve mikro gözenekli ($d < 2$ nm) olmak üzere 3 sınıfa ayrılır [35].

Gözenekli malzemelerde gözeneklilik, 1 inç doğru üzerindeki gözenek sayısı (ppi) ile ifade edilir. Bir malzemede ppi değeri fazla ise ortalama gözenek çapı küçük, gözenek sayısı fazla ve gözenekler birbirine yakın demektir. Örneğin 45 ppi bir malzemede 1 inç doğru üzerinde 40-50 adet gözenek bulunur [2].

3.3.1. Gözenekli seramiklerin üretim yöntemleri

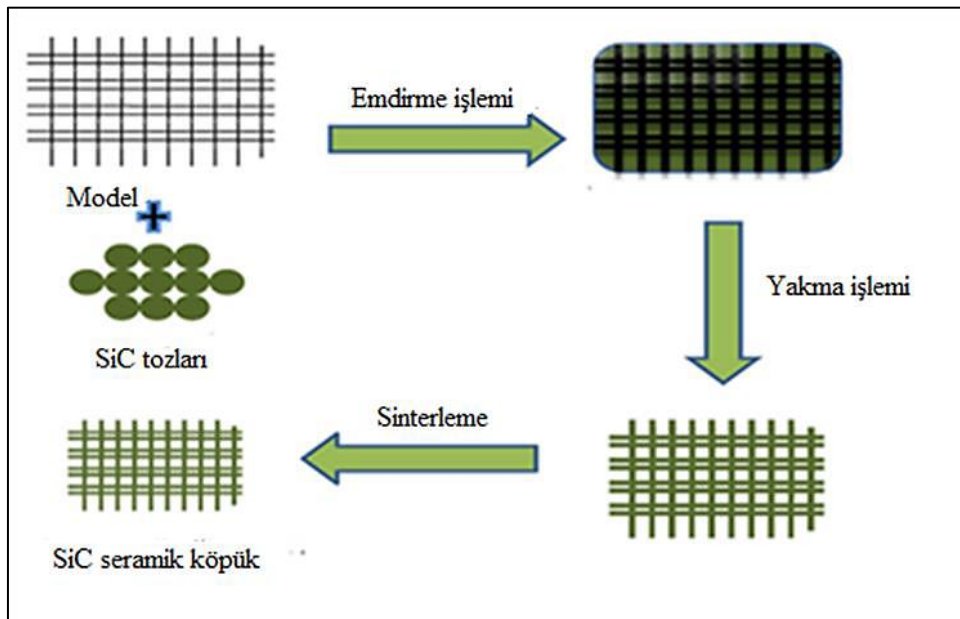
Seramik köpüklerin üretim yöntemleri; kısmi sinterleme, replikasyon tekniği, harcanan malzeme ve doğrudan köpükleştirme olarak dört sınıfa ayrılabilir [34].

Kısmi sinterleme

Gözenekli seramikleri üretmenin en kolay yöntemi toz bileşenin kısmi sinterlenmesidir. Bu yöntemle düşük sıcaklık ve sürelerde yoğun malzemeler elde etmek mümkündür. Toz partikülleri, sinterlenme sıcaklığında boyun verir ve bunun sonucunda tozlar arasında hapsolan boşluklardan gözenekler meydana gelmektedir. Gözeneklilik derecesi, sinterleme işleminin en uygun hale getirilmesiyle kontrol edilebilir. Gözenek büyüklüğü toz partiküllerin başlangıç tanecik boyutuyla belirlenir [34].

Replikasyon tekniği

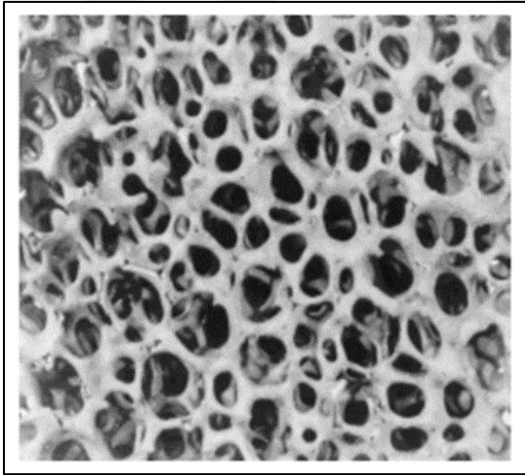
Replikasyon yöntemini 1963'te Schwartzwalder ve Somers ortaya çıkarmıştır. Bu teknik, ilk üretim yöntemlerinden birisidir. Endüstride makro gözenekli seramik köpük üretiminde hala en yaygın olarak kullanılan tekniktir. Açık hücreli bir polimer köpük, seramik çamurla kaplanır, fazla çamur polimerden uzaklaştırılır, ardından sinterlenir ve polimerin yanmasıyla köpük üretilir. Bu teknikte, polimer malzemesi olarak polistiren (PS), poliüretan (PU), polivinil klorür (PVC) ve selüloz tercih edilmektedir. Organik köpükler; tekrarlanabilmeli, sıkıştırıldıktan sonra geriye dönebilmeli ve sinterleme işlemi sonunda gözenekli seramiğe zarar vermeden tamamen yanma özelliğini göstermelidir [34]. Replikasyon yöntemi, Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Replikasyon yöntemi ile gözenekli SiC üretim aşamalarının şematik gösterimi [34]

Hazırlanan seramik çamuru polimer köpüğe emdirilerek poliüretanın yüzeyleri kaplanır. Çamura daldırılan köpüğün sıkıştırılarak havası alınır. Seramik çamurun içindeyken, köpüğün yeniden genişlemesine fırsat verilir ve köpüğün açık hücrelerine doğru bu çamur emilir. Arzu edilen kaplama yoğunluğuna ulaşmak için bu aşama birkaç kez tekrarlanabilir [34].

Köpük, uygun bir şekilde kaplandıktan sonra bir fırında kurutulur. Daha sonra organik katkıları seramik çamurdan uzaklaştırmak ve polimerin yakılması için yüksek sıcaklıkta sinterleme yapılır. Sinterleme işleminin sonucunda Resim 3.1'deki gözenekli seramik elde edilir [34].



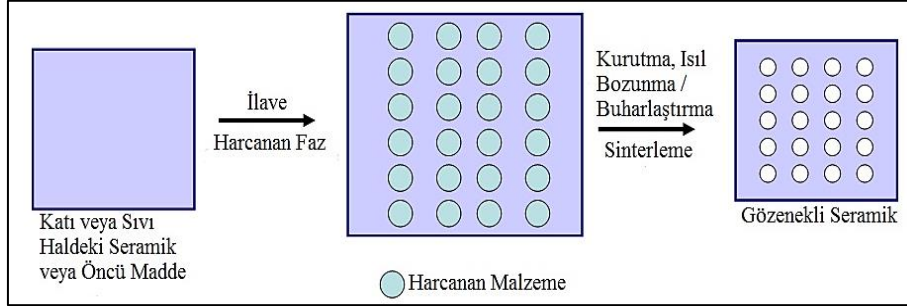
Resim 3.1. Replikasyon yöntemi ile üretilmiş gözenekli seramik [34]

Harcanan malzeme

Gözenek oluşturuıcı madde olarak uygun miktarlarda harcanacak malzemelerin ham seramik tozu ile karıştırılması ve sinterleme öncesi veya sırasında yakılarak veya buharlaştırılarak gözenek oluşturma şeklinde de gözenekli seramikler üretilir [35]. Gözenek oluşturuıcı maddeler genel olarak;

1. Sentetik Organik Maddeler: Polimer boncuklar, organik lifler vb.
2. Doğal Organik Maddeler: Patates nişastası, selüloz, pamuk vb.
3. Metalik ve İnorganik Maddeler: Nikel, karbon, uçucu kül, cam parçacıkları vb.
4. Sıvılar: Su, jel emisyon vb. şeklinde sınıflandırılır [35].

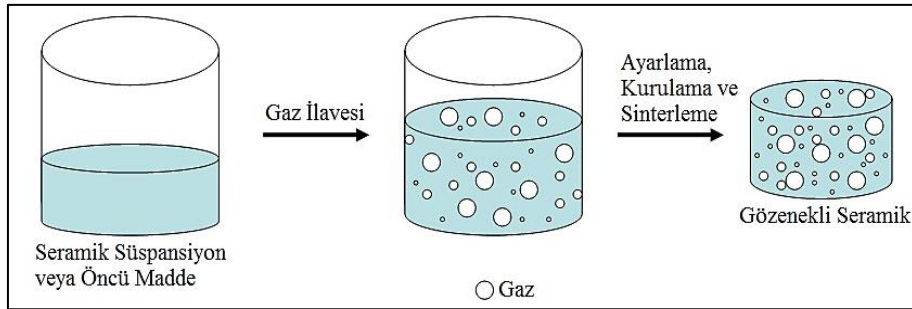
Gözeneklilik, maddelerin miktarına bağlıdır ve boyutları başlangıç tozları veya matris taneciklerinin boyutundan büyük olduğunda, gözenek şekli ve boyutu da sırasıyla maddelerin şeklinden ve boyutundan etkilenir [35]. Harcanan malzeme yöntemi, Şekil 3.7’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Harcanan malzeme yöntemi ile gözenekli seramik üretim aşamaları [36]

Doğrudan köpükleştirme

Gaz kabarcıklarının sıvı bir ortam veya çamur içine ilave edilmesi ve ardından gaz kabarcıklarının oluşturduğu gözenekli yapıların elde edilmesi şeklinde oluşturulur. Elde edilen gözenekli seramikler sinterlenir [36]. Doğrudan köpükleştirme yöntemi Şekil 3.8’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Doğrudan köpükleştirme ile gözenekli seramik üretimi [36]

Seramiğin gözenekliliği, köpürtme işlemi sırasında sıvı ortama veya çamura ilave edilen gazın miktarına bağlıdır. Gözenek boyutu ise sertleşmeden önceki ıslak köpük kararlılığına bağlıdır. Bununla birlikte, ıslak köpüğe serbest enerjiyi azaltma işlemleri uygulanarak kararsızlaştırılır. Bu işlemler, gaz kabarcıklarının boyutunu artırır ve büyük gözenekli ürün elde edilir [36].

3.3.2. Gözenekli SiC

Gözenekli SiC seramikler; ısı iletkenliği düşük, yoğunluğu düşük, özgül mukavemeti yüksek, termal şok direnci yüksek, kimyasal kararlılığı iyi, sıvı geçirgenliği iyi ve korozyon direnci yüksek malzemelerdir. Gözenekli SiC'ler; sıvı metal filtreleri, dizel partikül filtreleri, sıcak gaz filtreleri, gaz difüzörleri, su arıtma membranları, ısı ıalıtkanlar, katalizör destekleri ve hafif yapısal parçalar gibi birçok uygulama için büyük potansiyele sahiptir [37].

Gözenekli SiC'lerin özelliği ve performansı; mikro yapı, gözeneklilik oranı, gözenek boyutu ve gözenek morfolojisi gibi özelliklerle yakından ilişkilidir. Örneğin; küçük gözenekli SiC'lerin eğme mukavemeti, eşdeğer bir gözeneklilikte fakat daha büyük gözeneklere sahip seramiklerin eğme mukavemetinden daha yüksektir. Ancak, gözeneklilikteki fazla miktardaki artış genel olarak mekanik özelliklere olumsuz yansımaktadır. Geçirgenlik, gözeneklilik oranı ve gözenek boyutu ile artmaktadır. Ancak gözenekliliğin artması, SiC'lerin ısı iletkenliğini ise azalmaktadır [37].

3.4. MMK'in Üretim Yöntemleri

MMK'in üretim yöntemi; matris ve takviye bileşenine, üretilecek olan parçanın şekline ve arzu edilen fiziksel özelliklerine göre belirlenir. MMK'in üretim yöntemi üç ana gruba ayrılır. Bunlar; katı hal, sıvı hal ve diğer üretim yöntemleridir [16].

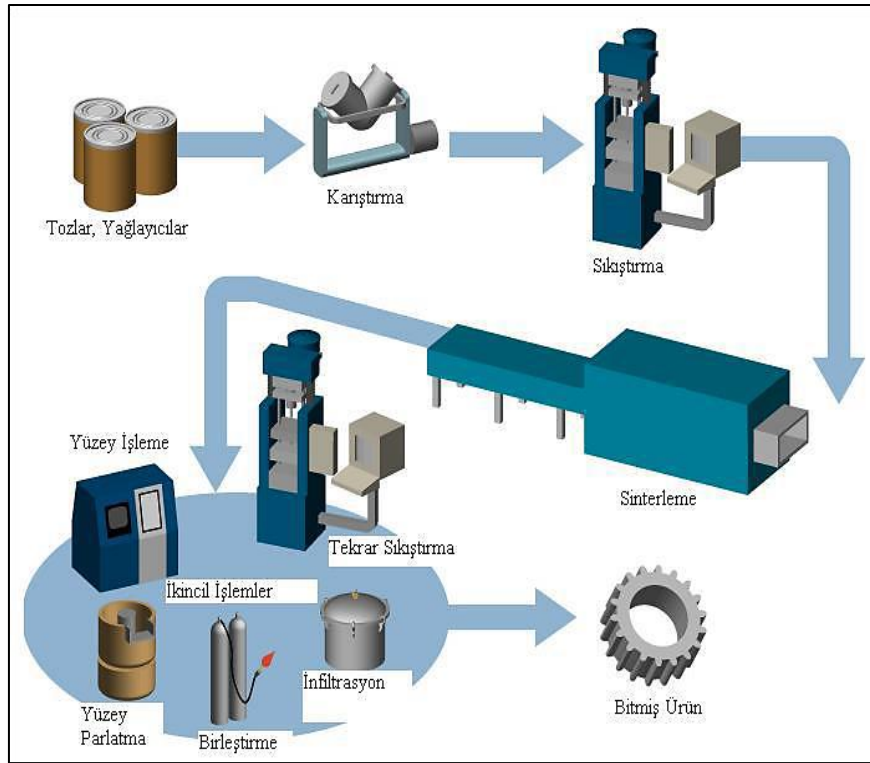
3.4.1. Katı hal üretim yöntemleri

Matris bileşenlerinin ergime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta kompozit üretimine katı hal yöntemleri denir. Katı hal üretim yöntemleri; Toz metalürjisi ve difüzyon bağlanmasıdır [16].

Toz metalürjisi

Toz metalürjisi yönteminde, genellikle toz matris alaşımının ve takviye bileşenlerinin karıştırılmasının ardından şekillendirilmesi ve katı halde sinterlenmesi süreçleri vardır. Bu üretim metodunda diğer üretim yöntemlerine göre daha düşük sıcaklıklar kullanılır. Bu nedenle matris ve takviye bileşenleri arasında daha az kimyasal ve fiziksel etkileşim olur. Bütün partiküllerin yapı içerisine homojen olarak dağıtılması, iyi bir mikroyapı elde etmek

için oldukça önemlidir [38]. SiC, TiC ve grafit en çok kullanılan takviye bileşeni iken Al, Ti, Cu ise en çok kullanılan matris bileşenidir. Matris ve takviye bileşenleri, kullanım amacına göre değişiklik gösterebilir [16]. Genel olarak toz metalürjisi ile üretilen MMK, diğer üretim yöntemlerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahiptir [38]. Şekil 3.9’ da toz metalürjisi ile MMK üretimi aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Toz metalürjisi ile MMK üretim aşamalarının şematik gösterimi [16]

Tüm metal işleme teknolojileri arasında en kapsamlı şekillendirme ve üretim süreçlerine sahip olan toz metalürjisi teknolojisinin yüksek kaliteli, karmaşık şekilli parçaların arzu edilen toleranslarda kayıpsız veya çok az kayıpla ekonomik olarak üretilebilmesi, bu yöntemi öne çıkaran en önemli unsurdur [38].

Difüzyon bağlama

Vakum presleme olarak da bilinen difüzyonla bağlama, en pratik katı hal üretim yöntemlerinden birisidir. Difüzyonla bağlanma, sıvı hal yöntemlerinden daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için takviye bileşeninin bozunması ve ayrışması ihtimali oldukça azdır. Matris bileşeni metal levha veya folyo şeklinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde takviye bileşeni, folyo şeklindeki metal matris üzerine arzu edilen miktarda açılı şekilde

yerleştirilebilir. Daha sonra belirli bir sıcaklıkta preslenerek veya haddelenerek takviye ile matris arasında bir bağ oluşturmak suretiyle kompozit malzeme üretilir. Difüzyon bağının ölçüsü, kompozitin mukavemetini belirlemektedir. Difüzyon bağı için takviye ve matrisin yüzeyinin pürüzsüz ve temiz olması gerekir. Difüzyon bağı oluşturma işlemi, vakum altında haddelenerek yapılırsa verim artar. Bu yöntemde katmanlar tek tek oluşturulup düzenlenir ve sıcak pres uygulanır. Sınırlı sayıda malzeme çeşidi için uygun, fakat pahalı bir yöntemdir. Matris bileşeni olarak alüminyum ve titanyum alaşımları; takviye bileşeni olarak Al_2O_3 , SiC, C, B fiberleri kullanılmaktadır [16].

3.4.2. Sıvı hal üretim yöntemleri

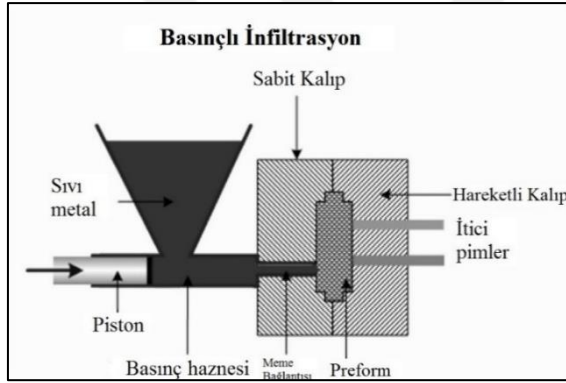
Sıvı hal üretim yöntemleriyle MMK'in üretimi, nispeten basit ve ekonomik oldukları için tercih edilmektedir. Bu yöntemler, sıvı metalin preformlara veya paket haldeki fibere infiltrasyon (sızdırma) ya da sıvı metalin takviye partikülleri ile karıştırılması gibi işlemlerdir [29]. Kendiliğinden infiltrasyon, basınç infiltrasyonu, vakum infiltrasyonu, gaz basınçlı infiltrasyon, sıkıştırılmalı döküm infiltrasyonu, karıştırma döküm ve savurma döküm gibi işlemler sıvı hal yöntemlerinden bazılarıdır [29, 33].

Kendiliğinden infiltrasyon

Basınçsız infiltrasyon olarak da bilinen kendiliğinden infiltrasyonda, sıvı metal boşluklara girdiğinde herhangi bir dış basınç veya kuvvet uygulanmamaktadır. İyi ıslatabilirlik için gazlı atmosfer ve kontrollü sıcaklık gereklidir. Al-Si, Al-Zn ve Al-Mg alaşımlarının SiC preformlarına basınçsız infiltrasyonu üzerine birçok çalışma yapılmasına rağmen, yöntemin uygulamasını sınırlayan birçok zorluk da bulunmaktadır. Takviye ve matris arasındaki ıslatabilirliğin zayıf olması, basınçsız infiltrasyonun en büyük dezavantajıdır. Ayrıca basınçsız infiltrasyon, sıvı metal yüzeyinde oksit tabakasının oluşmasına da neden olmaktadır [33]. Zayıf ıslanabilirlik, Al-SiC bazlı kompozitlerin ara yüzeyinde Al_3SiC_4 ve Al_4C_3 gibi intermetalik oluşumuna neden olan istenmeyen reaksiyona neden olduğundan dolayı imalat sürecini yavaşlatır. Basınçsız infiltrasyon sürecinde aktivatör kullanımı ve bunun içeriği konularında çalışmalar devam etmektedir [33].

Basınçlı infiltrasyon

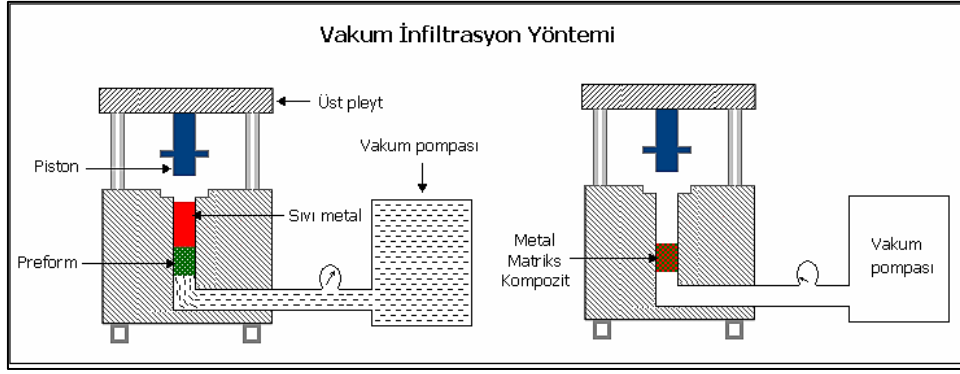
Basınçlı infiltrasyon, bir takviye malzemesi ile doldurulmuş kalıp içinde sıvı metal veya alaşımin basınç yardımıyla doldurulması ve katılaştırılması sonucunda yüksek takviye katkı oranının sağlandığı bir yöntemdir [29]. Basınçlı infiltrasyonda sıvı metal, basınç haznesine doldurulur (Şekil 3.10). Ardından, sıvı metal haznedeki kalıba basınç etkisiyle dökülür ve kalıp içinde soğumaya bırakılır. Malzeme, kalıpta katılaştıktan sonra itici pimler kullanılarak kompozit kalıptan çıkarılır. Basınçlı infiltrasyon işleminin başlıca avantajları; karmaşık parça üretimi, daha düşük maliyet ve yüksek hassasiyettir [33]. Basınçlı infiltrasyon yöntemi, dökümün kalitesi takviyeyi ısıtılan matrisle bağılı olmamasından dolayı diğer üretim yöntemlerine göre daha yüksek kalitede kompozit üretebilmeye olanak sağlar [29].



Şekil 3.10. Basınçlı infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi [33]

Vakum infiltrasyon

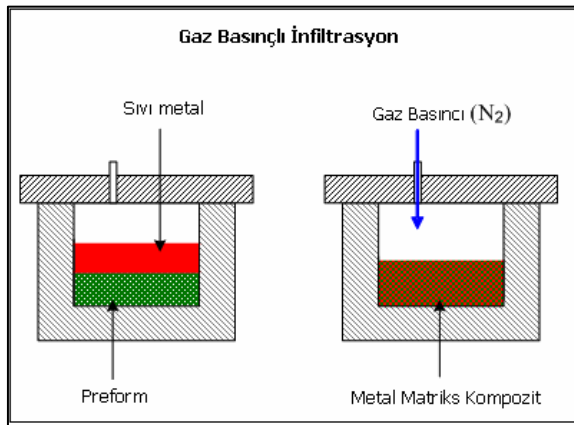
Vakum infiltrasyon yönteminde, sıvı metal oksidasyonunu ve gaz boşluğu olasılığını azaltmak için vakum kuvveti uygulanmaktadır. Kalıp boşluğuna gözenekli seramik preform yerleştirilir (Şekil 3.11). Sıvı metal alaşımı, bu preform içine vakum etkisi ile emdirilir. Sıvı metal alaşımı preforma tamamen emdirildikten sonra nihai ürün olan kompozit malzeme kalıptan çıkarılır. [2]. Vakum infiltrasyonunda; infiltrasyon sıcaklığı, infiltrasyon süresi ve uygulanan vakumun düzeyi gibi işlem şartları önemli rol oynar. Sıvı metal sıcaklığının artmasıyla infiltrasyon hızının arttığı gösterilmiştir [33]. Bu yöntem bazen basınçlı gaz ya da sıkıştırılmalı döküm ile kombine şeklinde de uygulanır [2].



Şekil 3.11. Vakum infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi [2]

Gaz basınçlı infiltrasyon

Gaz basınçlı infiltrasyon yöntemi, kompozit malzemelerin büyük ölçekli üretiminde kullanılır [33]. Bu yöntemde genellikle azot gazı (N_2) kullanılır. Kalıpta, gözenekli seramik preform alt kısma ve sıvı metal ise üst kısma gelecek şekilde yerleştirilir (Şekil 3.12). Sıvı metal yüzeyine belirli basınçla N_2 uygulanarak bu gaz basıncının itici etkisi ile sıvı metal, preform içerisine doğru doldurulur (infiltrate edilir). Preforma sıvı metal emdirildikten sonra parça soğumaya bırakılır ve sonrasında parça kalıptan çıkarılarak MMK üretimi tamamlanır [2].

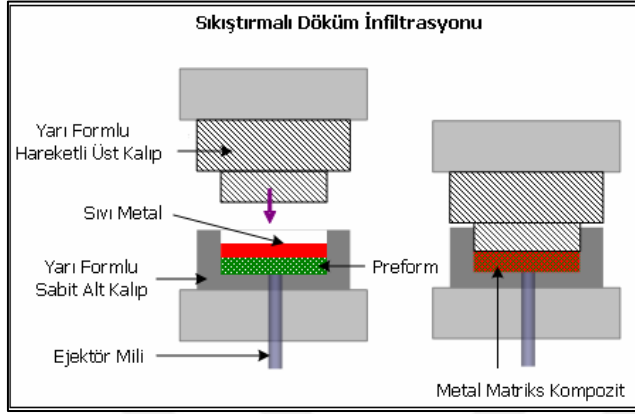


Şekil 3.12. Gaz basınçlı infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi [2]

Sıkıştırılmalı döküm infiltrasyon

Sıkıştırılmalı döküm infiltrasyon yöntemi; şekillerin, hacim oranının, kimyanın ve takviye dağılımının kontrolü ile net şekilli MMK üretiminde yaygın olarak kullanılan üretim yöntemlerinden birisidir [33]. Bu yöntemde; hareketli üst kalıp, sıvı metale mekanik basınç

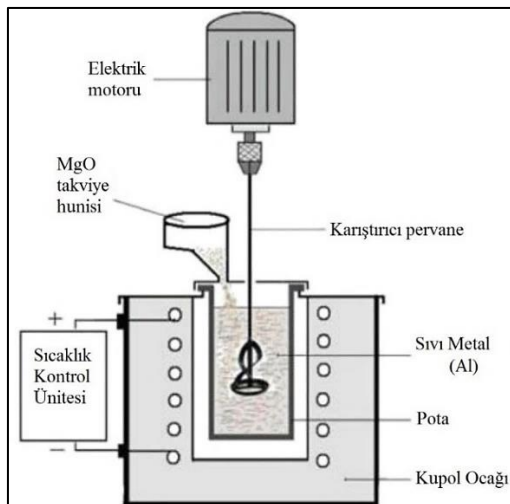
uygular (Şekil 3.13). Bunun sonucunda sıvı metalin, kalıba yerleştirilmiş gözenekli seramik preformun içerisine doğru nüfuz ettirilir. İnfiltrasyon bittğinde parça soğutulur. Daha sonra parçanın kalıptan çıkarılmasıyla MMK üretimi tamamlanır [2].



Şekil 3.13. Sıkıştırma döküm infiltrasyon yöntemi ile MMK üretiminin şematik gösterimi [2]

Karıştırmalı döküm

Karıştırma döküm yöntemi; en basit ve en düşük maliyetli MMK üretim yöntemidir. Bu yöntemde, takviye malzemesi sıvı metal içine mekanik karıştırıcı ile karıştırılır (Şekil 3.14). Sıvı haldeki kompozit malzeme geleneksel döküm yöntemine benzer şekilde bir kalıba dökülerek işlem tamamlanır. Bu işlemlerdeki birçok üretim şartı kompozitin mikro yapısını ve özelliklerini etkiler [39]. Karıştırma döküm yöntemiyle Al matrisli Magnezyum oksit (MgO) takviyeli MMK üretimi, Şekil 3.14'te şematik olarak gösterilmiştir.

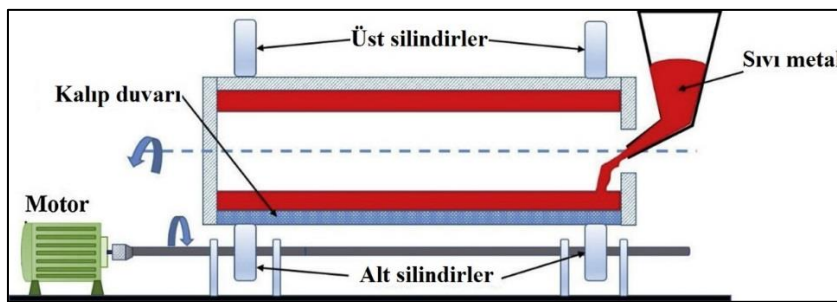


Şekil 3.14. Karıştırma döküm yöntemi ile Al matrisli MgO takviyeli MMK üretimi [33]

Karıştırılmalı dökümde önemli parametreler; mekanik karıştırıcının dönme hızı, döküm hızı, döküm sıcaklığı ve kalıp ömrü olarak sayılabilir. Yırtılmaları önlemek için yüksek karıştırma hızı tavsiye edilir. Yüksek döküm sıcaklığı; sütun şeklinde tane büyümesine, metalin kolay akışına ve soğuk birleşmenin engellenmesine imkan sağlar. Düşük döküm sıcaklığı ise tane incelmesini neden olur. Karıştırılmalı dökümde düşük döküm hızı, yönlü katılaşmayı sağladığından dolayı sıcak yırtılma ihtimalini azaltmaktadır. Yüksek döküm hızı ise aşırı türbülansa neden olmaktadır [39].

Savurma döküm

Savurma döküm yönteminde sıvı metal, dökümleri geliştirmek veya üretmek için hızla dönen bir kalıba dökülür (Şekil 3.15) [39]. Bu yöntemde metal, önemli basınç altında merkezkaç kuvveti ile kalıp yüzeyine doğru savurur. Temel olarak dikey ve yatay eksenli savurma döküm olarak sınıflandırılır [29]. Dikey savurma dökümde; sıvı metal, kalıp içine dökülürken kalıp kendi ekseninde etrafında döner. Metal katılaşırken sürekli merkezkaç kuvveti metale etki edecektir. Yatay savurma yönteminde ise döküm sırasında sıvı metal kalıbın uzunluğu boyunca dağıtılır ve savurma kalıbı yatay eksen boyunca hareket eder. Savurma döküm; fren kampanaları, pistonlar, yataklar, gömlekler, manşonlar, valf gövdeleri ve kap gövdeleri gibi otomobil parçalarını üretmek için kullanılır [39]. Şekil 3.15'te tipik bir yatay savurma döküm makinesi gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Yatay savurma makinesinde üretim [29]

3.4.3. Diğer üretim yöntemleri

Katı hal ve sıvı hal üretim yöntemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda diğer üretim yöntemlerine başvurulur. Bu yöntemler; vidalı ekstrüzyon, in-situ, XD, rheocasting ve compocasting yöntemleridir [16].

Vidalı ekstrüzyon

Vidalı ekstrüzyon yöntemi, Mg alaşımlı kompozit malzemelerin üretimi için kullanılmaktadır. Matris bileşeni bir haznenin içerisine konulur, takviye bileşeni ile birlikte ilerlerken ısıtılıp karıştırılır. Ergime sıcaklığına yaklaşan matris bileşeni ile takviye bileşeni yarı katı halde kalıbın içerisine basılır. Yarı katı durumda olduğu için boşluklu yapı az ve parçacıklar katı halde eklendiği için koruyucu gaza ihtiyaç yoktur. Bu yöntemle sürekli kompozit malzemelerin üretimi yapılabilmektedir [16].

In-Situ

In-situ (yerinde) yöntemiyle kompozit malzeme üretimi sırasında elemenler arasında veya elementlerle bileşikler arasında yerinde kimyasal reaksiyon, metal matriste takviye bileşenin oluşmasına yol açar. Termodinamik ve reaksiyon kinetiğinin iyi anlaşılması, in-situ yöntemi kullanılarak istenen nihai ürünü elde etmek için gereklidir. In-situ yöntemiyle üretilen MMK’de takviye bileşenleri; termodinamik olarak kararlı, daha ince boyutlara sahip, yüzeyleri kirlilikten arındırılmış, matris içinde düzgün dağılmış ve daha güçlü parçacık-matris bağına sahip olmaktadır. Doğrudan ergiyik reaksiyonu, reaktif sıcak presleme ve kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezi MMK üretmek için geliştirilmiş in-situ yöntemi çeşitlerinden bazılarıdır. Bunlar arasında doğrudan ergiyik reaksiyonu; basitlik, düşük maliyet ve net şekle yakın şekillendirebilme nedeniyle ticari uygulamalar için en umut verici in-situ üretim çeşitlerinden biridir [33].

XD

XD tekniğinde sıvı metal içerisinde seramik bileşikler oluşturularak takviye partikülleri elde edilir. Bu partiküller, sıvı metal içerisinde oluşturulduğu için tek kristalli yapıdadır [16].

Rheocasting

Rheocasting yönteminde, ergimiş alaşımdan yarı katı bir malzeme hazırlanır. Katılaşma işlemi sırasında takviye partikülleri, bu bulamaç içinde mekanik olarak tutulur. Hazırlanan bulamaçlar, malzemeyi şekillendirmek için doğrudan bir kalıba aktarılır. Yoğun kesme ile MMK’in parçacık dağılımı çok daha iyi hale getirilir. Takviye partikülleri, alaşım kısmen katı durumdayken eklendiği için aglomerasyonu bu yöntemle önlenabilir. Rheocasting

yönteminde takviyeler, verilen çalışma sıcaklığında kararlı olmalı, reaktif olmamalıdır. SiC ve Al₂O₃, bu yöntemde en yaygın olarak kullanılan takviyelerdir. Karmaşıklık, çok düşük miktarda gözenek, azaltılmış katılaşma çekmesi, mükemmel metal dolgusu, mükemmel mekanik performans, ısıl işlem görebilme ve iyi yüzey kalitesi gibi MMK'in yüksek kaliteli döküm özellikleri bu yöntemle elde edilebilir. Rheocasting yöntemiyle üretilen parçaların çekme özellikleri, yerçekimi yönünde dökülerek üretilen parçaların çekme özelliklerinden daha iyidir [29].

Compocasting

Compocasting yönteminde sıvı metal kalıp boşluğuna dökülür ve katılaşma sırasında sıkıştırılarak birincil katı parçacıklar içeren yarı katı bulamaca dönüştürülür. Mekanik titreşim, mekanik karıştırma, elektromanyetik karıştırma ve soğutma eğilimi teknikleri ile takviye parçacıkları dağıtmak için bulamaç karıştırma yapılabilir. Yarı katı malzemedeki birincil katı parçacıklar sayesinde; aglomerasyon azalması, takviye parçacıkların daha iyi dağılımı, matriste ince tanelerin oluşumu ve karıştırmalı döküm yöntemine göre düşük gözeneklilik elde edilir. Yüksek üretim hızı ve kalıp ömrünü uzatmaya yardımcı olan düşük işlem sıcaklığı compocasting yönteminin başlıca avantajlarındanıdır. Karıştırma işlemi, alüminyum alaşımının katılaşma sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Bu nedenle ıslatabilirlik daha iyi durumdadır [29].

3.5. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

MMK'in; havacılık, otomotiv ve elektronik gibi çeşitli endüstrilerde uygulamaları vardır. Ayrıca ticari ve endüstriyel ürünlerde de bu malzemelerin potansiyel uygulamaları bulunmaktadır [40].

3.5.1. Havacılık

Havacılık uygulamalarında; düşük yoğunluk, uygun ısıl genleşme, iletkenlik, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet gibi özellikler istenmektedir. Performans, maliyetten daha önemli bir unsurdur. Sürekli fiber takviyeli MMK, parçacık takviyeli kompozitlere göre daha üstün performans gösterdiğinden, öncelikle havacılık uygulamalarında sıkça tercih edilir. Diğer uygulamalarda ise performansın yanında maliyet de önemli olduğundan dolayısıyla bu

etkenlerin en uygun kombinasyonu gereklidir. Bu nedenle parçacık takviyeli MMK'in havacılık dışı alanlarda kullanılmaktadır [22].

Bir parçanın ağırlığındaki azalma, havacılıkta herhangi bir uygulama için en önemli özelliktir. Örneğin; Hubble teleskobunda, dalga kılavuzu bomları için zift esaslı sürekli karbon fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozit kullanılmaktadır. Bu kompozitin ağırlığı düşük, elastik modülü yüksek ve termal genleşme katsayısı düşüktür [22].

Uçaklardaki mühendislik uygulamaları; mümkün olan düşük maliyetin yanı sıra mukavemet, kırılma tokluğu, yorulma ve korozyon direnci gibi üstün mekanik özellikleri gerektirdiği için uçak yapısına uygun olarak sadece Al-MMK daha büyük talep görmektedir [40].

3.5.2. Otomotiv

Otomotiv endüstrisi; maliyet konusu da göz önüne alınarak yakıt tasarruflu, düşük gaz emisyonlu ve güvenli araç üretmek için büyük ölçüde hafif malzemelere ilgi göstermektedir. Bu nedenlerle Al-MMK; özellikle yüksek mukavemetli ve hafif oldukları için motor uygulamalarında ve diğer yapısal bileşenlerde birçok avantajlar sunmaktadır. Özellikle SiC ve Al_2O_3 partikül takviyeli Al-MMK'lar; pistonlar, motor blokları, fren rotorları, tahrik milleri, bağlantı çubukları ve diğer yapısal mühendislik parçalarının üretiminde geniş bir yer edinmiştir. Pistonlar ve motor blokları göz önüne alındığında, Al-MMK'in uygulanmasıyla motor verimliliği artırılmıştır. Bununla birlikte, Al-MMK kullanılarak silindir basınçları da iyileştirilmiştir. Toyota firması, kısa Al_2O_3 fiber takviyeli MMK'i 1985'ten beri piston malzemesi olarak dizel motorunda kullanmaktadır. General Motors firması EV-1, Chrysler ve Lotus Elise gibi birçok üreticide alüminyum matrisli SiC parçacık takviyeli kompozitlerin fren rotorları ile ilgili olarak geniş uygulamaları vardır. Bu kompozit fren rotorları, ağırlığın %50 azalmasını sağlar ve dökme demire göre abrasif aşınma oranı da düşüktür [40].

3.5.3. Elektronik paketleme ve termal yönetim

MMK'in elektronik paketleme ve termal yönetim alanlarında sürekli olarak uygulamaları bulunmaktadır. Bu konuda; SiC takviyeli Al-MMK, karbon fiber takviyeli alüminyum ve bakır matrisli kompozitler, diğer kompozitler arasında tercih edilir malzemeler haline gelmiştir. Yüksek saflıkta SiC partikül takviyeli Al-MMK'in maliyetin bir miktar yüksek

olsa da yüksek ısı iletkenliğiyle ön plana çıkmaktadır. Bu kompozitler, net şekle yakın ve daha uygun fiyatlı üretim süreçleriyle üretilebildiklerinde dolayı geleneksel malzemelere göre önemli avantajlara sahip olmaktadır [40].

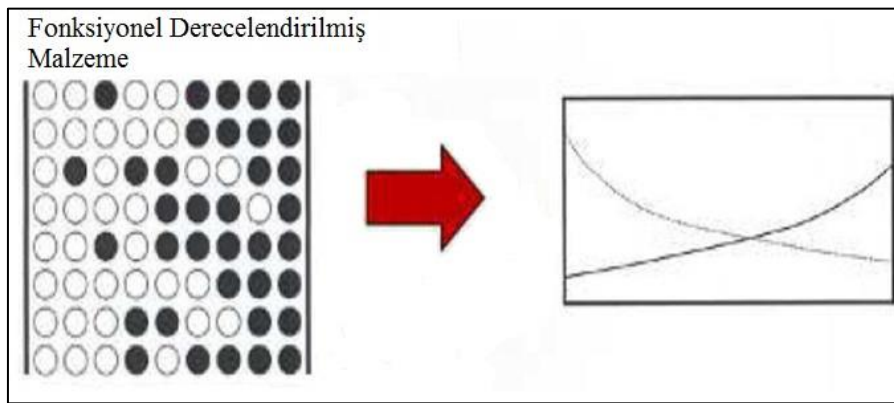
Bazı elektronik bileşenlerde malzemelerin termal iletim özelliklerinin yüksekliği nedeniyle talepler artmıştır. Bu nedenle üstün termal iletkenlikleri nedeniyle MMK'in kullanımının yolu açılmıştır. Üstün termal iletkenlikleri dikkate alındığında SiC takviyeli MMK, karbon takviyeli MMK ve elmas takviyeli MMK ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte Al-MMK; öncelikle yüksek dayanım ve düşük ağırlığın gerekli olduğu yerlerde, diğer matris malzemelerine kıyasla daha fazla talep görmektedir [40].

3.5.4. Ticari ve endüstriyel ürünlerde potansiyel uygulamalar

MMK'in karakteristik özellikleri, bu malzemelere birçok yaygın uygulamada da fırsat vermiştir. Bisiklet endüstrisinde, çerçeveler, gidonlar ve koltuk direkleri MMK'in bilinen uygulama alanlarındandır. Endüstri, bu noktada yapısal malzemelerin yüksek dayanıma sahip olmasını arzu eder. Örneğin, bir şirket bisiklet çerçevesi için 6061 alüminyum matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozit kullanmıştır. Diğer bir örnek; B_4C takviyeli alüminyum matrisli kompozitler, depolama varilleri gibi nükleer koruma uygulamaları için umut verici sonuçlar göstermektedir. Ayrıca, genellikle takviyesiz alüminyumdan yapılan yarış gemilerinin direği için de 6061 alüminyum matrisli %20 SiC parçacık takviyeli kompozit kullanılmıştır [40].

4. FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM), çalışma sırasında en yüksek performansı gösterirken ağır çalışma koşullarına dayanacak şekilde geliştirilmiş malzeme türleridir. FDM'i meydana getiren unsurların özellikleri ve bileşimi, malzeme boyunca konum ve boyuta göre Şekil 4.1'deki gibi değişiklik gösterir. FDM üzerinde bileşim, mikro yapı veya gözeneklilik değişimi, sürekli veya süreksiz olabilir ve çalışma sırasında malzemeye belirli işlevsellik kazandırmak için özel olarak tasarlanabilir [41].



Şekil 4.1. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin kesit yapısının şematik gösterimi [41]

FDM'in ilk uygulaması 1984 yılında Japonya'da tasarlanan bir uzay mekiğinde gerçekleşmiştir. Bu tasarımda, mekiğin gövdesi 1000 °C sıcaklık farkına dayanacak şekilde kademeli olarak değiştirilip, iyileştirilmiş termal direnç ve mekanik özelliklere sahip bir malzemeden üretilmeye çalışılmıştır [42].

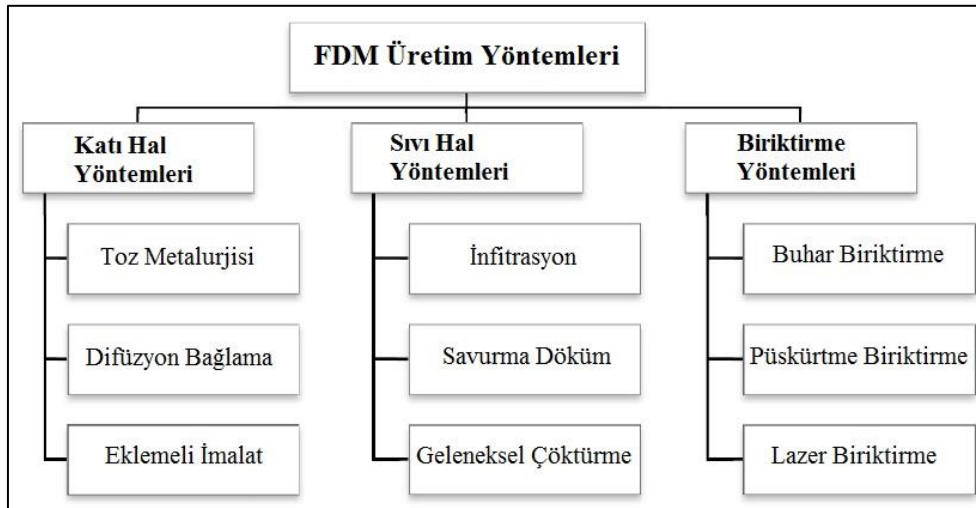
FDM bileşenleri, bazı endüstriyel proseslerin özel gereksinimlerini karşılayan belirli fayda gösteren karakteristik özelliklere sahiptir. Dolayısıyla geleneksel kompozit malzemelerin eksikliklerini etkili olarak giderirler. FDM'in, geleneksel ve kompozit malzemelere göre avantajları aşağıda maddeler halinde verilmiştir [43, 44].

- FDM'deki ara yüzey tabakası, uyumsuz malzemelerden elde edilmiş iki bileşeni tam olarak birbirine bağlayabilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle, bu malzemelerde bağ mukavemeti önemli ölçüde artar.
- Artık ve termal gerilmeleri azaltmak amacıyla FDM kaplama ve ara yüzey kullanılabilir.

- FDM kaplama, malzemeleri birleştirmek ve bitiş noktası ile ara yüzey gerilimlerini ortadan kaldırmak amacıyla kullanılabilir.
- FDM kaplama, bağlantıların dayanımını artırmakla birlikte aynı zamanda çatlak yayılma kuvvetini de azaltmaktadır [43, 44].

4.1. FDM'in Üretim Yöntemleri

FDM üretimi; imalat sürecinde kullanılan malzemelerin fiziksel haline bağlı olarak, üretim yöntemleri genel olarak katı hal, sıvı hal ve biriktirme yöntemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflara giren farklı üretim yöntemleri Şekil 4.2'de şematik olarak gösterilmiştir. Biriktirme yöntemleri, yüksek boyutsal doğruluk elde etmek ve küçük ürünler üretmek için kullanılan son derece gelişmiş teknolojilerdir. Sıvı hal yöntemlerinde, genellikle nispeten daha düşük özelliklere sahip ancak daha büyük boyutlu ürünler üretilebilmektedir. Katı hal yöntemlerinde, yüksek gerilimli termo-mekanik bileşenler için FDM üretilir. FDM'in farklı yollarla ve farklı hallerde üretilmesi; üretim sırasında oluşan termal etkiler, mekanik yükleme, basınç ve atalet kuvvetlerine bağlı olarak nihai ürünün özellikleri de değişiklik gösterir [42].



Şekil 4.2. FDM'lerin üretim sırasındaki haline göre sınıflandırılması [42]

4.2. FDM'lerin Uygulama Alanları

FDM'ler, derecelendirilmiş yapıları nedeniyle tek bir malzemede bulunması imkânsız olan özellikleri bir arada bulundurlar. Bu mükemmel yapıları, FDM'nin birçok endüstri

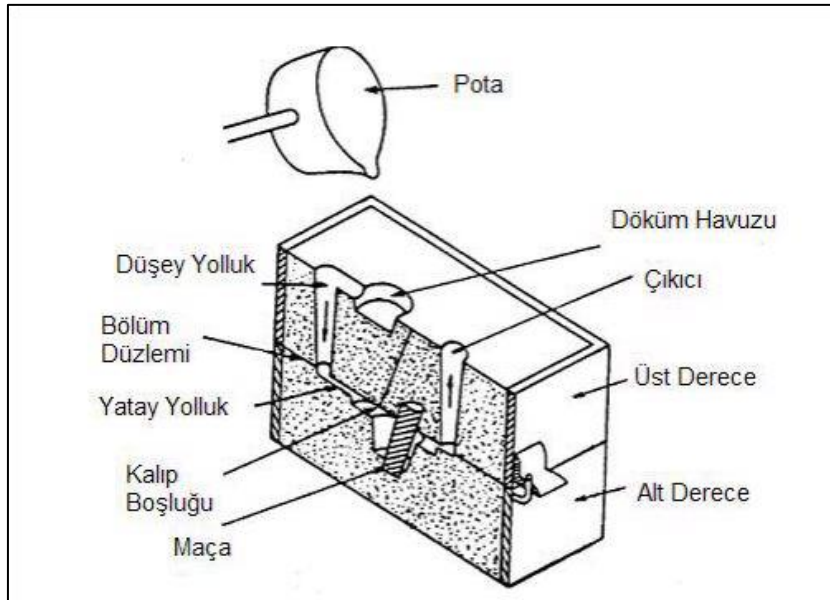
alanında kullanılmasının önünü açmaktadır. Bu malzemelerin gelecekte diğer uygulamalarda kullanılma konusunda büyük bir potansiyeli vardır [14]. FDM'in başlıca uygulama alanları arasında;

- İnşaat Mühendisliği: Kutu kirişli köprüler, havuzlar, bacalar, depolama tankları, elastik temeller,
- Havacılık: Uzay araçlarının gövdesi, roket motoru bileşenleri,
- Kimya Tesisi: Isı borusu, ısı eşanjörü, reaksiyon kabı,
- Mühendislik: Motor elemanları, kesici aletler,
- Nükleer enerji: Yakıt peletleri, nükleer reaktörlerin elemanları,
- Elektronik: Yarı iletken şerit gösterge sensörleri,
- Optik: Lensler, optik fiberler,
- Enerji Dönüşümü: FDM; enerji dönüşüm cihazlarında kullanılmasının yanı sıra gaz, termiyonik konvertör, termoelektrik jeneratör, yakıt hücresinde türbin kanatları üzerinde termal bariyer sağlar ve koruyucu kaplama olarak,
- Genel ürünler: Araba gövdesi, yapı malzemeleri, pencere camları,
- Biyolojik malzemeler: Suni deri, implantlar,
- Biyomalzemeler: Kanseri önleme, suni kemikler, dişler.
- Enerji santrali: Isı eşanjör boruları, termal bariyer kaplamaları,
- İmalat: Şekillendirme ve kesme aletleri, takım tezgahları, metal döküm ve dövme işlem elemanları,
- Termal bariyer olarak FDM Uygulamaları: Otomotiv ve uçak endüstrilerinde termal bariyer kaplamaları, egzoz manifoldları, egzoz başlıkları, egzoz boruları, turboşarj muhafazaları ve iniş boruları dahil olmak üzere motor egzoz sistemi elemanları,
- Savunma: Çatlak yayılmasını engelleme kabiliyeti nedeniyle, kurşun geçirmez yelekler ve zırh plakaları gibi delinmeye dayanıklı zırh parçaları,
- Diğerleri: Jiletler, titanyum esaslı saat bileşenleri, beyzbol kramponları sayılabilir [45].



5. DÖKÜM YÖNTEMİYLE İMALAT

Basit bir ifadeyle, sıvı metalin kalıplara doldurulması işlemine döküm denir. Üretilmesi amaçlanan parçanın şekil boşluğu, kalıplarda bulunmaktadır. Kalıp boşluğuna doldurulan sıvı metal bu boşlukta katılaşarak boşluğun şeklini alır. Böylece amaçlanan parça üretilmiş olur. Kalıplar, açık ve kapalı şekilde bulunabilir. Ancak döküm teknolojisinde genellikle kapalı kalıplar kullanılmaktadır. Şekil 5.1.'de görüldüğü üzere kapalı kalıplar, alt derece ve üst dereceden oluşmaktadır. Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurması için bir yolluk sistemi bulunmaktadır [46].



Şekil 5.1. Kapalı kum kalıp kesiti [46]

Kalıplar, farklı ısı dirençli malzemelerden yapılır. Bu malzemeler; kum, seramik, alçı, grafit ve metal olabilir. Bazı kalıplarda katılaşan parça, kalıp bozularak çıkarılır. Bu tür kalıplar bir kez kullanılabilir. Kum kalıplar buna en iyi örneklerdendir. Birden fazla parça üretimi için kullanılan kalıcı kalıplara örnek olarak metal kalıplar verilebilir [46].

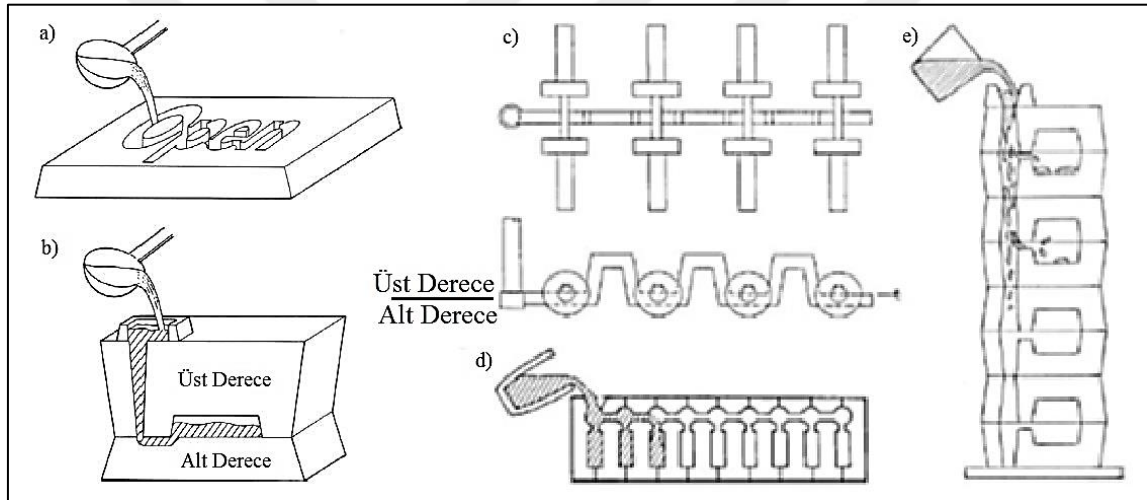
Döküm yapılmadan önce metal ertilir ve döküm sıcaklığına çıkarılarak kalıba dökülür. Kalıp boşluğuna dolan metal soğumaya başlar, sıcaklık belirli bir değere düştüğü anda katılaşma başlar ve katılaşma tamamlandıktan sonra oluşan parça oda sıcaklığına kadar soğutulur. Bu sırada parçadan önemli ölçüde ısı uzaklaşır. Bu sırada oluşan şekliyle birlikte aynı zamanda malzemenin içyapısı ve özellikleri de belirlenir. Döküm işleminden sonra

kalıptan çıkarılan parçaya ait olmayan kısımlar uzaklaştırılır, yüzey temizliği uygulanır, varsa ısıl işlem uygulanır ve gerekli kontrollerden sonra üretim tamamlanmış olur [46].

5.1. Döküm Yöntemleri

5.1.1. Yer çekimi döküm

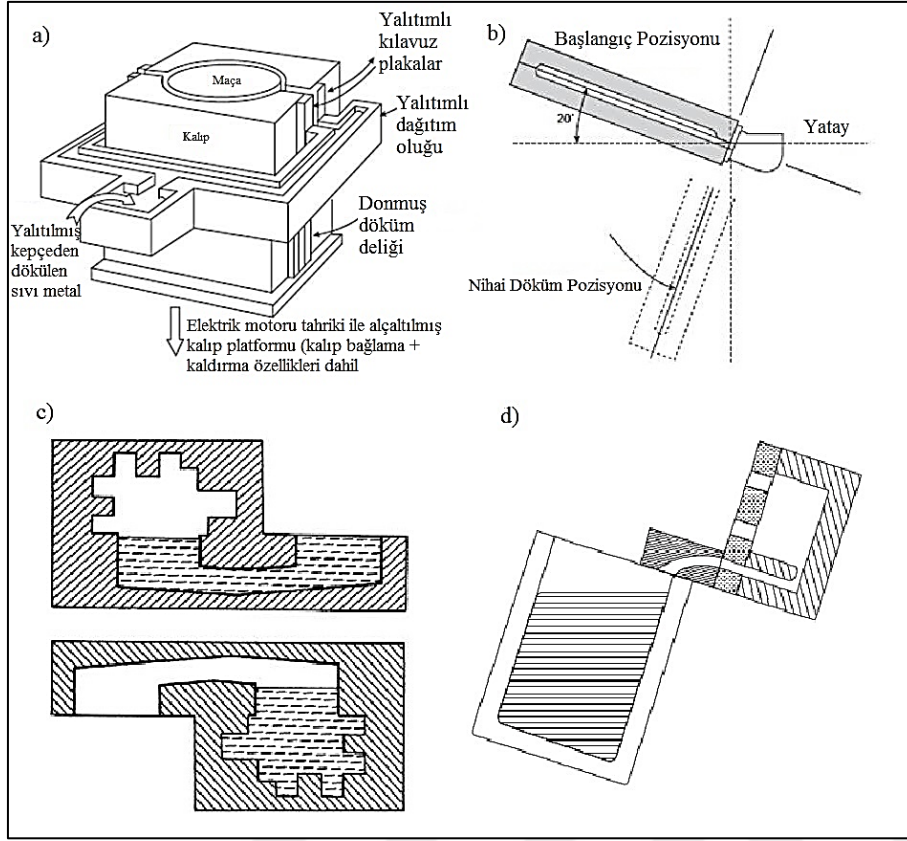
Günümüzde çoğu döküm teknolojisi yer çekimi etkisiyle gerçekleştirilir. Yer çekimi döküm yönteminin açık kalıp, kapalı kalıp, iki aşamalı doldurma, dikey istif kalıplama ve yatay istif kalıplama olarak beş türü vardır [47]. Bu yöntemler, Şekil 5.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. (a) açık kalıp, (b) kapalı kalıp, (c) iki aşamalı doldurma, (d) yatay istif kalıplama ve (e) dikey istif kalıplama yer çekimi döküm yöntemleri [48]

5.1.2. Yatay transfer döküm

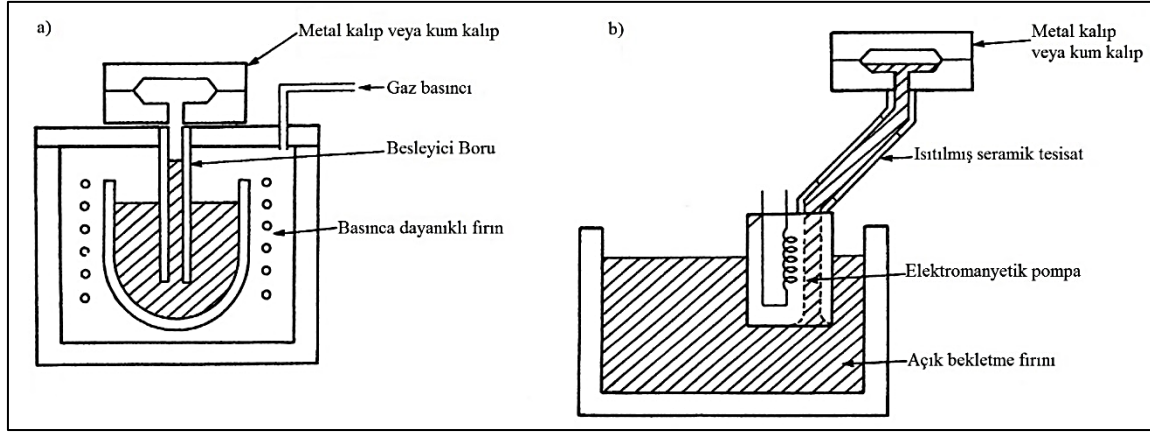
Kalıpta üst kısımların dolma problemi, kalıbın doldurulmasında büyük bir kalite sorunu oluşturmaktadır. Bu problemin çözümü için yatay ve yer çekimine ters döküm yöntemleri hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları; seviye döküm (yan döküm), kontrollü eğimli döküm, yuvarlama (devirmeli) döküm ve dökümden sonra yuvarlamadır [48]. Bu çalışmalar Şekil 5.3’te şematik olarak gösterilmiştir.



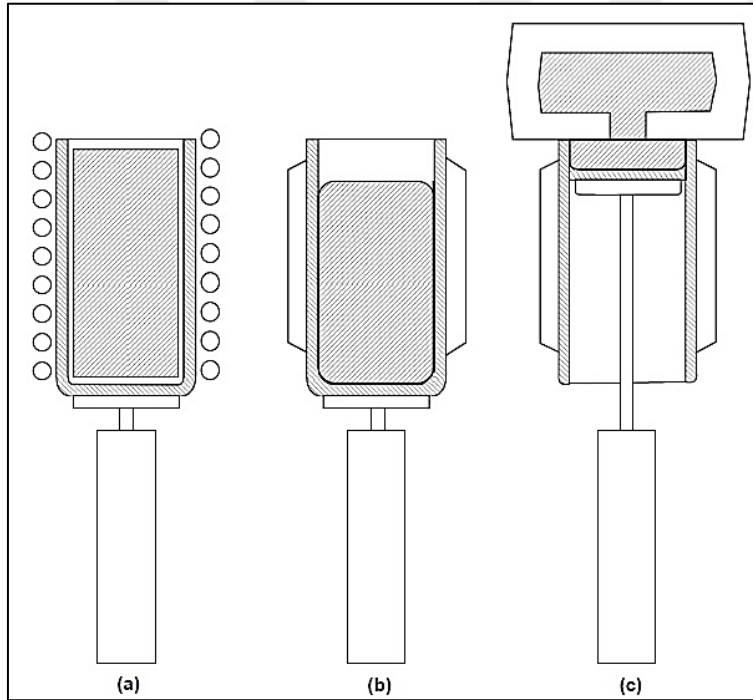
Şekil 5.3. (a) seviye, (b) kontrollü eğimli, (c) yuvarlama ve (d) dökümden sonra yuvarlama yatay transfer döküm yöntemleri [48]

5.1.3. Yer çekimine ters döküm

Yer çekimine ters (karşı) döküm, yer çekimi ile dökümün temel sorunlarından kaçınmak için geliştirilmiştir. Kontrollü dolum parametreleri sayesinde dolum işlemi daha dengeli haldedir [48]. Yer çekimine karşı dökümün alçak basınçlı döküm, sıvı metal pompaları ve doğrudan dikey enjeksiyon olarak üç türü vardır. Alçak basınçlı döküm yöntemleri olarak; orta basınçlı döküm, karşı basınçlı döküm, vakum yükselticisiz ve/veya basınç yükselticisiz döküm ve T-mag sayılabilir. Sıvı metal pompaları ile döküm yöntemleri olarak; savurmalı pompa, elektromanyetik pompa, kozvört ve pinömatik pompa yöntemleri vardır. Doğrudan dikey enjeksiyon yöntemleri ise; piston yer değiştirmeli pompa ve kayıp pota yöntemleridir [47]. Şekil 5.4'te geleneksel alçak basınçlı döküm ve elektromanyetik pompa yöntemleri ile Şekil 5.5'te ise kayıp pota tekniğinin aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4. (a) sızdırmaz bir basınçlı kap kullanılarak işlenmiş geleneksel alçak basınçlı döküm, (b) açık bir fırında elektromanyetik pompa [47]



Şekil 5.5. Bir harcanan elyaf pota ile karşı-yerçekimi; (a) hızlı ergime; (b) potayı desteklemek için mengene ile kısıtma; (c) potanın tabanını yukarı iterek döküm [47]

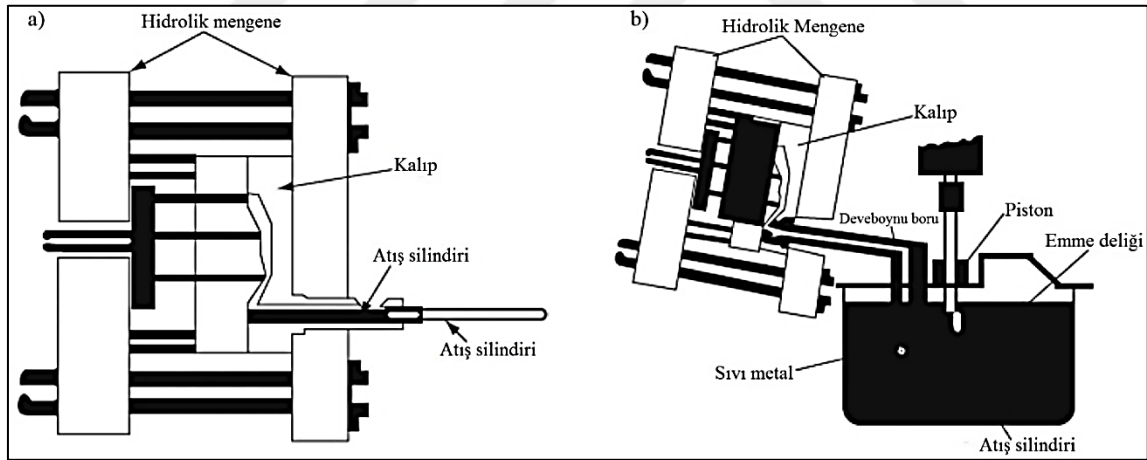
5.1.4. Savurma döküm

Savurma döküm yönteminde sıvı metal, dökümleri geliştirmek veya üretmek için hızla dönen bir kalıba dökülür [39]. Bu yöntemde metal, önemli basınç altında merkezkaç kuvveti ile kalıp yüzeyine doğru savrulur. Temel olarak; dikey ve yatay eksenli savurma döküm olarak sınıflandırılır [29]. Dikey savurma dökümde; sıvı metal, kalıp içine dökülürken kalıp

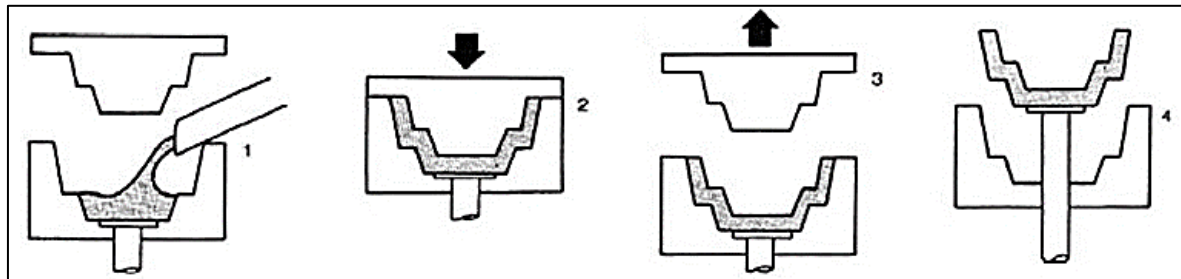
kendi eksenini etrafında döner. Metal katılaştıkça sürekli merkezkaç kuvveti metale etki etmektedir. Yatay savurma yönteminde ise, döküm sırasında sıvı metal, kalıbın uzunluğu boyunca dağıtılır ve savurma kalıbı yatay eksen boyunca hareket etmektedir [39].

5.1.5. Basınçlı döküm

Döküm yöntemlerinde basınç artışı sayesinde katılaşma süresinin kısaldığı bilinmektedir. Döküm sırasında yüksek basıncın uygulanması, mekanik özelliklere olumlu etki yapar. Bu yöntemde hızlı ve türbülanslı dolum olmasına bağlı olarak meydana gelen döküm hataları yüksek basınç etkisiyle döküm parçasının mekanik özellikleri üzerine olan etkisi azdır. Karşı basınçlı döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleri, yüksek basınçlı döküme göre çok fazla döküm hatası içermez. Bu döküm yöntemlerinde nispeten göz ardı edilebilir döküm hataları meydana gelir. Bu durumda sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen malzemelerde daha iyi mekanik özellikler elde etmek mümkündür [48]. Yüksek basınçlı döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleri sırasıyla Şekil 5.6 ve 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.6. (a) soğuk kamara ve (b) sıcak kamara yüksek basınçlı döküm makineleri [49]

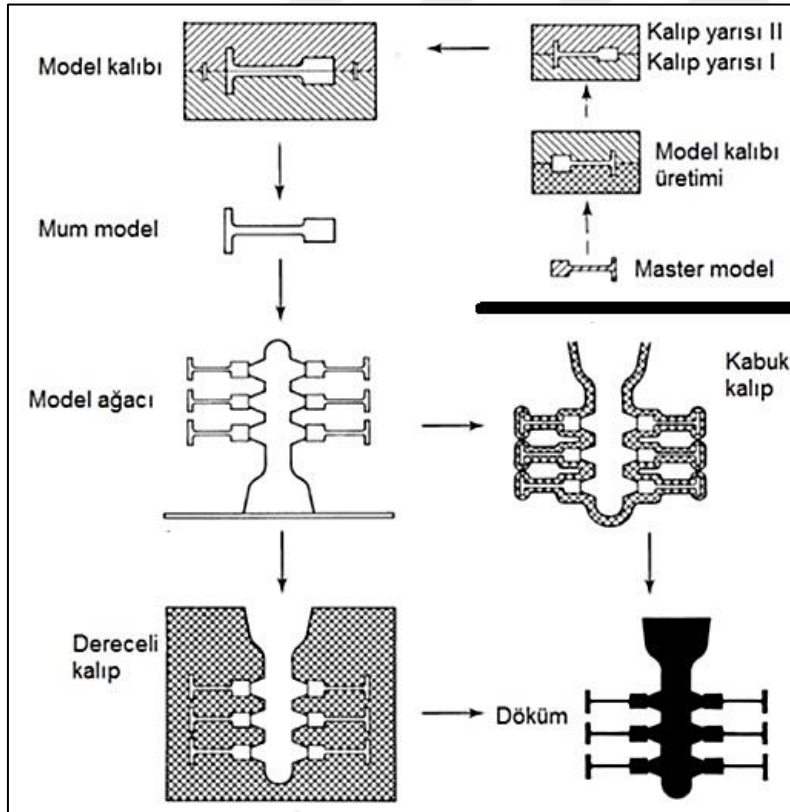


Şekil 5.7. Sıkıştırma döküm [48]

5.1.6. Kayıp mum döküm

Kayıp mum yöntemi, hassas döküm alçısı içine yerleştirilen mum modelin boşaltılması ve bunun bıraktığı boşluğa sıvı metalin dökülmesiyle gerçekleşir. Paslanmaz çelik alaşımlar, pirinç, alüminyum ve karbonlu çelikten parçalar üretmek için uygulanan bu yöntem hassas döküm olarak da adlandırılır. Hassas dökümde ilk olarak nihai ürünün balmumundan versiyonu oluşturulur. Daha sonra bu model bir alçı ile kaplanır ve alçı donar. Kalıp ısıtılarak mum model eritilir ve mum kalıptaki yolluk sisteminden dışarıya akıtılır. Mumdan geriye kalan boşluğa sıvı metal dökülür. Metal katılaştıktan sonra alçı kırılıp içindeki döküm parça çıkarılarak süreç tamamlanır [50].

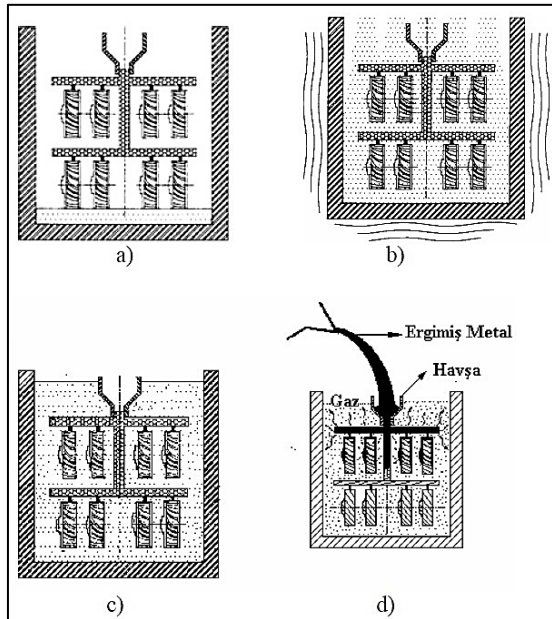
Kalıp hazırlama bakımından, hassas kabuk kalıp ve dereceli kalıp yöntemi olmak üzere kayıp mum dökümün iki çeşidi bulunmaktadır [51]. Bunlar Şekil 5.8’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Kayıp mum döküm yöntemlerinin şematik gösterimleri [51]

5.1.7. Kayıp köpük döküm

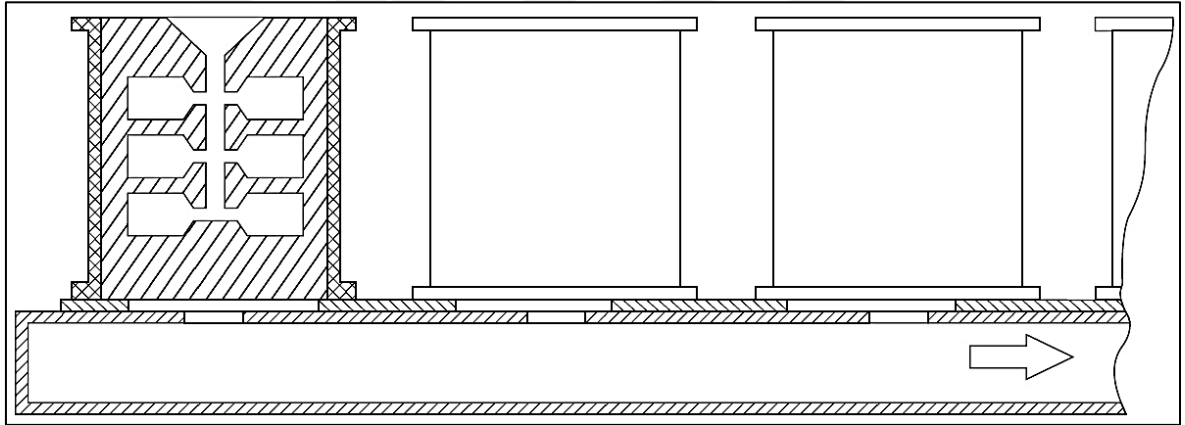
Köpük modelle dökümdeki ilk ve en önemli adım, kaliteli köpük model üretimidir. Model üretiminin ilk aşamasında polistren granülleri ısıtılarak ön şişirme yapılır, ardından metal kalıplara doldurularak tekrar ısıtılır. Granüller, belirli bir süre sonra soğutulur. Soğutma işleminden sonra kalıptan çıkarılan modele yaşlandırma yapılır. Bu yöntemde modeller, yolluk sistemine bir yapıştırıcı ile bağlanarak model salkımı oluşturulur. Bundan sonra köpük model salkımın yüzeyi kaplanır ve oda sıcaklığında veya 50-65°C sıcaklığındaki fırınlarda kurutulur. Kuruyan köpük model salkımın etrafı, kuru ve bağlayıcısız kum ile derece içinde doldurulur (Şekil 5.9). Derece doldurulurken yüksek frekanslı mekanik titreşime sahip sıkıştırma tezgâhları kullanılır. Mekanik titreşim, derecenin alt ve yan yüzeylerinden dereceye uygulanarak model salkımın her noktasına kumun ulaşması ve sıkışması sağlanmaktadır. Bu döküm yöntemindeki döküm işlemi, geleneksel döküm yöntemlerindeki işlemle aynıdır. Tek fark ise; döküm sırasında sıvı metalin köpük modeli yakması sonucu polistren köpüğün kalıp içerisinden ayrılmasıyla köpük modelin ve modele bağlı bütün yolluk sisteminin yerini sıvı metalin almasıdır. Dökümden sonra parçalar soğumaya bırakılır ve daha sonra soğuyan parçalar kalıptan çıkarılır. Üretilen parçaların yollukları ayrılır ve temizlikleri yapılır [52]. Şekil 5.9’da kayıp köpük döküm yönteminin aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Kayıp köpük döküm yönteminin aşamaları; (a) model salkımın kum üzerine sabitlenmesi, (b) kumun doldurulması ve titreşim, (c) döküme hazır kalıp, (d) ergimiş metalin kalıba dökümü [52]

5.1.8. Vakum destekli döküm

Normal hava atmosferi ve yerçekimi etkisinde dökülen kalıplara akışı desteklemek amacıyla kalıbın bir kısmına vakum uygulanarak dökümde yardımcı olunabilir. Vakum destekli döküm, alçı blok kalıplarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar, üstü ve tabanı açık olan çelik kutularda hazırlanır. Açık üst kısımda yerçekimi dökümü için yolluk girişi ve bununla birlikte herhangi bir çıkıcı veya besleyici bulunur. Bir vakum hattına bağlı bir manifold üzerine yerleştirilen açık taban, vakum hattına dışarıdan hava girişini engellemek için kapatılır. Geçirgen kalıptan havanın çekilmesiyle dökümden sonra metal akışına yardımcı olarak kalıptan etkili bir şekilde tüm noktalara sıvı metalin dolması sağlanır. Bu yöntem, 0,5 mm'lik kesite sahip parçaların dahi dökülmesinde kullanılabilir [47]. Bu yöntem, Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Vakum destekli dökümde döküm için sıralanmış bir vakum manifoldu üzerinde oturan alçı kalıplar [47]

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

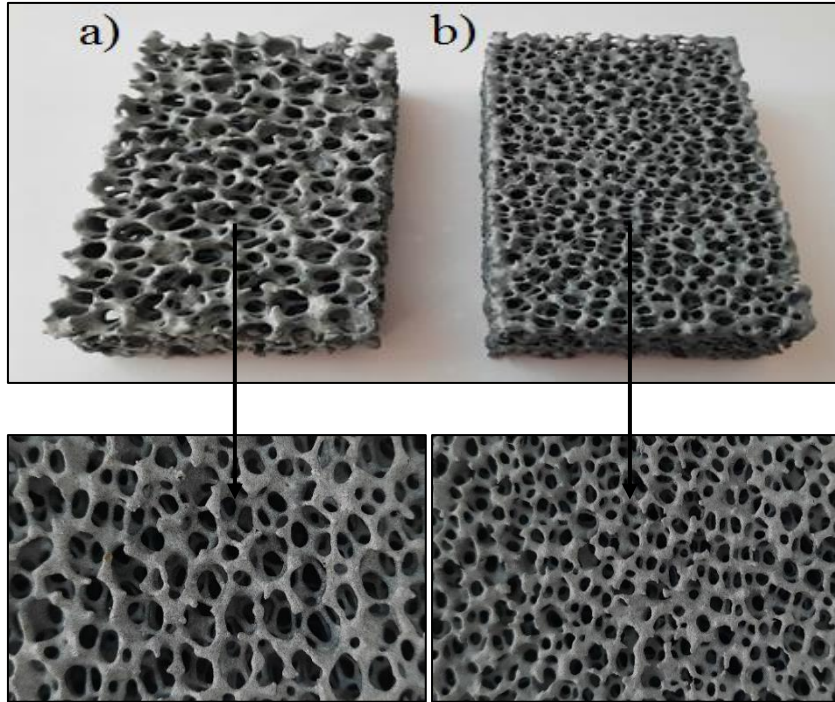
6.1. Malzeme

FDM üretimi için; ana alaşım elementleri silisyum, bakır ve magnezyum olan bir alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak seçilmiştir. Bu çalışmada hem döküm hem de ısıtım işlem sonrası özelliklerin görülebilmesi bakımından bu alaşım tercih edilmiştir. Bu alaşımın kimyasal analizi Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Alüminyum alaşımının kimyasal analiz değerleri

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Cr	Zn	Ti	Bi	Pb	Al
Miktar (%)	8.14	0.69	3.73	0.48	2.68	0.04	0.03	0.81	0.04	0.06	0.21	Kalan

Takviye malzemesi olarak gözenekli SiC preform tercih edilmiştir. Ölçüleri $50 \times 75 \times 20 \text{ mm}^3$ olan 10 ve 30 ppi (İnç başına düşen gözenek sayısı) özelliğine sahip malzemeler (Resim 6.1) MSR Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti. den temin edilmiştir.

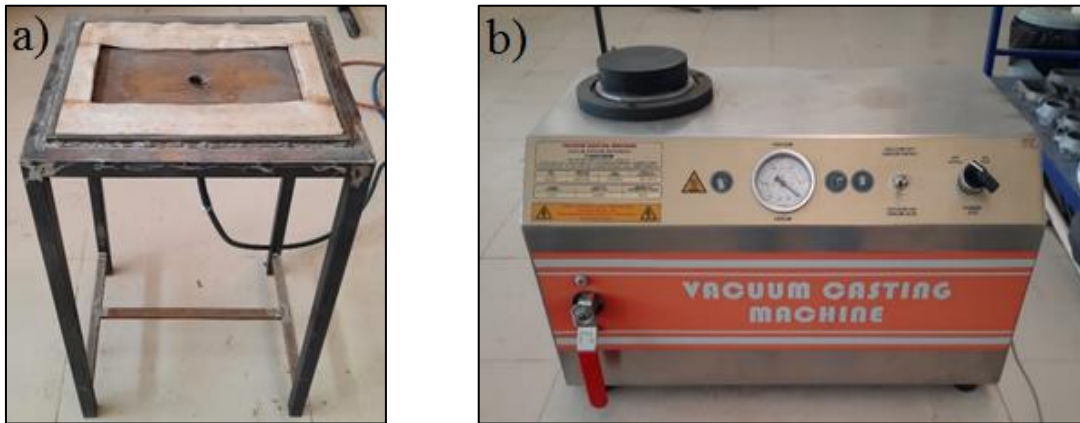


Resim 6.1. (a) 10 ppi ve (b) 30 ppi SiC preformların fotoğrafları ve detay görüntüleri

Satın alınan bu SiC preformlar, Bölüm 3.3.1’de açıklanan replikasyon tekniği ile üretilmiştir. Örneğin bir çalışmada gözenekli SiC prefom üretiminde ilk olarak %90 SiC partikül ve %10 bentonit partikül bilyalı öğütme tekniği ile karıştırılmıştır. Karışımındaki SiC partiküllerin büyük çoğunluğunun (%92’den fazlası) boyutları 38 μm ’den az, geri kalan ise 38-100 μm aralığındadır. Bentonit partiküllerinin %28’inin boyutları 38 μm ’den az, %71’inin ise 38-100 μm arasındadır. Daha sonra bu karışım, yeterli viskoziteye ulaşana kadar saf su eklenerek karıştırılıp seramik çamur haline getirilmektedir. Hazırlanan seramik çamur, polyester süngere emdirilmekte, gözenekleri seramik çamuru ile dolan sünger kurutma işleminden sonra 500°C’de 30 dakika boyunca fırınlanarak su ve polyester sünger preform yapısından uzaklaştırılmaktadır. Ortaya çıkan seramik preformlar nihai dayanımlarına ulaşmaları için 1200°C’de 2 saat boyunca sinterlendikten sonra yavaş olarak oda sıcaklığına kadar soğutulup üretim tamamlanmaktadır [2].

6.2. Vakum Destekli Alçak Basıncılı Döküm (VDABD) Ünitesinin İmalatı

Vakum destekli alçak basınç kullanılarak yapılan döküm yöntemiyle FDM üretimi bir döküm ünitesi hazırlanmıştır (Resim 6.2). Bu ünite 2 ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar vakum desteği ile döküm için kalıp yerleştirme tezgâhı (Resim 6.2.a) ve vakumlama makinesidir (Resim 6.2.b). İki bileşen birbirlerine vakum bağlantı borusu ile birleştirilerek döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Vakum ile emme yapılabilmesi için tezgâhın tam ortasında bir delik bulunmaktadır. Bir ucu deliğe bağlanan borunun diğer ucu vakum döküm makinasına bağlanmıştır. Tezgâh ile kalıbın temas noktası silikon bir malzeme kullanılarak yalıtım sağlanmıştır. Bu tezgâh, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü imkânlarıyla imal edilmiştir.



Resim 6.2. (a) Vakum destekli döküm tezgâhı ve (b) vakum döküm makinası

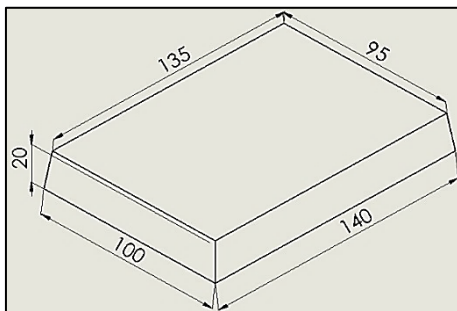
6.3. Kalıp İmalatı

Bu çalışmada karşılaştırma yapılabilmesi bakımından; hem geleneksel yer çekimi hem de vakum destekli döküm yöntemleri kullanılarak numuneler üretilmiştir. Bu iki farklı döküm yönteminde kullanılan kalıplar; aynı malzemelerden, aynı yolluk sistemi, aynı teknikler vb. kullanılarak imal edilmiştir. Bu amaçla yaş kum malzeme kullanılarak Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği dökümhanesinde kalıplar üretilmiştir. Ağırlıkça %88 silis kumu, %7 su ve %5 kil karışımı, kalıp kum mikserinde karıştırılarak (Resim 6.3.a-b) kalıp kumu hazırlanmıştır.

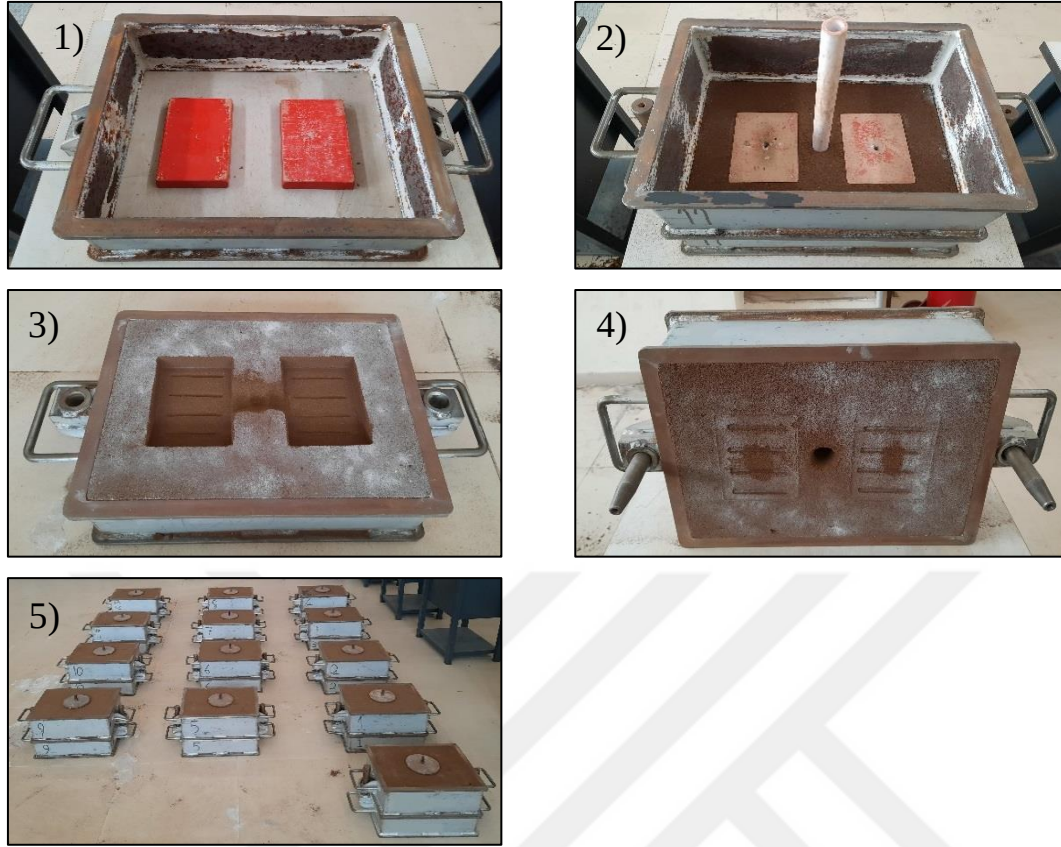


Resim 6.3. (a) Kum mikseri ve (b) kalıp kumu

Şekil 6.1’de ölçüleri verilen dikdörtgen prizma model kullanılarak kalıplar oluşturulmuştur. Her kalıpta 2 model kullanılarak kalıplar hazırlanmıştır. Bu kalıplardan 2 adet numune parçası üretilmiştir. Bunların bir tanesi döküm diğeri ise ısıtılma işlemi sonrası özelliklerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Üretim şartlarının aynı olması için aynı kalıpta üretim yapılmıştır. Kalıpların üretim aşamalarına ait görüntüler Resim 6.4’te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilen dikdörtgen döküm plaka ölçüleri

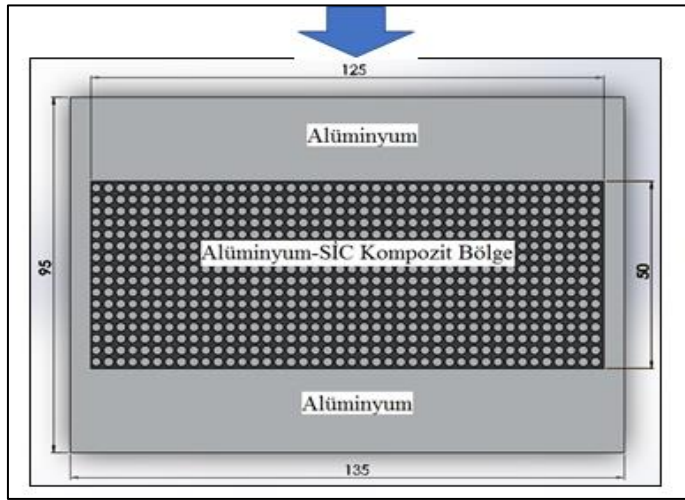


Resim 6.4. Döküm için kalıpların hazırlanma aşamaları

6.4. Döküm

Üretilmesi amaçlanan FDM parçanın şematik görünümü ve ölçüleri Şekil 6.2’de verilmiştir. FDM numune parçalarının boyuna yönünde gözenekli SiC preform yerleştirilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere parçanın iki tarafı metalik malzemeden, orta kısım ise tamamen kompozit malzeme olacak şekilde tasarlanmıştır. FDM parçalar bölgesel olarak farklı malzemelerle üretilip parçanın bölgesel olarak farklı özellikler sergilemesi sağlanmaktadır. Bu tez çalışmasında üretilen parçaların orta kısımları kompozit olarak üretilmiştir. Çünkü bu FDM parçanın nihai hedefinde orta kısmın sürtünme ve aşınma direncinin daha yüksek olması gerekmektedir. Sıvı metal tek meme bağlantısı kullanılarak ok yönünde kalıp boşluğuna doldurulacaktır. Sıvı metal önce boş kısma girecek, ardından da preform içerisinden geçerek diğer kalıp boşluklarına da dolacaktır. Tek meme bağlantısı ile kalıbın dolması zorlaştırılarak sıvı metalin akışı sınırlandırılarak işlem şartlarının etkileri daha belirgin hale getirilmiştir.

Metal ergitme işlemleri Resim 6.5'teki Nevola marka elektrik direnç tipi fırınında gerçekleştirilmiştir. Ergitmeden sonra kimyasal analiz yapılarak alaşımın arzu edilen kimyasal özelliğe ulaşıp ulaşmadığı kontrol edilmiştir. SiC preformlar hazırlanan kum kalıplardaki model boşluklarına 50x120 mm boyutlarında bloklar halinde (Resim 6.6) ve üretilecek numunenin tam ortasında olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu preformların bir kısmı ön ısıtmanın etkilerinin incelenmesi amacıyla fırında 550 °C'de ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur.



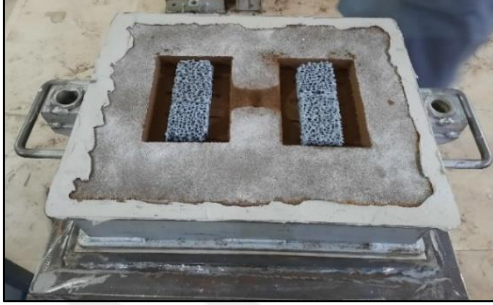
Şekil 6.2. Üretilmesi amaçlanan FDM parçanın şematik görünümü ve ölçüleri



Resim 6.5. Elektrik dirençli ergitme fırını

Sıvı metal uygun kimyasal bileşim ve sıcaklığa ulaştıktan sonra döküm işlemleri yapılmıştır. SiC preformlar döküm öncesinde kalıp içerisine model boşluğunun ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir (Resim 6.6). Döküm işlemleri de, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği dökümhanesinde gerçekleştirilmiştir. Döküm numuneler akış şartlarının

zorlaştırılması amacıyla 1 adet meme ile yolluk sistemine bağlanmıştır. Bu yolluk tasarımı akışı zorlaştırmakta ve vakumun etkisinin daha net olarak ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Vakum destekli dökümlerden önce kalıplar ön vakumlama yapılarak kontrolleri sağlanmıştır.



Resim 6.6. Kalıp boşluğuna yerleştirilen preformların gösterimi

Tez çalışmasında üretilen numunelere ait çalışma özeti Çizelge 6.2’de verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi; takviyesiz ve takviye kullanılan Al alaşımları, 2 farklı SiC preform gözenek miktarı, 2 farklı döküm sıcaklığı olmak üzere 12 farklı kombinasyonda döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Vakum destekli dökümler yöntemin sistematığına uygun olarak, sıvı metalin kalıba dolumu sırasında vakum sistemi çalışır bir şekilde yapılmıştır. Döküm işlemlerinden sonra oda sıcaklığına soğutulan kalıplar bozularak üretim koşulları birbirinden farklı 12 malzeme ve her bir malzeme grubunda 2 parça olmak üzere toplam 24 döküm numunesi üretilmiştir (Resim 6.7).

Çizelge 6.2. FDM numune üretim parametreleri ve kodlanması

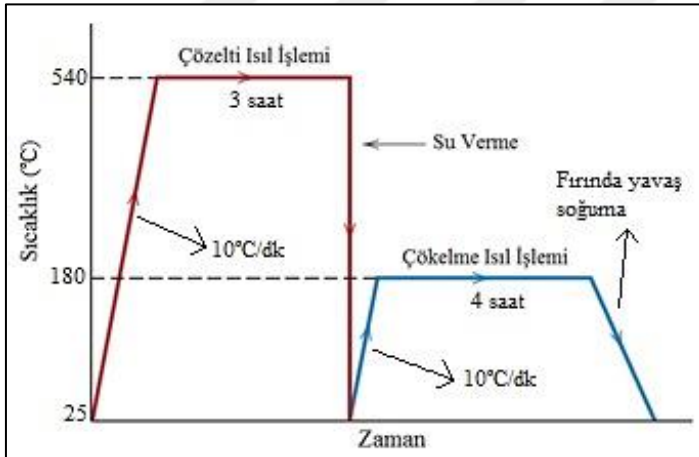
Malzeme	Döküm Sıcaklığı (°C)	Takviye Çeşidi (ppi)	Döküm Yöntemi
650-G	650	-	G
650-V	650	-	V
700-G	700	-	G
700-V	700	-	V
650-10-G	650	10	G
650-10-V	650	10	V
700-10-G	700	10	G
700-10-V	700	10	V
650-30-G	650	30	G
650-30-V	650	30	V
700-30-G	700	30	G
700-30-V	700	30	V
G: Geleneksel döküm, V: vakum destekli döküm			



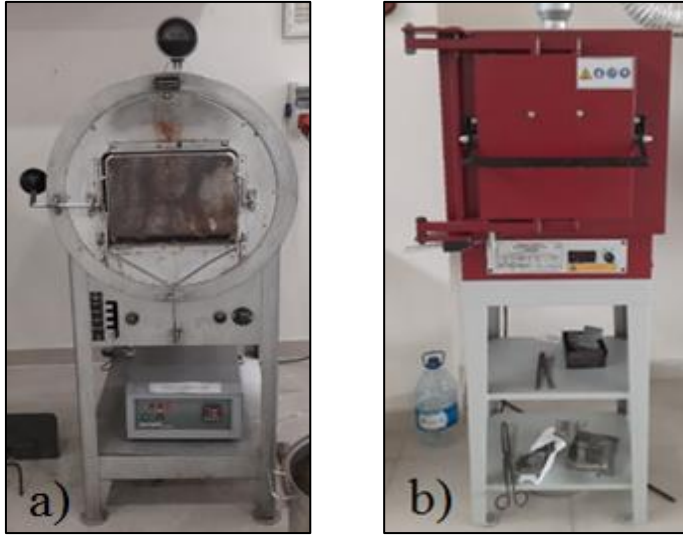
Resim 6.7. Üretilen numuneler

6.5. T6 Yaşlandırma Isıl İşlemi

Döküm sonrası ısıtım işlem etkilerinin incelenmesi amacıyla numunelerin yarısı Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ısıtım işlem laboratuvarında Şekil 6.3'te gösterilen T6 yaşlandırma ısıtım işlemine tabi tutulmuştur. Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri ayrı fırınlarda gerçekleştirilmiştir (Resim 6.8). Çözelti işleminden sonra numuneler suda su verme uygulanarak oda sıcaklığına soğutulmuş, ardından yaşlandırma işlemi yapılmıştır.



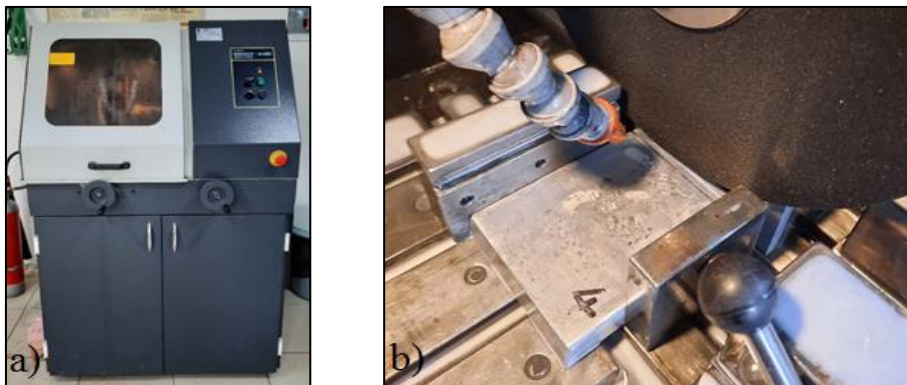
Şekil 6.3. T6 ısıtım işlemi uygulama adımları ve işlem şartları



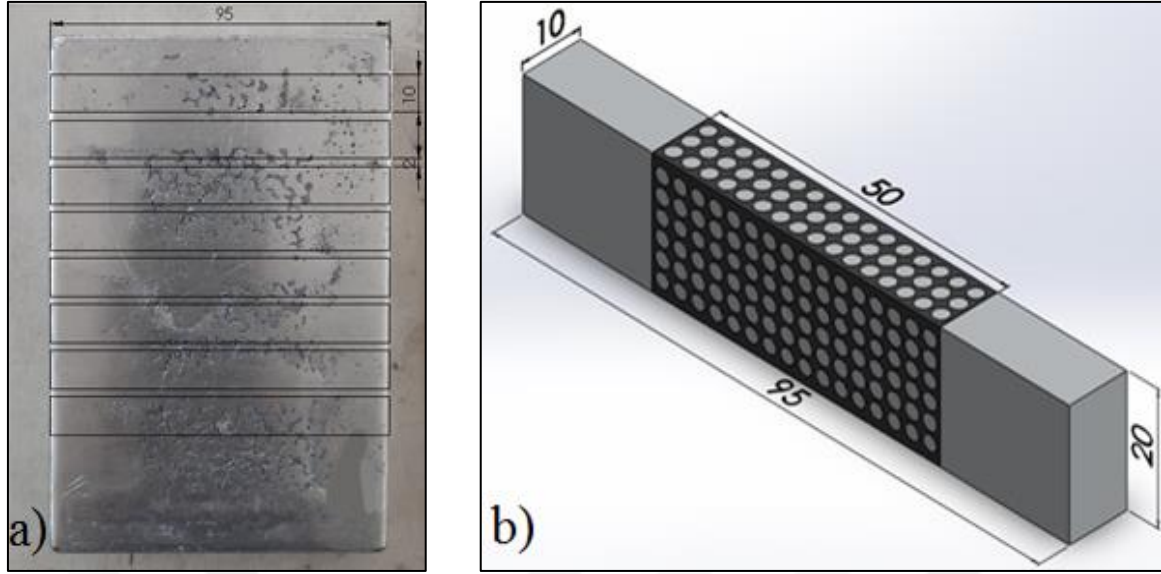
Resim 6.8. Çözündürme ve yaşlandırma işlemlerinin yapıldığı ısıtılma fırınları

6.6. Döküm Parçalardan Test Numunelerinin Hazırlanması

Üretilen dikdörtgen plaka parçalardan Elektrik Üretim A.Ş. Kimya Laboratuvarı'ndaki Metkon marka Servecut-M400 model abrasif kesme cihazında (Resim 6.9.a) enine kesim yapılarak (Resim 6.9.b); eğme, basma, sertlik testleri ve metalografik incelemeler için FDM numuneleri elde edilmiştir (Şekil 6.4.a). Kesim işlemi sonrasında inceleme yapılan FDM numunelerinin yapısal şematik görünümü Şekil 6.4.b'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde; asıl inceleme yapılacak bölgeler olan numunelerin orta kısımları SiC takviyeli kompozit kenar kısımları ise Al malzemeden oluşmaktadır. Üretilen parça ve alınan numunelerin tam olarak bir FDM yapıda oldukları görülmektedir.



Resim 6.9. (a) Abrasif kesme cihazı (b) numune kesim işlemine ait görüntüler



Şekil 6.4. (a) Döküm plakası üzerinde test numunelerinin alınma konumu, (b) numunelerin ölçüleri ve FDM yapısının şematik gösterimleri

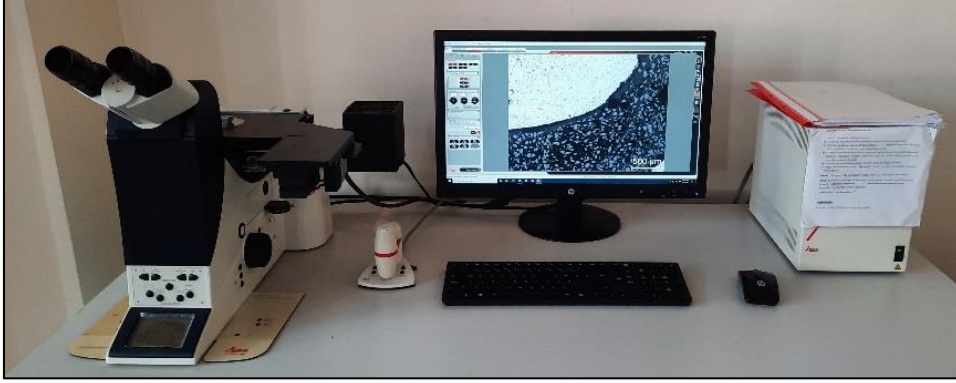
6.7. Döküm Yöntemiyle FDM Üretim Başarısının İncelenmesi

FDM parçalar kesilmeden önce, gözle (makro) inceleme yapılarak üretim şartlarının plaka parçalar üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler arasında; eksiksiz olarak kalıbın dolması, tek meme bağlantısı nedeniyle katılma çekmesi analizleri, yüzeyde oluşabilecek gaz boşluklarının analizi, soğuk birleşme incelemeleri, başka yüzey kusurlarının incelenmesi vb. sayılabilir.

6.8. Mikro Yapı İncelemeleri

Üretilen parçalara ait numuneler üzerinde üretim şartlarının matris, takviye, matris/takviye ara yüzeyine etkilerinin belirlenmesi amacıyla yapısal incelemeler yapılmıştır. Bu amaca yönelik olarak optik ve SEM mikroskop inceleme ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Parçalardan uygun yöntemle metalik ve kompozit bölgeyi şekilde kesilerek alınan numuneler üzerinde incelemeler yapılmıştır. İnceleme ve analizler öncesinde numunelerin yüzeyleri metalografik hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu amaçla yüzeylere önce sırası ile 120, 320, 400, 800 ve 1200 grit zımparalar ile zımparalama, ardından 6 ve 3 μm 'lik elmas süspansiyonlar kullanılarak parlatma işlemleri yapılmıştır. Hazırlanan numunelerin optik incelemeleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği'nde Leica marka DMI 4000M model optik mikroskopta farklı büyütme kullanılarak yapılmıştır (Resim 6.10). Bu hazırlanan numunelerin üzerinde; matris, takviye, matris/takviye ara yüzeyindeki

değişim, yapısal oluşum ve kimyasal geçişkenliklerin daha detaylı inceleme ve analizleri için JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobunda yapılmıştır (Resim 6.11).



Resim 6.10. Optik mikroskop ve yapısal inceleme çalışması görüntüsü



Resim 6.11. Detaylı yapısal inceleme ve EDS analizlerinin yapılması

6.9. Sertlik Testi İşlemleri

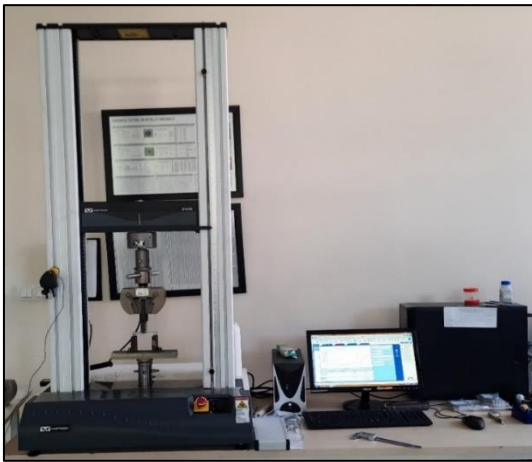
Üretim şartlarının malzeme (matris) sertliği üzerindeki etkileri, Brinell cinsinden EMCO TEST marka Duravision 200 model sertlik ölçüm cihazında 2,5 mm çapında bilye uç ile 15,625 kgf yük uygulanarak yapılmıştır (Resim 6.12). Her bir numunede en az 5 farklı noktadan ölçüm yapılarak sertlik değerleri bulunmuştur. Takviyesiz numunelerde herhangi bir noktadan, FDM'lerde ise kompozit bölgedeki matris üzerinden sertlik ölçümleri yapılmıştır.



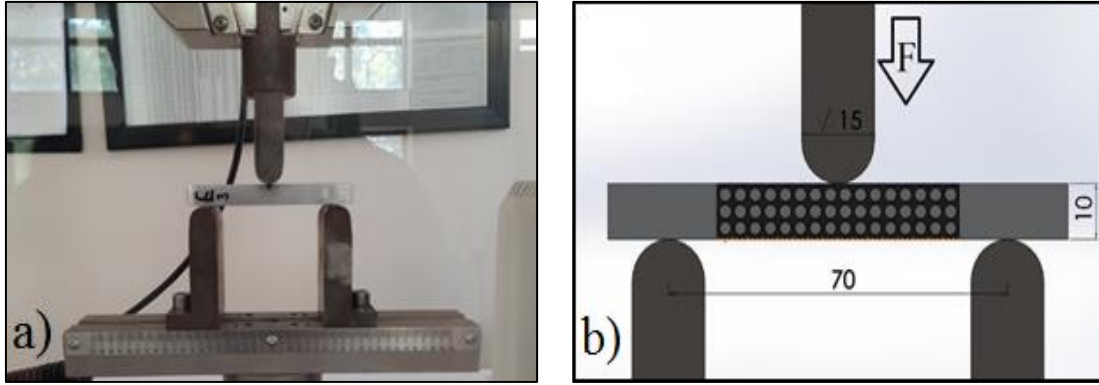
Resim 6.12. Sertlik ölçüm işleminin uygulanması

6.10. Eğme Testi İşlemleri

Üretilen metal ve FDM malzemelerin yanal kuvvetler karşısındaki kırılma davranışlarının tespiti için 3 nokta eğme testleri; Instron marka 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip test cihazında 10 mm/dakika hızda gerçekleştirilmiştir (Resim 6.13). Her parçadan 3 numune test edilmiştir. Test yapılmadan önce numuneler yüzey temizliği ve çapak giderme işlemine tabi tutulmuştur. Testler numunelerin tam orta kısımlarından yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tip test sonucunda metal malzemede metal kısımlar, FDM malzemede ise kompozit kısımların test edilmesi sağlanmıştır (Şekil 6.5.a-b). Eğme testleri sonrasında numunelerine ait kırılma yüzeyleri 3 boyutlu analiz için Leica marka M 205 C model stereo mikroskopta incelenmiştir (Resim 6.14).



Resim 6.13. 3 nokta eğme testlerinin yapılışı



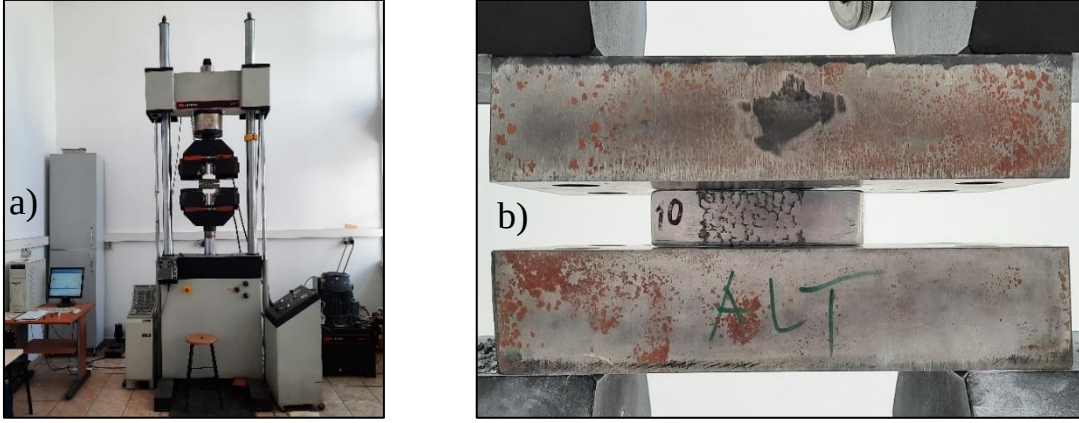
Şekil 6.5. (a) Metal ve (b) FDM malzemeye eğme testinin uygulanması



Resim 6.14. Stereo mikroskopta kırık yüzey incelemesi

6.11. Basma Testi İşlemleri

Üretilen metal ve FDM malzemelerin basma kuvvetleri karşısındaki deformasyon davranışlarının tespiti için basma testleri; Instron marka 3369 model 500 kN çekme ve basma kapasitesine sahip test cihazında 10 mm/dakika hızda gerçekleştirilmiştir (Resim 6.15.a). Her parçadan 3 numune test edilmiştir. Test yapılmadan önce numuneler yüzey temizliği ve çapak giderme işlemine tabi tutulmuştur. Bu tip test sonucunda metal malzemede metal kısımlar, FDM malzemede ise kompozit kısımların test edilmesi sağlanmıştır (Resim 6.15.b).



Resim 6.15. (a) basma test cihazı ve (b) FDM malzemeye basma testinin uygulanması



7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bunların tartışması; FDM malzeme üretilebilirliği, yapısal incelemeler, sertlik, eğme ve basma özelliklerinin incelenmesi olarak 5 bölüme ayrılarak yapılmıştır.

7.1. FDM Malzeme Üretiminin Değerlendirilmesi

Yerçekimi ve alçak basınç kullanılarak 10 ve 30 ppi gözenek yapısına sahip FDM kompozit numune üretimleri yapılmış ve sonuçlar Resim 7.1-4'te döküm sıcaklığı, takviye gözenek oranı ve vakum uygulamasına bağlı olarak verilmiştir. Sonuçların daha kolay değerlendirilebilmesi için “yerçekimi” ile dökülen numuneler G ve “vakum” uygulanan numuneler V ile gösterilmiştir. FDM parçaların özellikle metal giriş kısımlarının gösterilmesi amacıyla üst yüzey ve kompozit kısmın detay görünümü için de enine kesit görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; üretimi hedeflenen tüm FDM kompozit numunelerin başarıyla üretilebildiği, takviye elemanının gözeneklerinin metal malzeme ile eksiksiz olarak doldurulduğu görülmektedir.

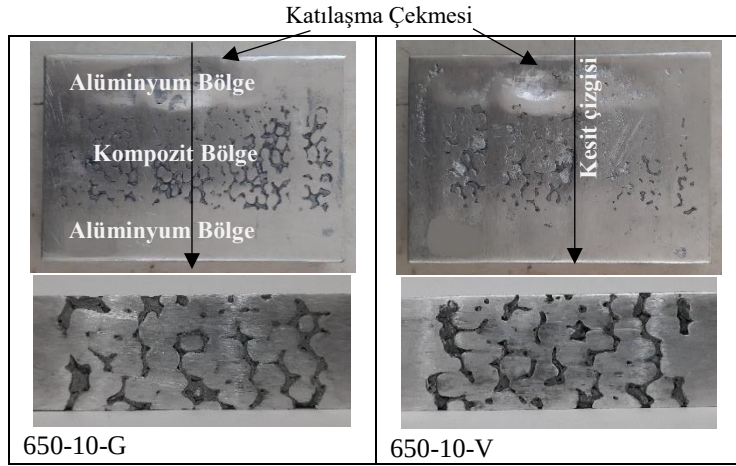
Ancak numuneler daha detaylı bir şekilde incelendiğinde; döküm sıcaklığının artması ve vakum uygulamasına bağlı olarak kusursuz görünümde numune üretiminin sağlandığı, yerçekimi etkisiyle dökümlerde ise bazı kısımlarda eksik döküm ve/veya gaz boşlukları tespit edilmiştir.

Özellikle takviye gözenek yoğunluğu ve döküm sıcaklığı bu aşamada belirleyici olan faktörlerdir. Üretilen numuneler incelendiğinde; yerçekimi etkisiyle üretim yapılırken gözenek yoğunluğunun 10 ppi'dan (Resim 7.1-2) 30 ppi'ya (Resim 7.3-4) artması (gözenek boyutunun küçülmesi) sonucunda gözenek veya boşluk hatalarının varlığı ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde yerçekimi etkisiyle döküm yapılırken döküm sıcaklığının artmasına bağlı olarak bu hataların varlığı azalmıştır. Düşük döküm sıcaklıklarında akıcılığın düşük olması bu hatanın oluşmasına neden olurken (Resim 7.1 ve 7.3), yine yerçekimi etkisi ile dökümde sıcaklık artırıldığında benzer şekilde takviye elemanının son kısımlarında ve parça üst yüzeylerinde daha az da olsa bu hatalar görülmektedir (Resm 7.2). Diğer yandan vakum uygulaması neticesinde; düşük döküm sıcaklığında çok az da olsa bu boşluk/gözenek

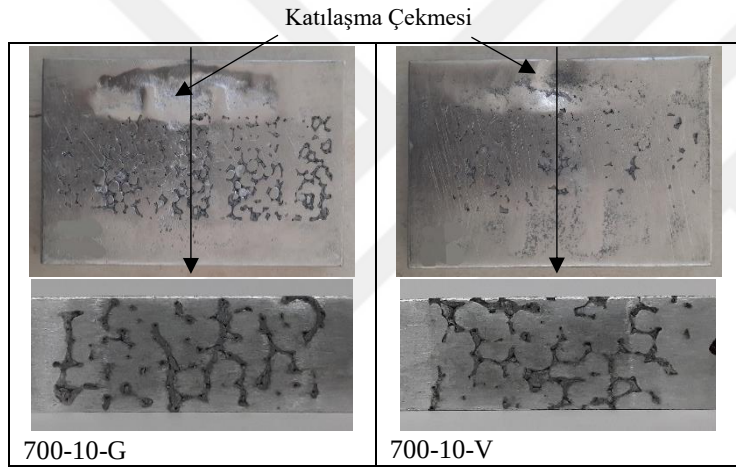
oluşumu görülürken (Resim 7.3), sıcaklığın artması sonucunda vakumun da etkisiyle bu döküm hataları ortadan kalkmıştır (Resim 7.4).

Bu numunelerin üretimi sırasında etki oluşturan önemli döküm şartlarından birisi sıcaklık olurken, diğer yandan takviye gözenegi de göz ardı edilmemelidir. Takviye gözenek yoğunluğu, takviye malzemesi içerisindeki boşlukların boyutunu gösteren bir ölçektir. Gözenek yoğunluğu arttıkça (10'dan 30 ppi'a doğru), gözenek kanallarının ortalama çapları küçülür ve kesiti incelmektedir. Bu küçülmenin yanında takviye gözenek oranındaki değişime bağlı olarak; sıvı metalin geçmeye çalıştığı kesit incelmekte, yol uzamakta ve metal/takviye yüzey alanı artmaktadır. Bu değişimler nedeniyle; sıvı metalin akışı zorlaşmakta, kat edeceği mesafe uzamakta ve sıvı metalin akışı sırasında ısı kaybı daha fazla olmaktadır. Bunların tamamı döküm işlemlerinde sıvı metalin akıcılık özellikleri bakımından olumsuzluk olarak sayılır ve akıcılığı azaltır. Belirtilen olumsuzluklar üretilen numuneler üzerinde yapılan incelemeler sonunda görülmektedir.

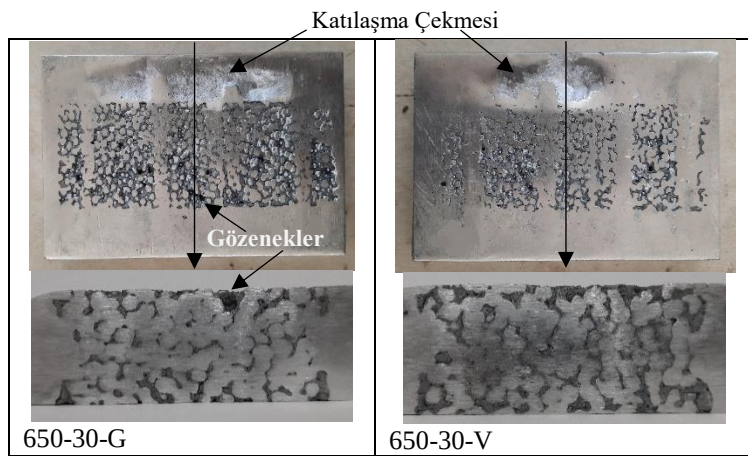
Özellikle 30 ppi gözenek yoğunluklu takviye kullanıldığında (Resim 7.3 ve 7.4) numune üst yüzeylerinde ve çok az da olsa alt yüzeylerinde gözenek veya boşlukların varlığı söz konusudur. Bu durumun üst alt yüzey ve yüzeye yakın yerlerde oluşmasının bir nedeni de takviye bir miktar sıcak olsa da kalıp yüzeyinin de soğuk olmasına bağlı olarak yüzey kısımlarında akış problemlerinin oluşmasındandır. Döküm sıcaklığının artırılması sonucunda bu hataların miktarı azaltılmıştır. 10 ppi gözenekli FDM malzemeler incelendiğinde (Resim 7.1 ve 7.2) hem düşük hem de yüksek sıcaklıkta bu hataların olmadığı açıkça görülmektedir. Bu tür malzeme üretiminde gözenek yoğunluğunun önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.



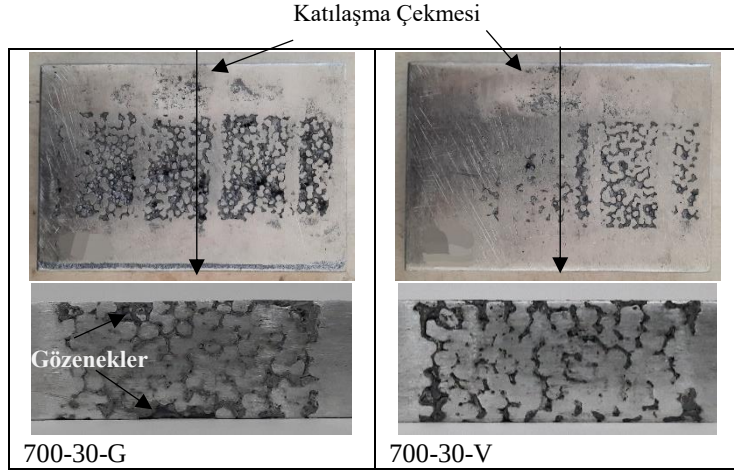
Resim 7.1. 650 °C döküm sıcaklığı ve 10 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri



Resim 7.2. 700 °C döküm sıcaklığı ve 10 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri



Resim 7.3. 650 °C döküm sıcaklığı ve 30 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri



Resim 7.4. 700 °C döküm sıcaklığı ve 30 ppi gözenekli takviye elemanı kullanılarak yerçekimi ve vakum etkisiyle üretilen FDM'lerin üst yüzey ve enine kesit görüntüleri

30 ppi seramik takviyeli FDM'lerde (Resim 7.3 ve 7.4) döküm sıcaklığı ve döküm yöntemine bağlı olarak sıvı metalin gözenek doldurma kabiliyeti değişmektedir. Aynı döküm yönteminde döküm sıcaklığı arttıkça üst yüzeydeki boş gözenek miktarı azalmaktadır. Ancak, aynı döküm sıcaklığında vakum destekli dökümle üretilen malzemelerde geleneksel döküme göre üst yüzeydeki gözenek miktarı daha azdır. 700-30-V'de gözenek neredeyse yok iken, diğer 30 ppi takviyeli malzemelerde alt ve üst yüzeylerde gözenek vardır. Döküm sıcaklığındaki artış veya vakum desteğiyle sıvı metalin akıcılığı artar ve böylece ince gözenekler kolaylıkla dolmaktadır. Hem yerçekiminin hem de vakumun etkisiyle gözenek miktarı alt yüzeyde daha azdır. 10 ppi gözeneklerin sıvı metal ile dolumu, 30 ppi takviyelere göre daha iyidir. Kalın kesitte sıvı metalin akıcılığı ince kesite göre daha yüksektir [53].

FDM numunelerin üst yüzeyinde sıvı metal giriş bölgesinde (meme bağlantı kısmı) belirgin bir katılma çekmesi (çukur şeklinde çöküntü) görülmektedir. Çünkü sıvı metalin tamamı bu bölgeden kalıp boşluğuna dolmaktadır. Bu nedenle sıcaklığın en yüksek ve katılmanın en son gerçekleştiği bölgedir. Aynı döküm sıcaklığı ve aynı takviyelerle üretilen parçalarda bu boşluk vakum desteği ile azalmaktadır. 650°C'de dökülen parçalarda aynı döküm yönteminde takviye gözenek yoğunluğu arttığında (10 ppi'den 30 ppi'ye), çekme boşluğu artmaktadır. 700°C'de ise aynı döküm yönteminde takviye gözenek yoğunluğu arttıkça, çekme boşluğu azalmaktadır. Döküm sıcaklığı arttıkça ince kesitlerde akış hızı artmaktadır. Ayrıca, vakum desteği ile akış hızı daha da artarak kalıp boşluğunun kısa sürede dolması sağlanır. Böylece sıvı metal giriş bölgelerindeki çekme boşluğunda azalma meydana

gelmektedir. Bilindiği üzere akış hızındaki artış sıvı metal ile kalıbın temas süresini azaltarak bölgesel ısınma ve ısı birikimini azaltır. Bu nedenle o bölgelerde katılaşma nispeten daha hızlı olmaktadır [53].

Döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretimi sırasında sıvı metalin akıcılığını etkileyen parametrelerden bazıları; kimyasal bileşim, döküm sıcaklığı, döküm hızı, ilave etkenlerin (basınç, vakum vb) kullanılması olarak sayılabilir.

Kimyasal bileşimdeki bazı elementler akıcılığı artırırken, bazıları ise azaltabilmektedir. Tez çalışmasında kimyasal analiz değişmediği için bu konu değerlendirme dışı bırakılmıştır. Döküm hızı; sıvı metalin döküş yüksekliği, yolluk sisteminin basınçlı olup olmadığı, yolluk sisteminin büyüklüğü, karmaşıklığı gibi tasarımsal faktörlere bağlıdır. Bu tez çalışmasında tüm numunelerde aynı şartlar uygulandığından değerlendirme yapılmamıştır. Ancak çalışmada tek meme bağlantısı kullanılarak sıvı metal akışı zorlaştırılarak vakum ve sıcaklığın etkisi daha güçlü bir şekilde gösterilmiştir.

Tez çalışmasında konunun karmaşıklaşmaması için sıvı metal akıcılığını etkileyecek 2 faktör bulunmaktadır. Bunlar döküm sıcaklığı (650 ve 700 °C) ve vakum uygulaması yapılmasıdır. Bilindiği üzere sıvı metalin akış hızı sıcaklık artışı ve vakum uygulamasıyla birlikte artmaktadır [53]. Çünkü her iki faktör de sıvı metalin akışına zorluk oluşturan yüzey basıncının azalması, vizkozitenin azalması, kalıp iç basıncının azaltılması, metal aktivasyon enerjisinin artması bakımından katkı sağlamaktadır.

Yüzeysel hatalar haricinde FDM numunelerin üretimi başarılı olmuştur. Çekme boşluklarının besleyici ihtiyacı olmadan giderilmesi ve yüzeydeki takviye gözeneklerinin tamamen sıvı metalle dolması açısından 700 °C sıcaklıkta 30 ppi gözenek oranı vakum uygulamasının yapılması uygun olacaktır. Ancak konuya daha geniş açıdan bakıldığında yolluk sisteminde cürufuk kullanılarak meme sayısı artırıldığında diğer üretim koşullarında da kusursuz denilebilecek şekilde FDM üretmek mümkün olacaktır.

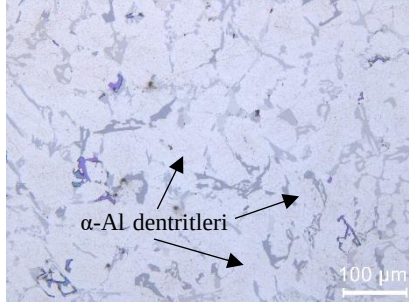
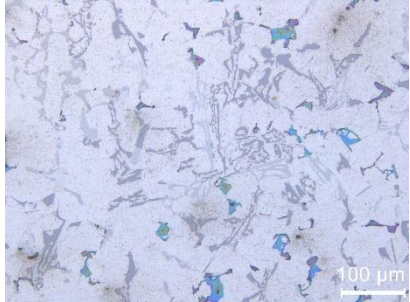
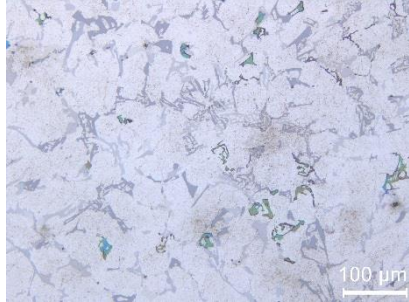
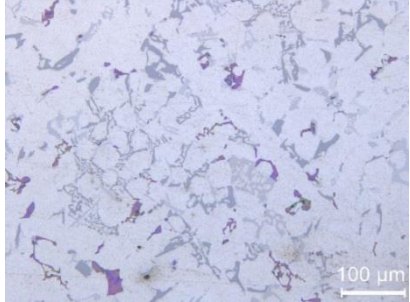
7.2. Mikroyapı İncelemeleri

Yapısal incelemeler optik ve taramalı elektron mikroskopisi teknikleri ile yapılmış ve sonuçlar ayrı başlıklar halinde değerlendirilmiştir.

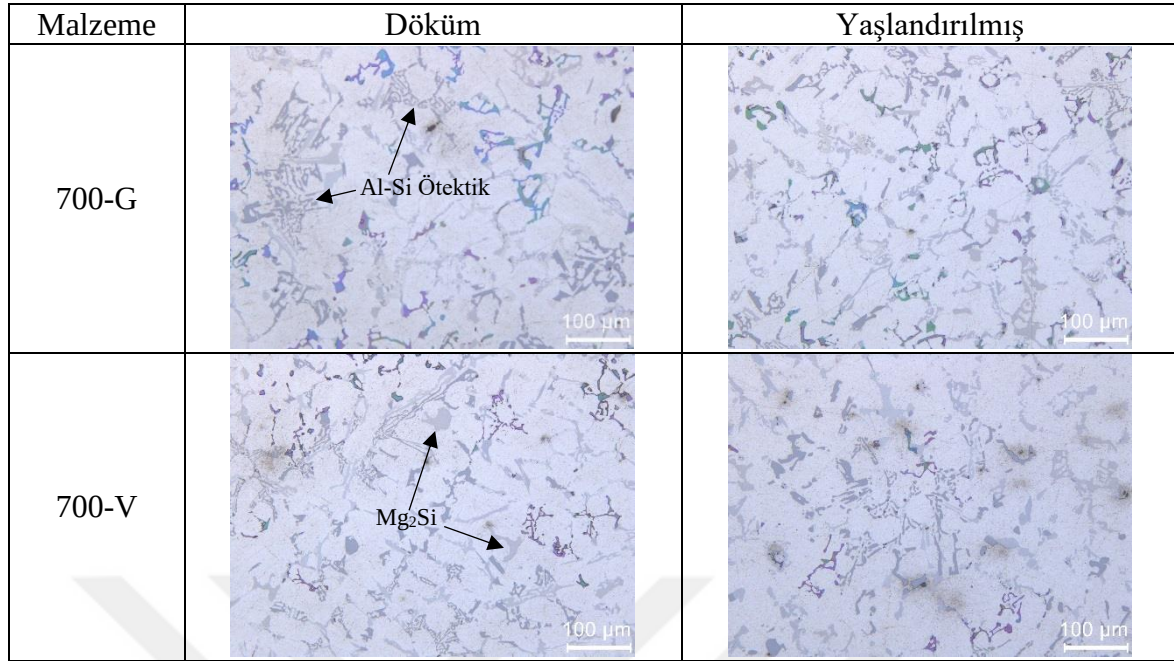
7.2.1. Optik mikroskop incelemeleri

Döküm ve ardından uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda üretilen numunelerden elde edilen optik mikroskop görüntüleri Resim 7.5, 7.6 ve 7.7’de verilmiştir. Yapılacak değerlendirmelerin daha kolay ve FDM malzemenin yapısal tasarımına uygun olarak; Resim 7.5’te sadece metal matris ve Resim 7.6 ve 7.7’de ise kompozit bölgelerin yapıları verilmiştir. Bu tez çalışmasının ana konusu üretim koşullarına bağlı olarak FDM üretiminin değerlendirilmesidir. Al matris malzemesinin yapı ve özelliklerinin değişimi ön plandaki konulardan değildir. Ancak uygulanan işlemler matris malzeme yapısına da etki ettiğinden ve bunun sonucunda mekanik özellikler de etkilendiğinden kısa da olsa değerlendirme yapılmıştır.

Resim 7.5’de görülen alüminyum alaşımlarının mikroyapısında genel olarak α -Al dentritlerine ve Al-Si ötektik fazına rastlanmaktadır. Bununla birlikte ötektik Si’den daha açık renkli Mg_2Si fazına da rastlanmaktadır. Üretim şartlarına bağlı olarak fazların şekil ve boyutunda değişimler görülmektedir. Döküm sıcaklığı arttıkça α -Al dentritleri ve ötektik yapı büyümektedir. Dökümde vakum desteği ile α -Al dentritleri küçülmekte, Si fazları incelmekte ve Si ve ötektik faz küreselleşmektedir. Vakum desteği sonucunda oluşan hızlı katılaşmanın oluşturduğu tanelerin ve dentrit kolları arasındaki mesafenin azalması dentrit ara yüzeyinde oluşan Si fazlarının küçülmesini sağlamıştır [53].

Malzeme	Döküm	Yaşlandırılmış
650-G		
650-V		

Resim 7.5. Döküm ve ısıl işlem sonrasında Al matris alaşımı mikroyapıları



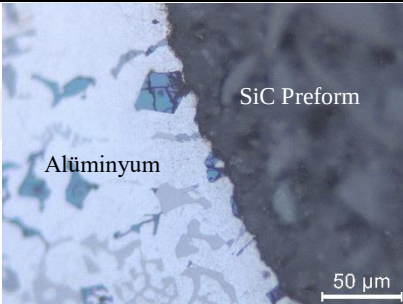
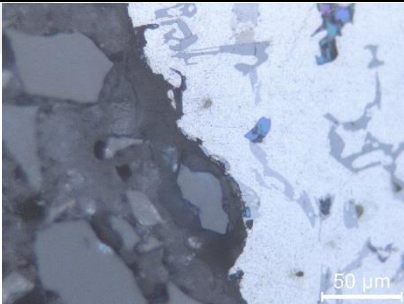
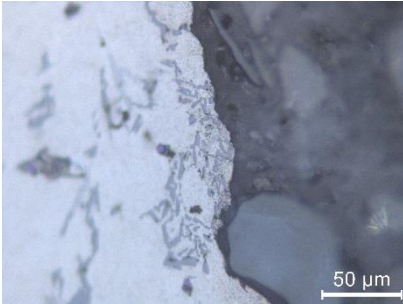
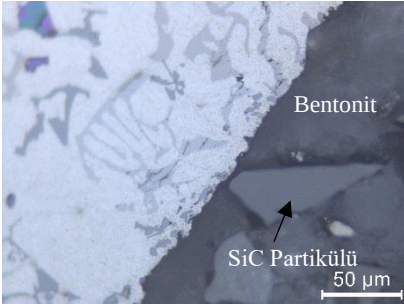
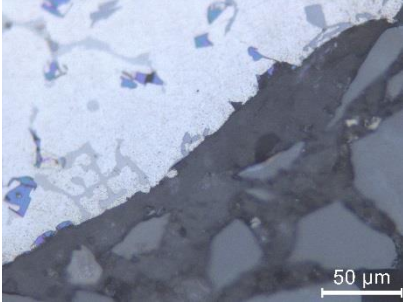
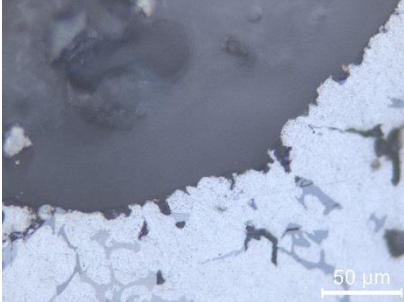
Resim 7.5. (devam) Döküm ve ısıtıl işlem sonrasında Al matris alaşımı mikroyapıları

Yaşlandırma ısıtıl işlemi birlikte ile Resim 7.5'deki mikroyapılarda ötektik yapının incelme ve ötektik silisyumda bir incelmeye ile birlikte küreleşme oluştuğu tespit edilmiştir. Yaşlandırılmış alaşımlarında Si fazının nispeten homojen dağıldığı belirlenmiştir. Bir çalışmada Al10SiMg alaşımlarına uygulanan yaşlandırma ısıtıl işleminde benzer mikro yapı elde edilmiştir [54]. Döküm alaşımlarında üretim şartlarının mikroyapıya etkisi, benzer şekilde yaşlandırılmış alaşımlarda tespit edilmiştir. Aynı sıcaklıkta dökülen yaşlandırılmış alaşımlarda vakum desteği sonucunda α -Al dentritleri küçülmüş, silisyum taneleri incelmış, Si ve ötektik alüminyum küreleşmiştir. Döküm sıcaklığı arttıkça α -Al dentritleri ve ötektik yapı büyümektedir.

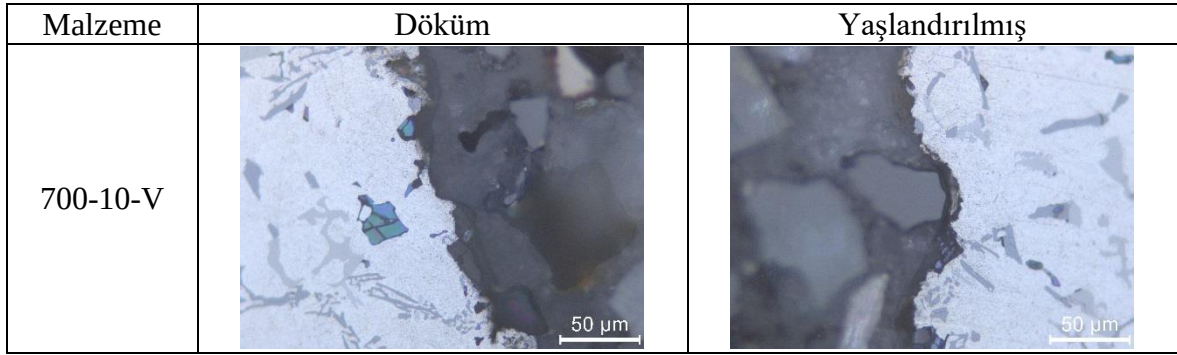
Resim 7.6 ve 7.7'de sırasıyla 10 ppi ve 30 ppi takviyeli FDM kompozitlerin matris-takviye ara yüzeylerinin mikroyapıları verilmiştir. Genel olarak ara yüzeyde bariz boşlukların görülmemesi, sıvı metalin takviyeyi yeterli düzeyde ıslattığını göstermektedir. Çünkü döküm öncesinde tüm takviye elemanları 550 °C'ye kadar ısıtılarak döküm işlemleri yapılmıştır. Böylece sıvı metalin seramiği ıslatması için soğuma hızı azaltılarak itici güç sağlanmıştır. Ancak detaylı incelemelerde çok küçük boyut ve noktalarda, özellikle FDM yüzeyi ve yüzey altı bölgelerde kusurların varlığı tespit edilmiştir. Bu durum optik görüntülerden net olarak görülmemektedir. Çünkü optik görüntülerin büyütme hızı yeterli olmamaktadır. Takviyede SiC parçacıklar ve bağlayıcı olan bentonit görülmektedir. Değişen üretim şartları ve ısıtıl işlemin matris ve takviye arasında kimyasal bir değişime neden olup

olmadığı optik incelemelerde tespit edilememiştir. Bu inceleme ve analizler bölüm 7.2.2’de SEM incelemelerinde detaylı olarak verilecektir.

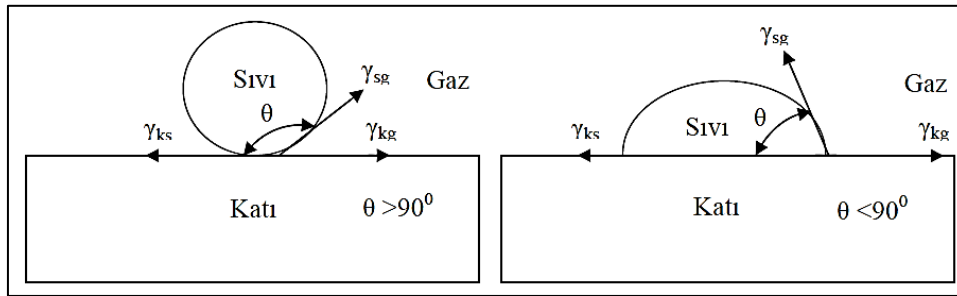
Sıvı metalin seramiği yeteri kadar ıslatmamasına bağlı olarak seramik bileşenle iyi bağ oluşturmaması, MMK üretiminde rastlanan en temel sorundur. Sıvı metaller genellikle seramik malzemeleri iyi ıslatamazlar. Bu durumun temel nedeni, seramiklerin özellikle oksitlerin yapısının iyonik veya kovalent olmaları ve metalik bağ yapısındaki metallerle uyumlu olmamasıdır. Bir sıvının bir katıyı ıslatmasındaki temel nokta olan iki bileşen arasındaki temas açısı (θ) oluşumu Şekil 7.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz ara yüzey enerjileri sırasıyla γ_{ks} , γ_{kg} ve γ_{sg} ile sembolize edilmiştir. Mükemmel bir ıslatmada, temas açısı sıfır olmakta ve böylece katı yüzeyi sıvı ile tamamen kaplanmıştır. Etkin bir ıslatmada $\gamma_{kg} > \gamma_{ks}$, yani temas açısının $\theta < 90$ olması gerekir. Temas açısının 180° olması durumunda ıslatma olmamaktadır [55].

Malzeme	Döküm	Yaşlandırılmış
650-10-G		
650-10-V		
700-10-G		

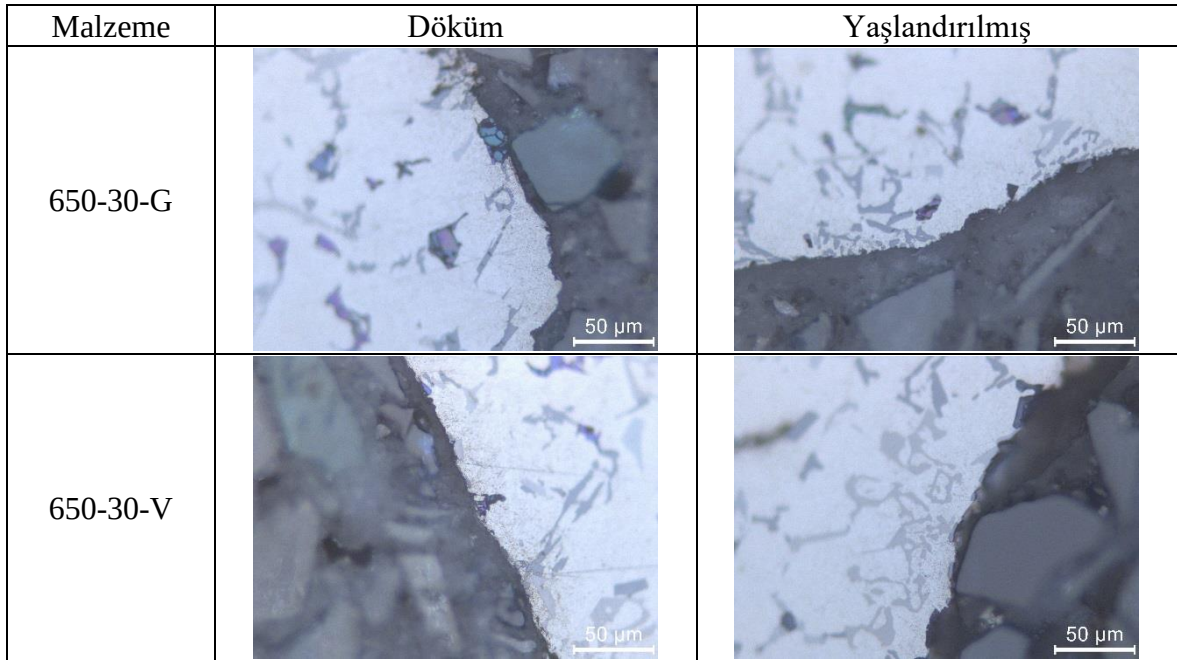
Resim 7.6. 10 ppi gözenek yoğunluklu FDM malzemelerin matris-takviye ara yüzey görüntüleri



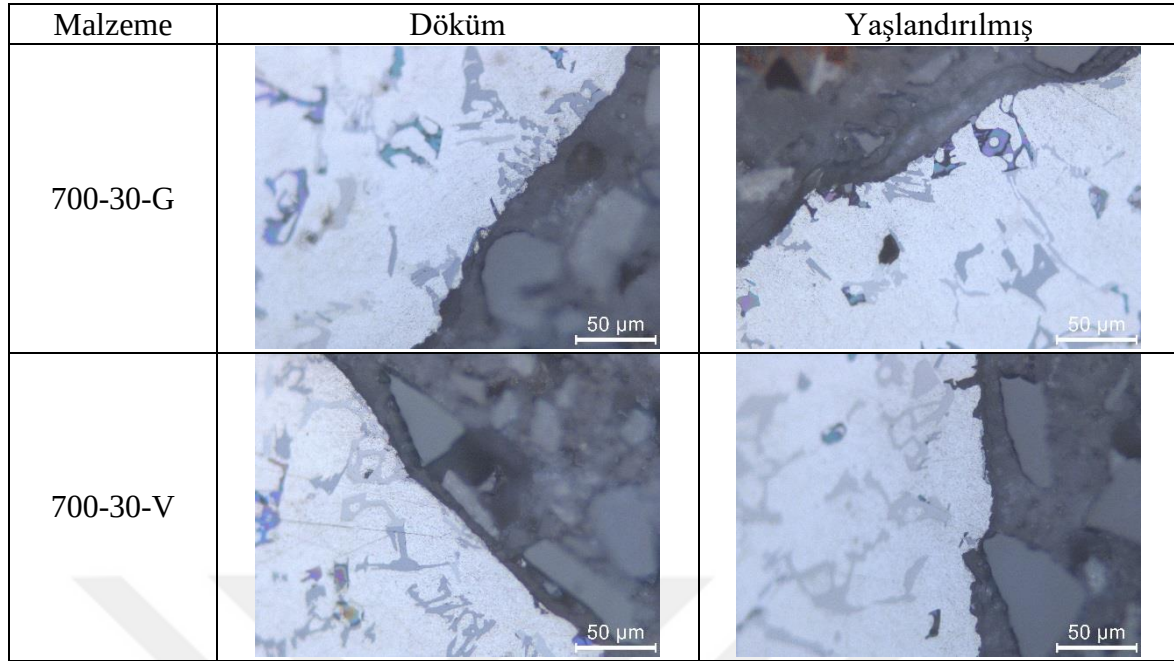
Resim 7.6. (devam) 10 ppi gözenek yoğunluklu FDM malzemelerin matris-takviye ara yüzey görüntüleri



Şekil 7.1. (a) ıslanmayan ve (b) ıslanan sistemlerde temas açısının, ara yüzey enerjilerinin ve ıslatma olayının sıvı damlacığı metoduna göre şematik gösterimi [55]



Resim 7.7. 30 ppi gözenek yoğunluklu FDM malzemelerin matris-takviye ara yüzey görüntüleri



Resim 7.7. (devam) 30 ppi gözenek yoğunluklu FDM malzemelerin matris-takviye ara yüzey görüntüleri

Temas açısının düşürülmesindeki temel amaç; ara yüzey bağ mukavemetini arttırmak ve matris-takviye ara yüzey özelliklerini geliştirmektir. Kompozitlerde matris-takviye ara yüzey özelliklerini etkileyen faktörler kalıntı gerilmeler, sıcaklık ve difüzyondur. Ara yüzeyde kompozisyonun etkisiyle oluşan intermetalik bileşikler, karşılıklı difüzyon etkileşimlerinin değiştirdiği ara yüzey geometrisi ve boyutları; fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerde kompozit malzemenin kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir [55].

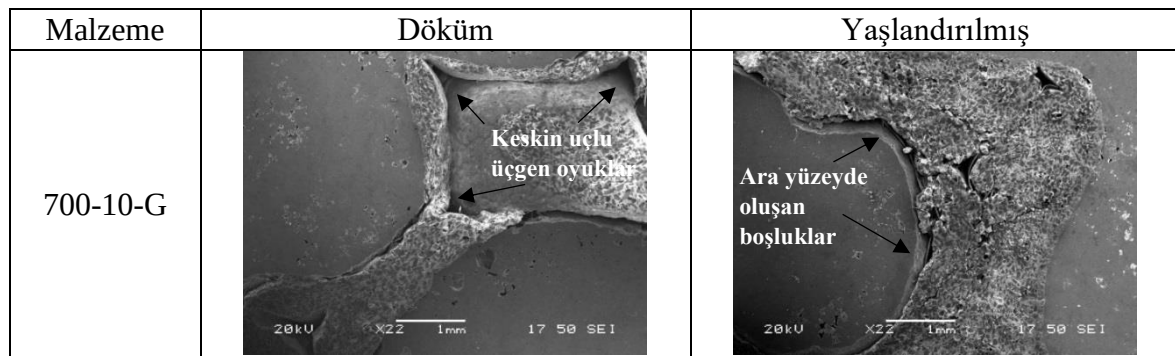
Alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozitlerin üretiminde rastlanan en büyük problemlerden birisi, yüksek sıcaklıklarda SiC takviyenin sıvı alüminyum ile tepkimeye girmesi ve düşük sıcaklıklarda ise SiC takviyenin ıslanabilme özelliğinin az olmasıdır. SiC takviyenin alüminyum ile tepkimeye girmesi sonucu matris-takviye ara yüzeyinde kompozit özelliklerini olumsuz etkileyen Al_4C_3 tepkime ürünü meydana gelmektedir. [2].

Al-MMK'de ıslatılabilirlik genellikle sıvı alüminyum sıcaklığı ve temas süresi ile doğru orantılıdır. Vakum ya da inert atmosfer ortamında yapılan ergitmelerde de ıslatma yeteneği artmaktadır. Bazı alaşım elementleri alüminyumun ıslatma yeteneğini artırmaktadır ve bu elementler arasında yaygın olarak Mg tercih edilir. Birden fazla tekniği bulunan takviye fazın metalik tabaka ile kaplanması ıslanabilirliğini artırmaktadır. Takviye bileşeninin belirli sıcaklığa kadar ön ısıtılması, üretim sırasında, sıvı metalin sıcaklığının hızla düşmesini ve

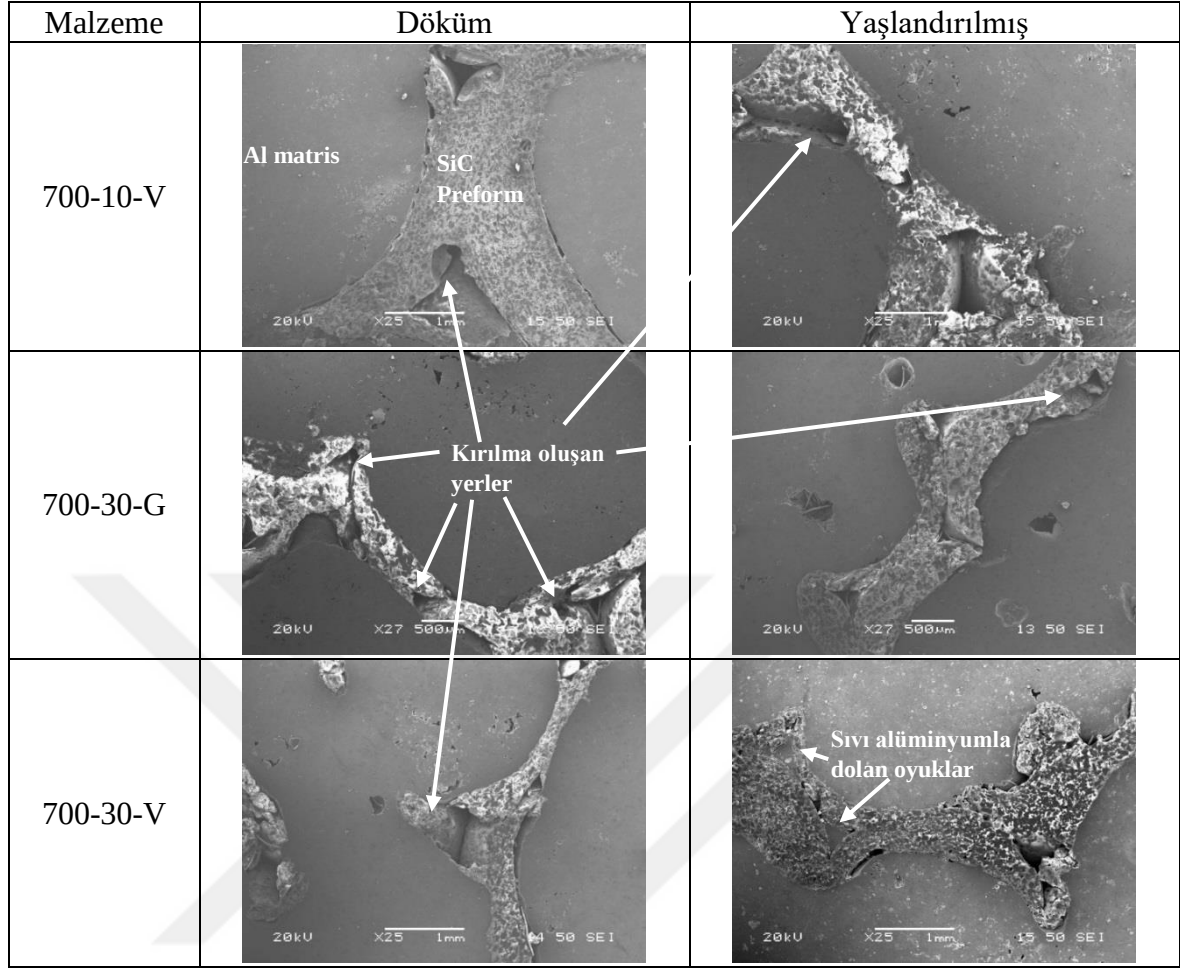
takviyeyle temas halindeki sıvı metalin hemen katılaşıp ısıtmayı engellemesini önleyici etki yapar. Bu amaçla takviye ve matris bileşenlerine bağlı olarak takviyeler, 400-800 °C arasında ön ısıtmaya tabi tutulabilir [56]. Bu çalışmada ısıtılabilirliğin artırılabilmesi için takviyelere döküm öncesi ön ısıtma uygulaması ve sıvı metale Mg ilavesi yapılmıştır. FDM kompozitlerin mikroyapılarında ısılanabilirlik ve kimyasal değişim incelenmiştir.

7.2.2. SEM incelemeleri ve EDS analizleri

Optik incelemelerde matris/takviye ara yüzey görüntülerinin benzer olduğu görülmüştür. Ancak yüksek döküm sıcaklığı ve ısıtma işleminin ara yüzey detay görünümü ve matris/takviye etkileşimlerinin gösterilmesi amacıyla 700°C’de üretilen FDM kompozitlere SEM incelemeleri ve EDS kimyasal analizleri yapılmıştır. Resim 7.8’de matris ve takviye bileşenlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Matris/takviye ara yüzeyinin çoğunlukla birbirlerine yapışmış olmasına rağmen, çok az da olsa boşlukların da bulunduğu görülmüştür. Bu boşlukların bir kısmı (keskin köşeli ve kırık şeklinde olanlar), malzemelerin abrasif diskle kesimi ve zımparalanması sırasında seramik parça kopması sonucu oluşabilmektedir. Bu durum nispeten ısıtma olmasına rağmen, matris/takviye ara yüzey bağının zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Döküm sıcaklığını artırmanın ısıtılabilirliği artırdığı bilinmektedir. 700 °C sıcaklıkta döküm sonucunda daha iyi ısıtmaya rağmen ara yüzey bağının zayıf olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla 650 °C sıcaklıkta dökümde bağın daha zayıf olduğu, takviye/matris arasındaki kimyasal etkileşimlerin daha az olabileceğini ve seramik parça kopmalarının daha fazla oluşabileceğini düşündürmektedir. Bu yüzden 650°C’de üretilen FDM’lerin SEM incelemeleri ve analizleri yapılmamıştır.



Resim 7.8. 700°C’de dökümü yapılan ve ısıtma işlem uygulanan malzemelerin SEM görüntüleri



Resim 7.8. (devam) 700°C’de dökümü yapılan ve ısıtılma işlemi uygulanan malzemelerin SEM görüntüleri

Yapılan bir çalışmada; demir matrisli kompozit için replika yöntemi ile üretilen gözenekli SiC seramiğin sinterlenmesi sırasında poliüretan süngerlerin yanması nedeniyle seramikte keskin uçlu belirgin üçgen oyuklar gözlemlenmiştir. Bu oyuklar, Fe matrisli gözenekli SiC takviyeli kompozit üretimi sırasında ergimiş metalin yüzey gerilimi ve çok ince bölgeler olması nedeniyle doldurulamamaktadır. Bu durum sadece SiC seramiklerin değil, aynı zamanda kompozitin de mukavemetini azaltmaktadır. Bu durumda malzeme aşınma veya sürtünmeye maruz kalırsa; bu üçgen boşluklar seramiğin kırılmasına ve özellikle koparak ara yüzeyde kalan SiC parçacıkların aşınma özelliğini kötüleştirebileceği belirtilmektedir. Bu boşlukların azaltılması için tekrar ya da ikincil kaplama tekniği uygulanmıştır [57].

Tez çalışmasında üretilen numunelerde de seramik malzemede gözenek kenarlarında bu üçgensel boşluklar bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan takviye elemanı bu çalışma için özel olarak üretilmediğinden takviyenin yapısal özellikleri kontrol edilememektedir. İleride

yapılacak çalışmalarda gözenek şeklinin olabildiğince dairesel olması hem iyi bir ıslatma sonucunda yapısal kusurların hem de mekanik özelliklerin geliştirilmesinde yararlı olacağı düşünülmektedir. Özellikle köşe kısımlardaki bu boşlukların sıvı alüminyum ile dolumu zordur. Bunun için çok daha yüksek döküm sıcaklıkları ve uzun katılaşma süreleri gerekir. Bu koşulların değerlendirilmesi başka bir çalışmanın konusu olabilecek değerdedir. Preform kullanılarak kompozit üretimi yapılan çalışmalarda [2, 34, 58, 59] daha yüksek sıcaklıklarda döküm, takviyenin ve kalıbın ısıtılması ve sadece takviye kadar bir numune üretilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle numune şeklinde daha başarılı üretimlerin yapılması mümkün olabilmektedir. Ancak bu çalışmada seri üretime uygun olması bakımından bu alaşımlar için uygulanmakta olan döküm şartları tercih edilmiştir. Ancak bu çalışmadaki dezavantajlara rağmen, daha yüksek döküm sıcaklığı ve vakumun etkisinden dolayı 700-30-V malzemesinde bu gözeneklerin bazıları sıvı metal ile neredeyse kusursuz bir biçimde doldurulmuştur.

Isıl işlem uygulamasının bu ara yüzey kusurlarını gidermede etkisinin olmadığı, fakat temasın iyi olduğu kısımlarda kimyasal etkileşimler nedeniyle özelliklerin gelişmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

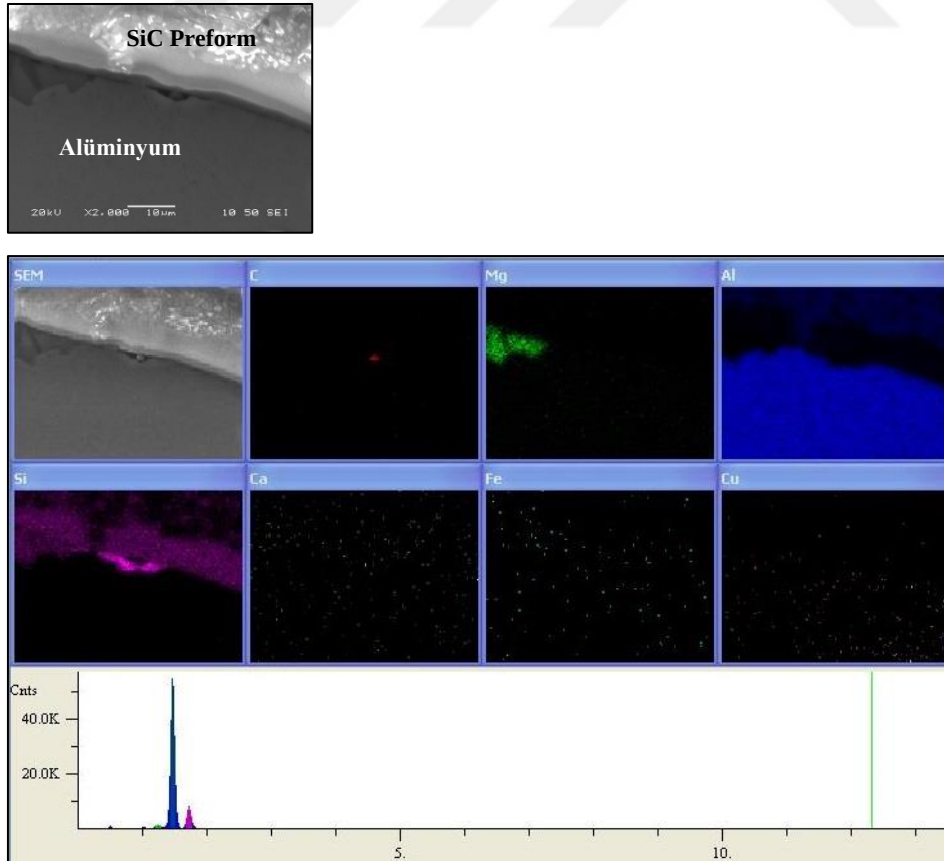
SEM incelemesi yapılan numunelere EDS analizleri yapılarak uygulanan döküm ısıl işlem koşullarının matris/takviye ara yüzey özelliklerine etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla 700°C’de üretilen FDM kompozitlerin matris/takviye ara yüzeylerine EDS analizi ve kimyasal geçişkenliğin gösterilmesi amacıyla elementel haritalama uygulaması yapılmıştır. Elde edilen veriler Resim 7.9-7.16’da verilmiştir. FDM malzeme yüzeylerindeki uyumsuzluk ve yükselti farklılığı nedeniyle EDS çizgi analizi yapılamamıştır. Bunun yerine alansal ve noktasal analizler yapılmıştır. Yüksek döküm sıcaklığında ıslanabilme özelliğinin iyi olması ve sıcaklığın difüzyonu hızlandıran etken olması nedenleriyle ara yüzeydeki kimyasal değişim daha belirginleşir.

İncelenen numunelerdeki kimyasal haritalamalar incelendiğinde; sonuçların birbirlerine yakın olduğu ve elementlerin dağılımının bütün malzemelerde benzer olduğu görülmüştür. Bu elementlerden Al, Si, Cu, Mg ve Fe matriste, takviyede de Si ve Fe bulunmakla birlikte Ca ve C elementleri takviyeye aittir. Takviyedeki Si ve C elementleri SiC seramikten kaynaklanmaktadır. Ayrıca seramikte bağlayıcı olan bentonit içeriğinde Si, Mg, Fe ve Ca bulunmaktadır. Bütün malzemelerde ilk dikkat çeken durum; matristeki kadar olmasa da

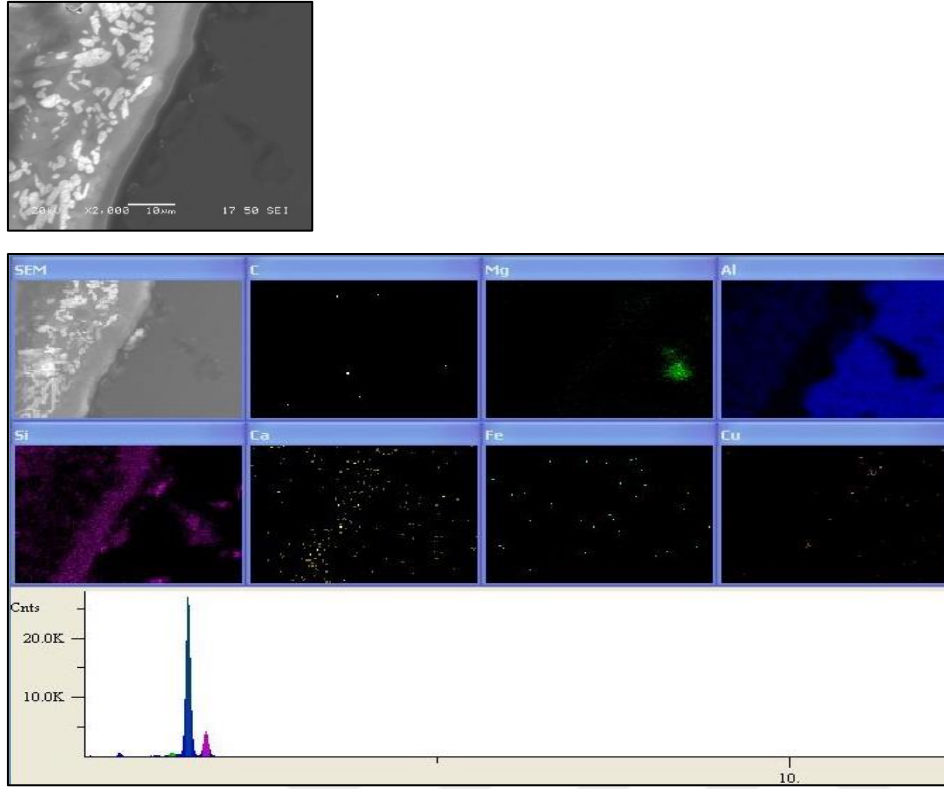
takviyede belirgin bir Al varlığının olmasıdır. Numuneler inceleme için hazırlanırken abrasif kesme ve zımparalama yapılmaktadır. Bu işlemler sırasında yumuşak Al malzeme takviye yüzeyine sıvanarak kalmaktadır. Ancak Al bentonit üzerine sıvanırken, yüksek sertliği nedeniyle SiC parçacık üzerine tutunamadığından sıvanmamaktadır. Bu nedenle bu elementin dağılımı homojen olmayan kalıntı oluşumu şeklindedir.

Alüminyumdan sonra dikkat çeken ikinci husus C elementidir. Bu elementin atom boyutunun diğerlerinden küçük olması nedeniyle yapılan analizde diğer elementler gibi belirgin şekilde gösterilememiştir. Özellikle SiC bölgelerde görülmektedir.

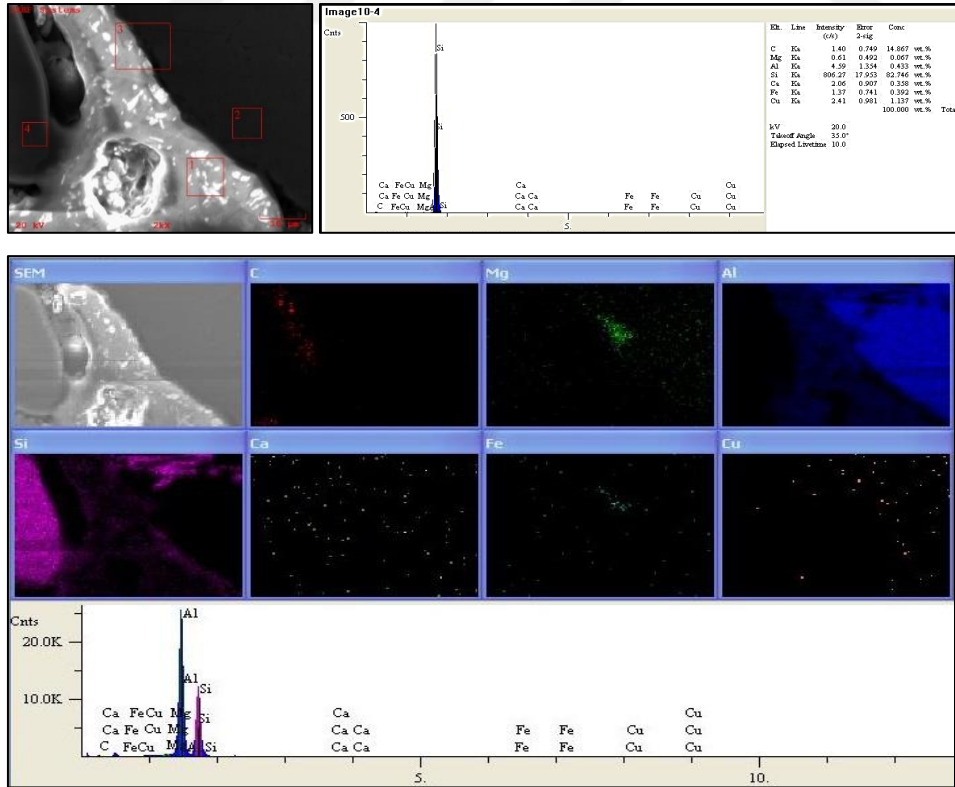
Matris, bentonit ve SiC'ün ihtiva ettiği Si en yoğun yayılımını SiC parçacık ve matristeki Si fazı üzerinde göstermektedir. Bentonit üzerindeki Si yoğunluğu ise sıvanan alüminyumun yoğunluğuna bağlıdır. Al sıvanmasının olmadığı bölgelerde Si yoğun görülürken sıvanma olan bölgelerde seyrek görülmektedir. Malzemelerin genelinde Si yoğunluğu aynı olmakla birlikte matris ve takviye üzerinde ara yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak Si yoğunluğunda bir değişim yoktur.



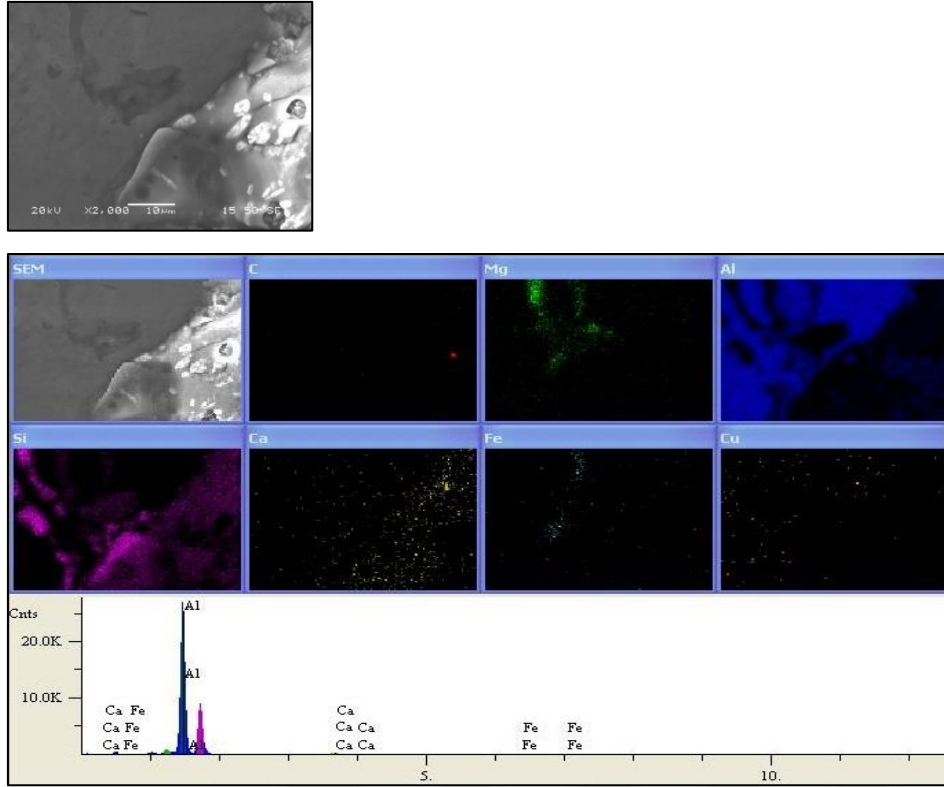
Resim 7.9. Döküm 700-10-G'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması



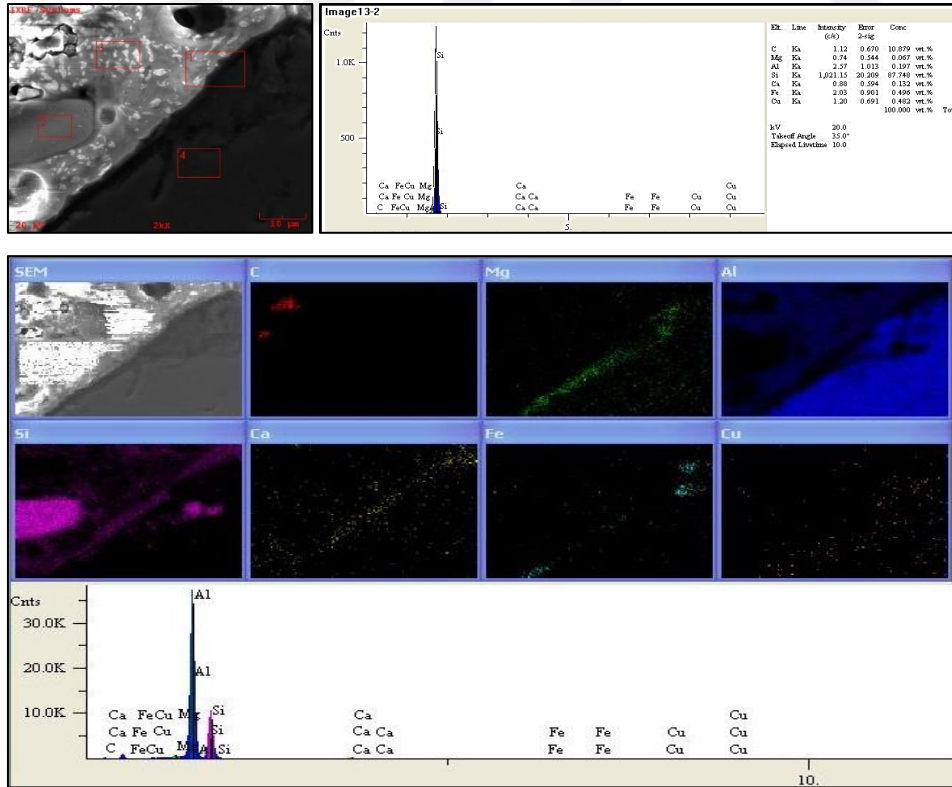
Resim 7.10. Yaşlanmış 700-10-G'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması



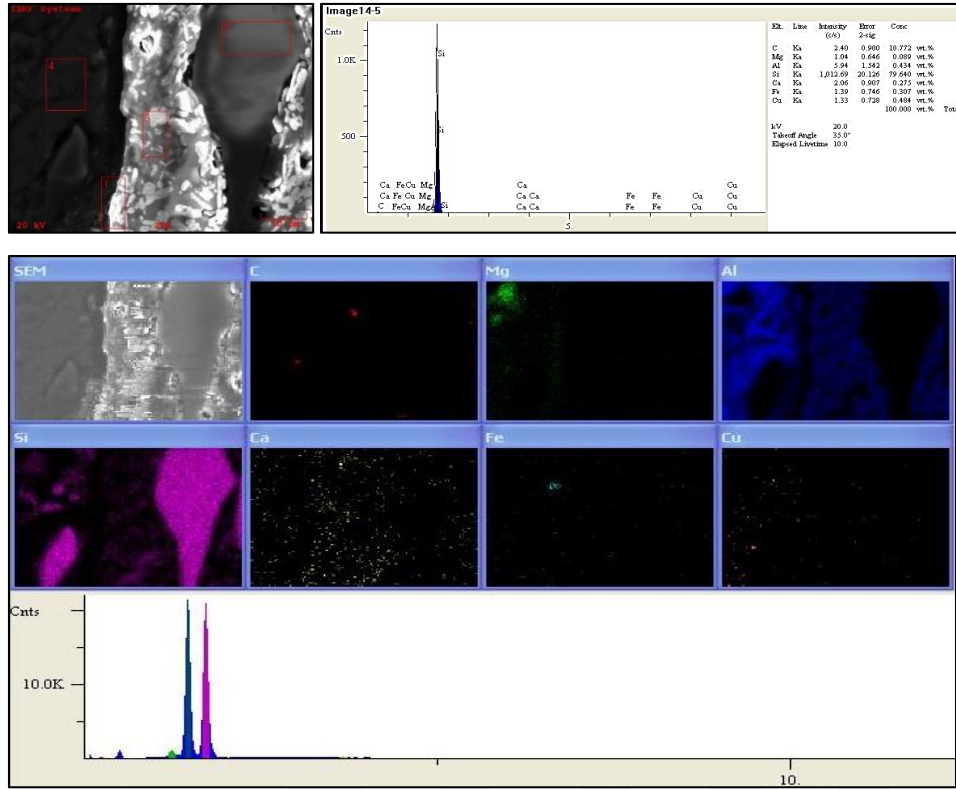
Resim 7.11. Döküm 700-10-V'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması



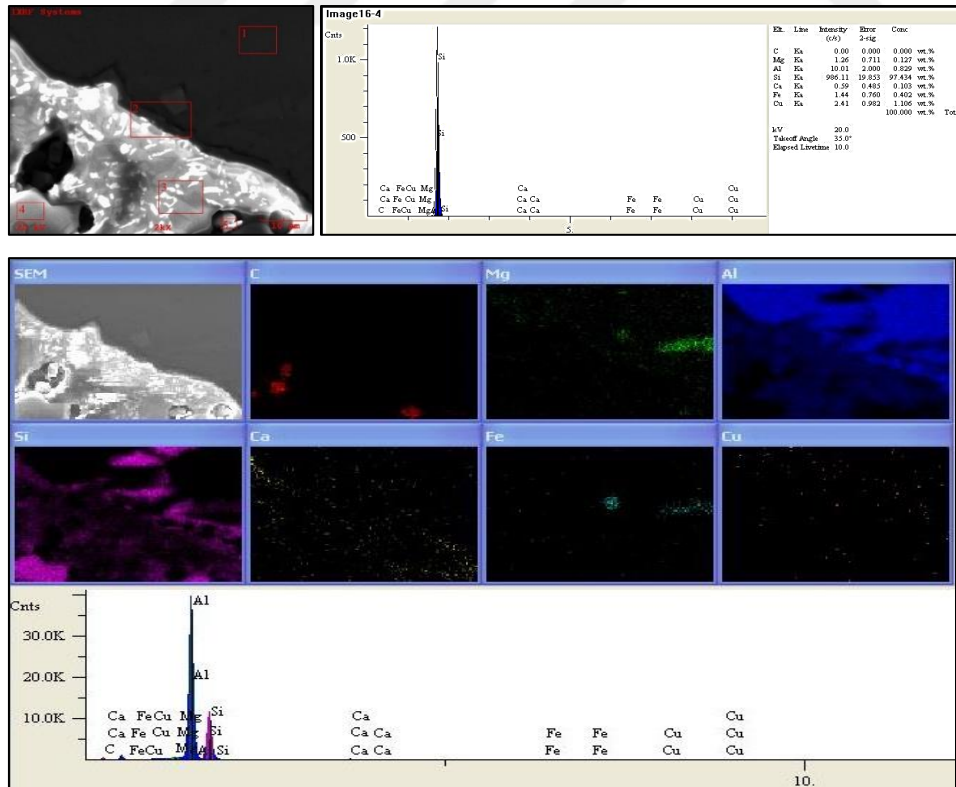
Resim 7.12. Yaşlanmış 700-10-V'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması



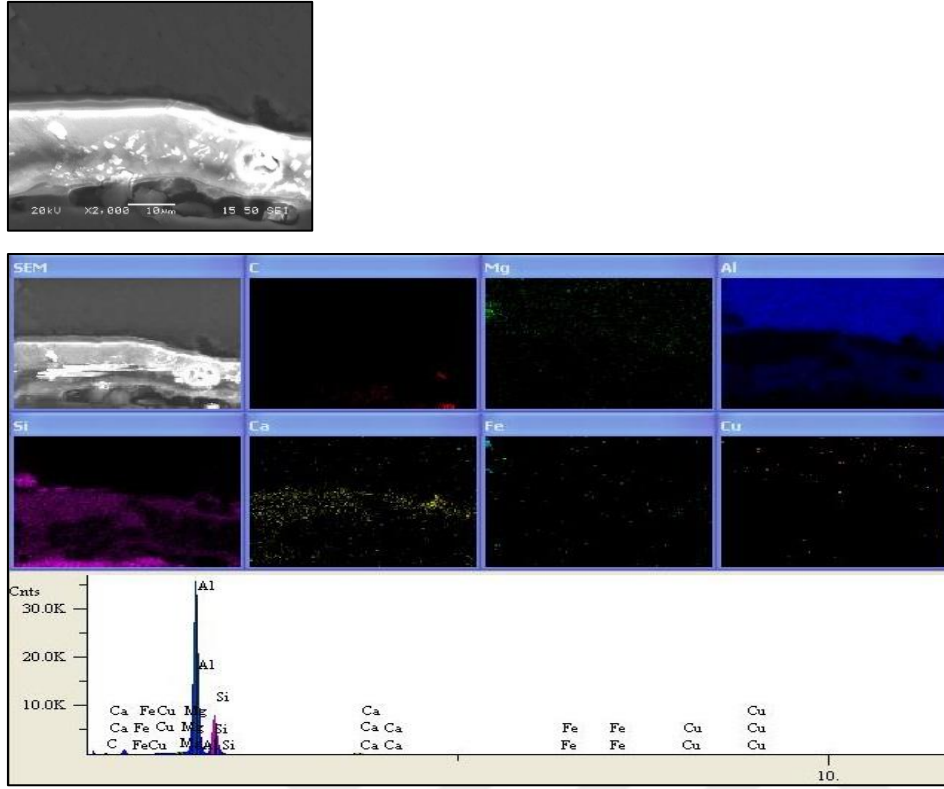
Resim 7.13. Döküm 700-30-G'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması



Resim 7.14. Yaşlanmış 700-30-G'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması



Resim 7.15. Döküm 700-30-V'nin EDS analizi ve ara yüzey kimyasal haritalaması



Resim 7.16. Yaşlanmış 700-30-V'nin ara yüzey SEM görüntüsü ve kimyasal haritalaması

Si gibi; Ca yoğunluğu da alüminyum sıvanmasından aynı şekilde etkilenmektedir. Ayrıca bentonittekinden daha seyrek olarak SiC parçacık üzerinde de yayılış göstermiştir. Bununla birlikte kalsiyumun matriste yayılışı bütün malzemelerde aynı olmakla birlikte matriste ara yüzeyden uzaklaştıkça yoğunluğu azalmaktadır. Bu durum kısmi difüzyona işaret etmektedir.

Matris alaşım elementi olan bakır, bütün malzemelerde benzer şekilde takviye üzerinde bulunmamakta ve ara yüzeyden uzaklaştıkça yoğunluğu azalmaktadır. Ancak bu yayılış kalsiyumun matristeki yayılışı kadar belirgin değildir. Ayrıca, özellikle ısıtıl işlem gören numunelerde Al sıvanmayan bölgelerde de bakıra rastlanması kısmi difüzyon sonucunda olduğu düşünülmektedir.

Haritalamalarda karbonun net görünmeyip, EDS analizinde yüksek bir oranda çıkması dikkat çekicidir. Bu durum haritalama programının alana düşen yoğunluğa göre işlem yapmasından kaynaklanmaktadır. Toplamda miktarı az olan elementlerin dağılımında da problem olmaktadır.

Matris elementi magnezyumun takviye üzerinde vakum destekli dökümlerde belirgin bir yayılımı görülürken geleneksel dökümlerdeki yayılımı ise daha seyrek. Bunun dışında diğer şartların Mg yayılımı üzerinde bir etkisi yoktur. Fe ise her iki bileşenin elementi olduğu için bütün malzemelerin haritalamalarında eşit dağılımlı görülmektedir.

Bir çalışmada üretilen koloidal silika bağlayıcılı SiC preform içerisine sıvı haldeki A356 alaşımı 730°C sıcaklıkla 10^{-5} Pa vakum altında infiltre edilmiştir. Bu çalışmada, matris ve takviye arasında Si, C ve Al'un mesafeye bağlı olarak değişimini incelemek amacıyla yapılan çizgi EDS analizinde takviyeden matrise geçişte yaklaşık 3 mikronluk kısımda lineer olarak silisyum ve karbonun azaldığı, alüminyumun ise arttığı görülmektedir. Bu kısım haricinde matris ve takviyenin diğer bölgelerinde önemli bir değişim görülmemiştir. Aynı çalışmada SiC üzerinde nokta analizinde C atom numarası küçük olduğu için tespit edilmemekle birlikte çizgi analizinde ise belirgin biçimde az da olsa tespit edilmiştir [60].

Bu tez çalışmasında genel olarak üretim koşullarına bağlı olarak; matris ile takviye elemanı arasında kimyasal olarak ciddi miktarda bir etkileşimin oluşmadığı tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığındaki artış ve uygulanan ısıtma işleminin de çok küçük bir etkisi olduğu söylenebilir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda mümkün oranda uzun katılaşma süreleri sağlanması durumunda bu etkileşimlerin tespiti mümkün olacaktır. Ayrıca takviye elemanının hazır bir malzeme yerine, uygun yapıda ve bileşenlerden oluşturulması bu ilişkilerin tespiti açısından gerekmektedir.

7.3. Sertlik Testi Sonuçları

Hem Al hem de FDM'lerin kompozit bölgelerindeki alüminyum matrisin sertlikleri ölçülmüş ve sonuçlar Çizelge 7.1, Şekil 7.2-7.4'de verilmiştir. Beklendiği üzere T6 yaşlandırma ısıtma işlemi sonucunda malzemelerde alüminyum sertliği genel olarak artmıştır. Kompozit malzemelerde de takviyesiz malzemelerle karşılaştırmanın kolay olması için sertlik ölçümleri kompozit kısmın Al matris üzerinden alınmıştır. Döküm sonrasında malzeme sertlikleri 88-94 HV aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar genel olarak benzer bileşimdeki döküm Al alaşımları ile uyumludur. Sonuçlara bakıldığında kompozit olan numunelerde bir miktar (%3-6) daha düşük olduğu görülmektedir. Sertlik döküm malzemelerde özellikle soğuma hızına bağlı olarak değişim göstermektedir. Soğuma hızındaki artış katılaşma süresini azaltarak tane sayısını, sertliğe etki eden faz miktarı ve

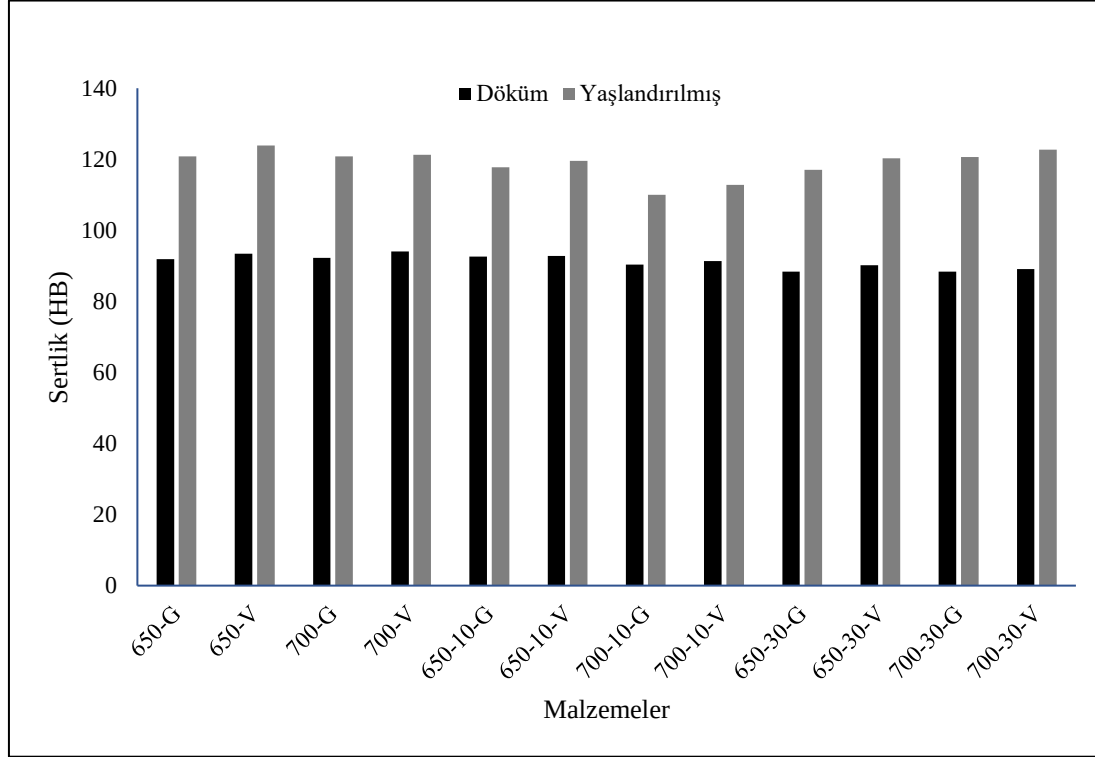
dağılımını artırmaktadır. Bu durum sertliğin artmasına neden olmaktadır [61]. Buradan hareketle seramik takviye bulunan kompozit numunelerde nispeten daha düşük soğuma hızı sertliğin de azalmasına yol açmıştır. Döküm durumunda en yüksek sertlik değerleri Al numunelerde 700-V ve FDM numuneler arasında ise 650-10-V numunesinde meydana gelmiştir.

Çizelge 7.1. Alüminyum ve FDM kompozit matris sertliklerinin döküm şartlarına bağlı olarak değişimi

MALZEME	SERTLİK (HB)	
	DÖKÜM	YAŞLANDIRILMIŞ
650-G	91,9±2	120,8±4
650-V	93,38±3	123,89±9
700-G	92,22±3	120,82±4
700-V	94,08±1	121,25±5
650-10-G	92,64±3	117,75±5
650-10-V	92,83±1	119,53±10
700-10-G	90,36±1	110±4
700-10-V	91,38±3	112,78±3
650-30-G	88,38±9	117±5
650-30-V	90,21±2	120,25±8
700-30-G	88,34±4	120,6±6
700-30-V	89,14±4	122,75±4
*** SiC seramiğin sertliği 2500 HK değerindedir [62]		

Yaşlandırma işlemi, oluşan çökelti fazlar nedeniyle Al malzemelerde sertliğin artmasına neden olmaktadır [31]. Yaşlandırma sonucunda takviyesiz alüminyumların sertliği belirgin olarak artarken, bazı FDM'lerin matris sertliğinde artış oranı daha düşük kalmıştır. Bu farklılığın nedeni SiC seramiğin ısı iletkenliğinin alüminyuma göre düşük olmasına bağlı olarak T6 ısıtım işlem adımlarında ısınma ve soğuma hızlarının arzu edilenden düşük olması, bunun çözündürme ve çökelti ısıtım işlem adımlarının süresini etkilemesi ve su verme sırasında soğuma hızındaki düşüş sonucu mikroyapıdaki aşırı doygun α -Al çözeltisinin arzu edilen miktarda oluşmamasıdır. Isıtım işlemle sertlikteki artış oranı en yüksek olan ve bütün malzemeler arasında en yüksek sertliğe sahip malzemeler Al numunelerde 650-V ve FDM numunelerde ise 700-30-V numunesinde olmuştur. Şekil 7.2'te görüldüğü üzere takviyesiz alüminyumların üretiminde vakum desteğinin sertliği bir miktar artırdığı görülmektedir. Bir çalışmada da vakum miktarındaki artışın sertliği artırdığı ayrıca geleneksel dökümde belli bir değere kadar döküm sıcaklığındaki artışın sertliği artırdığı ancak yüksek döküm

sıcaklığında belli bir vakum değerine kadar sertliğin arttığı tespit edilmiştir [53]. Ancak FDM’lerde döküm yöntemi, döküm sıcaklığı ve takviye cinsine bağlı olarak farklı bir durum söz konusudur. Döküm sıcaklığının artması sertliğin azalmasına neden olmuştur.

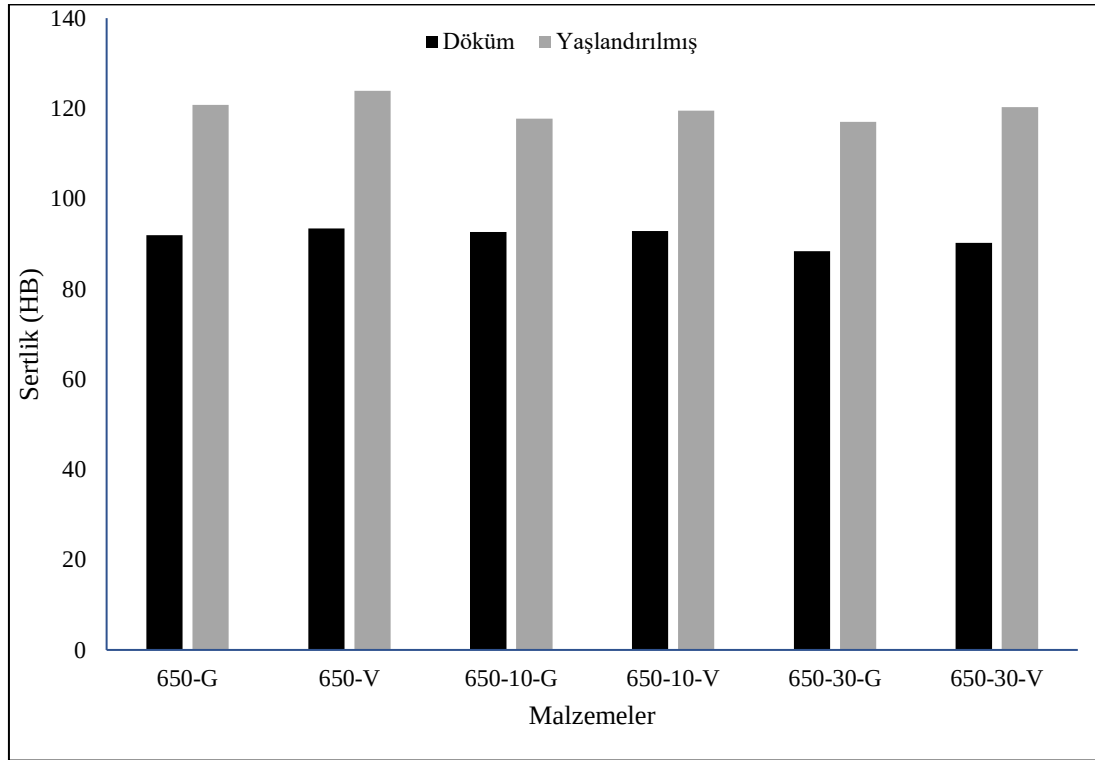


Şekil 7.2. Alüminyum ve FDM kompozit numune matris sertliklerinin döküm şartlarına bağlı olarak değişimi

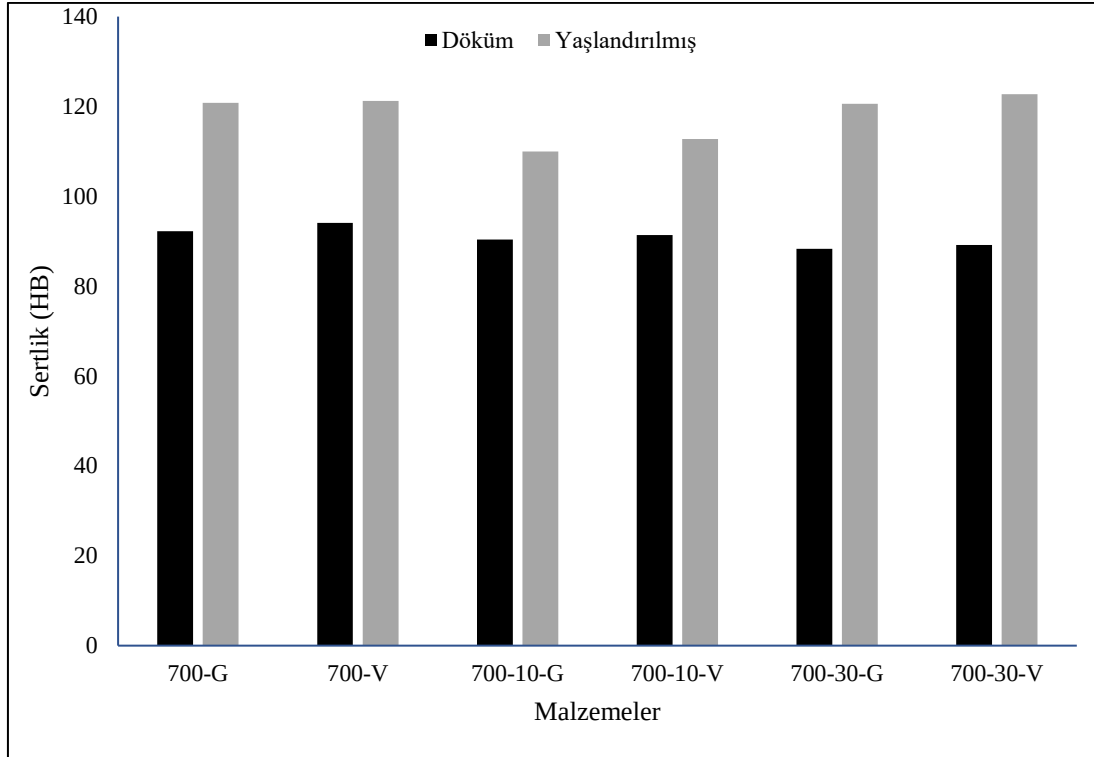
Şekil 7.2’te döküm yönteminin etkisi, takviyesiz alüminyumlardaki gibi FDM’lerin alüminyum matris sertliğinde görülmemektedir. Çünkü kalıp boşluğunun ortasındaki gözenekli preformdaki akıcılık kalıp boşluğuna göre azdır. Bununla birlikte döküm öncesinde ısı iletkenliği düşük olan seramik takviyelere uygulanan ön ısıtma, döküm sırasında sıvı metalin yavaş soğumasını tetikleyerek katılaşmanın yavaşlamasına neden olur. Bu durum, iri tanelerin oluşumuna neden olarak mukavemeti ve sertliği düşürür [61]. Dolayısıyla değişen üretim şartları, malzemelerde takviye cinsine bağlı olarak farklı özelliklerin ortaya çıkmasına neden olur.

Şekil 7.3 ve 7.4’te döküm sıcaklığına bağlı olarak sertlik değişimleri verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında aynı döküm sıcaklığında vakum uygulaması ve düşük gözenek (gözenek sayısı az) yoğunluğunun sertliği artırdığı tespit edilmiştir. Düşük döküm sıcaklığı ve gözenek yoğunluğu soğuma hızını artıran bir etki yapmaktadır. Artan soğuma hızı çekirdeklenmeyi

teşvik ederken, tane sayısını artırmaktadır. Artan tane sayısı da sertliğin artmasına yol açmaktadır. 10 ppi gözenek yoğunluğuna sahip takviye elemanları daha fazla metalik matrise sahiptir. Çünkü gözenek boyutları daha fazladır. Bu durumda seramik takviyenin matrisin soğuma hızını azaltması yüksek gözenek yoğunluklu (30 ppi) malzemeye göre daha az olmaktadır. Bu nedenle katılma hızı yüksek olmakta ve sertlik de artmaktadır. Diğer yandan vakum uygulaması gibi malzeme yoğunluğunu artıran şartlarda malzemenin sertliği de artmaktadır [61].



Şekil 7.3. 650°C’de üretilen alüminyum ve FDM kompozit matrislerinin sertliği



Şekil 7.4. 700°C’de üretilen alüminyum ve FDM kompozit matrislerinin sertliği

7.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Alüminyum ve FDM’lerin 3 nokta eğme dayanımları ile deformasyon oranları Çizelge 7.2’de verilmiştir. Her bir numune için ortalama eğme dayanım ve deformasyon değerleri gösterilmiştir. Döküm durumunda takviyesiz alüminyumların FDM’lere göre eğme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Görüldüğü üzere takviyesiz malzemelerin maksimum değer olan eğme dayanımına ulaştığı andaki deformasyon miktarı da FDM’lere göre yüksektir. Yaşlandırma sonrasındaki dayanımlar incelendiğinde ise, T6 ısıtılmasının takviyesiz alüminyumların dayanımı üzerinde nispeten etkili olduğu görülmektedir. Isıl işlem, takviyesiz alüminyumların deformasyonlarında da değişikliğe neden olmuştur.

Takviyesiz malzemelerde aynı döküm sıcaklığında vakum desteği dayanımı artırırken, 700°C döküm sıcaklığı dayanımı azaltmıştır. T6 ısıtılmasının 700°C’de üretilen takviyesiz malzemelerin dayanımını daha yüksek oranda artırdığı görülmektedir. Takviyesiz döküm ve yaşlandırılmış grupların kendi içinde dayanımları deformasyon oranı ile paralellik göstermektedir. Ancak ısıtılma işlemi; 650°C’de üretilen numunelerin dayanımını artırıp deformasyon oranını azaltırken, 700°C’de üretilenlerin ise dayanımını ve deformasyon

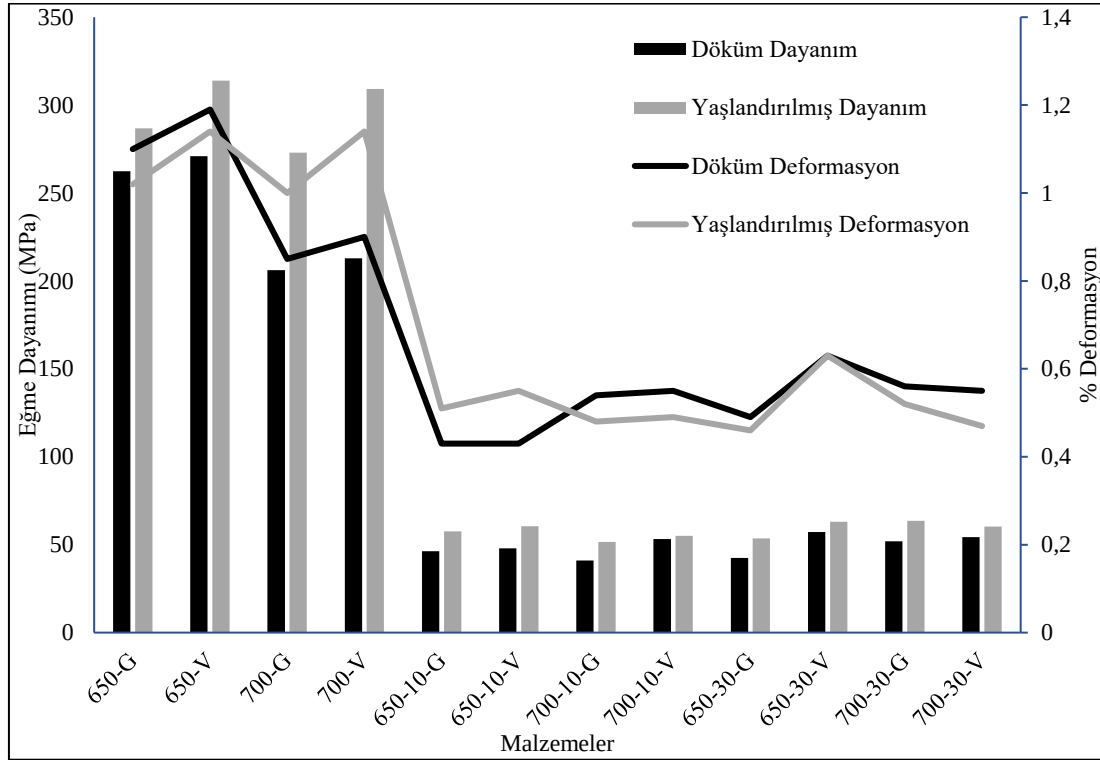
oranını artırmıştır. Dolayısıyla üç nokta eğme testinde mekanik özellik bakımından en üstün malzeme yaşlandırılmış 650-V numunesine aittir. Diğer yandan ısıtılma işleminin neden olduğu eğme dayanımı üzerindeki en yüksek artış oranı da 700-V numunesinde meydana gelmiştir. Bu sonuçlar; döküm durumunda düşük sıcaklıkta üretilen ve ısıtılma işlemi sonrası ise yüksek sıcaklıkta üretilen takviyesiz numunelerde artışın olduğunu göstermektedir. İlave olarak, vakum uygulaması beklendiği gibi tüm numunelerde eğme dayanımını iyileştirmiştir (Şekil 7.18).

Çizelge 7.2. Döküm koşullarına bağlı olarak alüminyum ve FDM’lerin üç nokta eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişimi

MALZEME	EĞME DAYANIMI (MPa)		DEFORMASYON (%)	
	DÖKÜM	YAŞLANDIRILMIŞ	DÖKÜM	YAŞLANDIRILMIŞ
650-G	262,47±6	286,79 ± 13	1,10	1,02
650-V	271,02 ± 7	313,97±44	1,19	1,14
700-G	206,07 ± 11	272,90±5	0,85	1,00
700-V	212,88 ± 3	309,16 ± 4	0,90	1,14
650-10-G	46,33±2	57,61±4	0,43	0,51
650-10-V	47,91± 6	60,42±8	0,43	0,55
700-10-G	41,05±1	51,64±20	0,54	0,48
700-10-V	53,17±4	55,10±0	0,55	0,49
650-30-G	42,45±1	53,63±3	0,49	0,46
650-30-V	57,27±5	63,02±16	0,63	0,63
700-30-G	51,88±11	63,60± 15	0,56	0,52
700-30-V	54,39±2	60,40±7	0,55	0,47
*** 10 ppi 1,49 ve 30 ppi ise 1.71 MPa’dır.				

Şekil 7.5’ten de görüldüğü üzere, FDM’lerin eğme dayanımı ve deformasyon oranları belirgin biçimde takviyesiz alüminyumlardan daha azdır. Bununla birlikte üretim şartlarına bağlı olarak takviyesiz malzemelerde görülen değişim FDM’lerde de görülmektedir. Üretim şartları, malzeme özelliklerine bağlı olarak FDM’lerin eğme dayanımında takviyesiz malzemelere göre farklı sonuçlar ortaya çıkarmıştır. FDM’lerde SiC preform takviyesinin dayanımı ve deformasyonu düşürdüğü anlaşılmaktadır. Bunun en önemli sebeplerinden birisi preformların sürekli ağlar şeklinde ve malzemenin tamamına yayılmış olmasındandır. Test sırasında uygulanan yük, dayanımı düşük olan preform tarafından absorbe edilememektedir. Kompozit kısmındaki Al matris miktarı takviyesiz numunelere göre daha az olduğundan kolaylıkla kırılma meydana gelmektedir. Diğer yandan, SEM incelemelerinde bulunan SiC preform üzerindeki sivri uçlu üçgen oyuklar numunenin

nispeten erken kırılarak düşük deformasyon oranı ve düşük dayanım değerine sebep olmuştur. Çünkü keskin köşe ve uç kısımlar çatlak başlangıcı için potansiyel noktalar oluşturmaktadır.



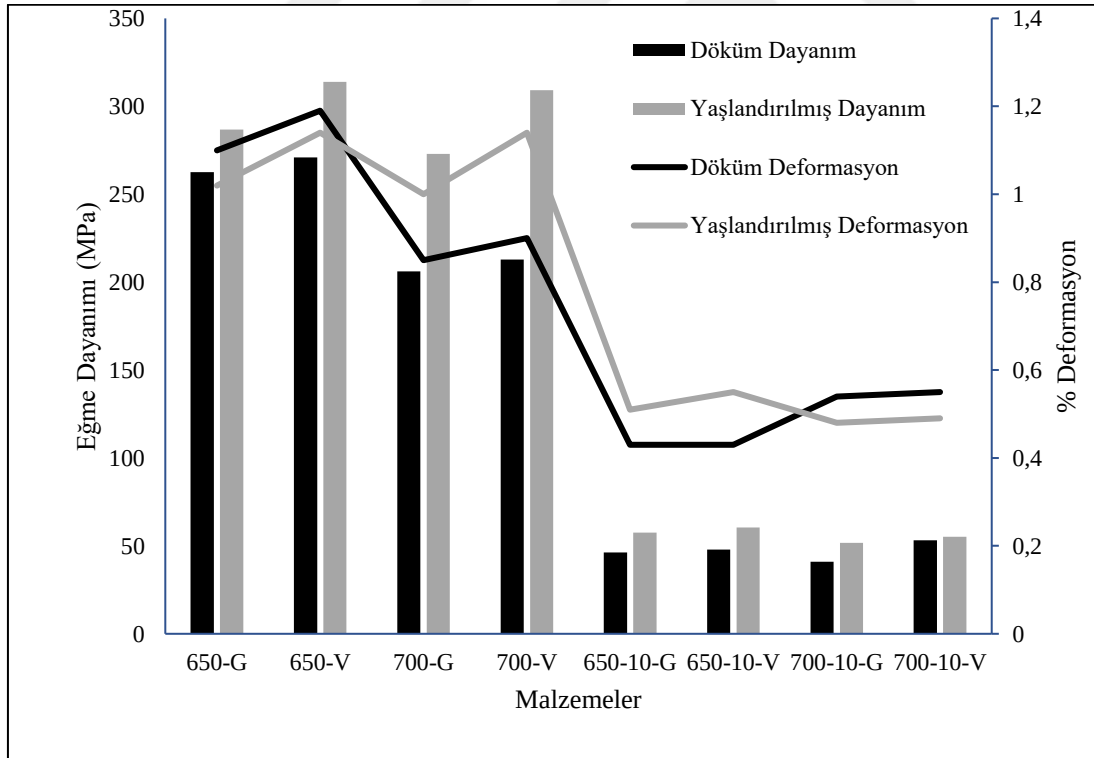
Şekil 7.5. Döküm koşullarına bağlı olarak alüminyum ve FDM'lerin üç nokta eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişimi

Malzeme hatalarının yanı sıra FDM'lerin eğme dayanımında etken ara yüzey bağı ve ara yüzey kimyasal özelliğidir. Bileşenler arasındaki zayıf kimyasal etkileşimler, bilindiği üzere SEM incelemelerinde tespit edilmiştir. Şekil 7.5'de ısıtılmanın FDM'lerin dayanımını belirgin biçimde artırdığı görülmektedir. 10 ppi ve 30 ppi takviyeli FDM'ler grup olarak değerlendirildiğinde 30 ppi takviyelilerin döküm ve yaşlandırılmış dayanımı daha yüksektir.

Bir çalışmada [2]; 800°C'de basınç infiltrasyon yöntemiyle üretilen AlSi10Mg matrisli 45-60 ve 80 ppi SiC preform takviyeli kompozitlerin eğme dayanımı takviye gözenek yoğunluğu arttıkça artmaktadır. Bu kompozitler, eğme dayanımı 165 MPa olan takviyesiz matris alaşımından yüksek dayanım göstermekle birlikte preform yüzeylerine yapılan bakır ve nikel kaplama da dayanımı artırmıştır. Akımsız metal kaplama tekniği ile yapılan bu kaplama sıvı metalin takviyeyi ıslatabilme özelliğini artırarak ara yüzey bağ kuvvetini artırmıştır.

Bu çalışmada ise takviye preformlarına kaplama ve yüzey işlemleri yapılmadığı gibi, aynı zamanda FDM (bir kısmı Al bir kısmı ise kompozit malzeme) üretilmiştir. Bahse konu çalışmada sadece preformun içerisine basınç ile metal matris dolumu yapılmıştır. Bu tür uygulama matris malzemesinin daha yüksek yoğunlukta ve az boşluklu olarak kompozit bölgenin doldurulmasına olanak sağlamaktadır. Diğer yandan bizim çalışmamızın hedefi benzer malzeme ile FDM olarak malzeme üretimi olduğundan sadece preform içerisine Al matrisinin doldurulması söz konusu olmamaktadır. Bu durumda preform gözeneklerinde kısmi boşluklar ve yüzeylerde kaynaşma/ıslatma/bağlanma sorunları ortaya çıkabilmektedir.

Şekil 7.6 ve 7.7’de preform gözenek yoğunluğuna göre gruplandırma yapılarak sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; hem döküm hem de ısıtma işlem sonrasında 650°C’de üretilen FDM’lerin dayanımının 700°C’de üretilenlere göre genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki döküm sıcaklığında da vakum uygulanması sonucunda dayanım değerleri yükselmiştir.

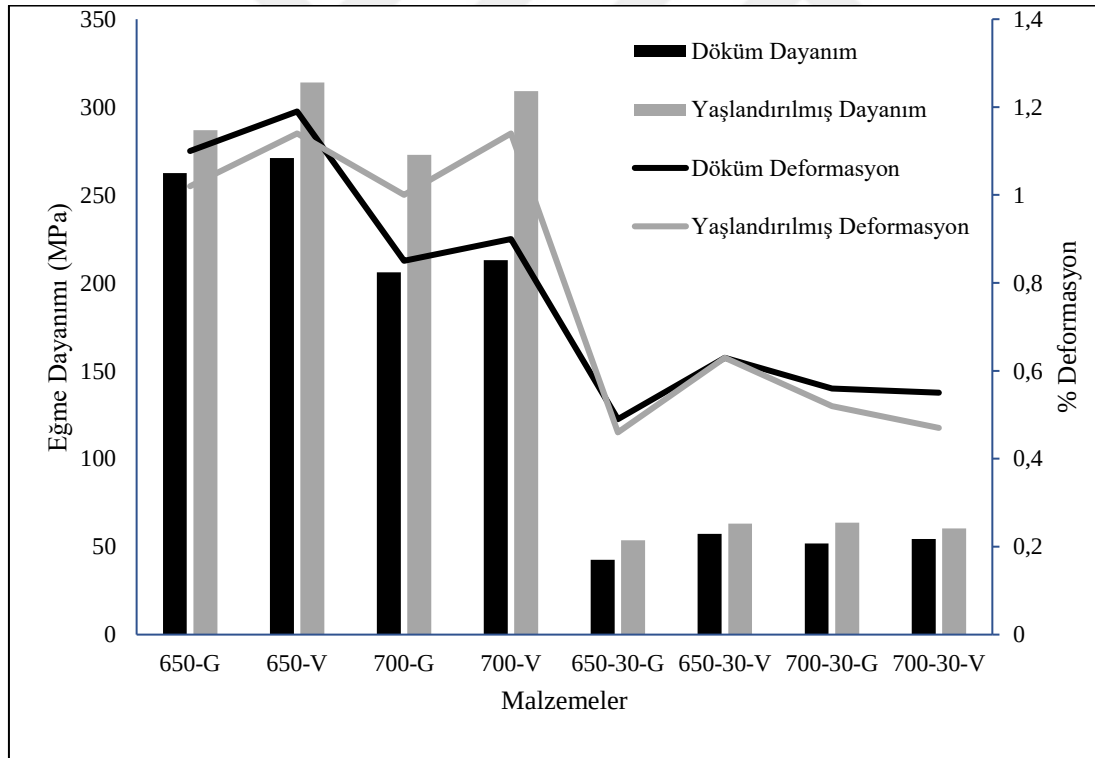


Şekil 7.6. 10 ppi preform gözenek yoğunluğuna sahip malzemelerin eğme dayanımı ve deformasyon oranlarının değişimi

Diğer yandan preform gözenek yoğunluğuna göre değerlendirme yapıldığında; genel olarak hem döküm hem de yaşlandırma durumunda 30 ppi preformlu FDM numunelerinin daha

yüksek özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Takviye preformların gözenek yoğunluğu azaldıkça gözeneklerin preformdaki hacimsel oranı artmaktadır [63]. 30 ppi gözenekli preform kullanılan malzemelerde eğme testi sırasında matris malzemede preform bileşeni/matris bileşeni oranı daha yüksek olmaktadır. Bundan dolayı test sırasında matris üzerinde oluşan toplam deformasyon yükü (F/A gibi düşünüldüğünde) azalmaktadır. Buna bağlı olarak; hem döküm hem de ısıtılmalı malzemelerde 10 ppi preformlu malzemeler daha düşük eğme dayanımına sahip olmaktadır.

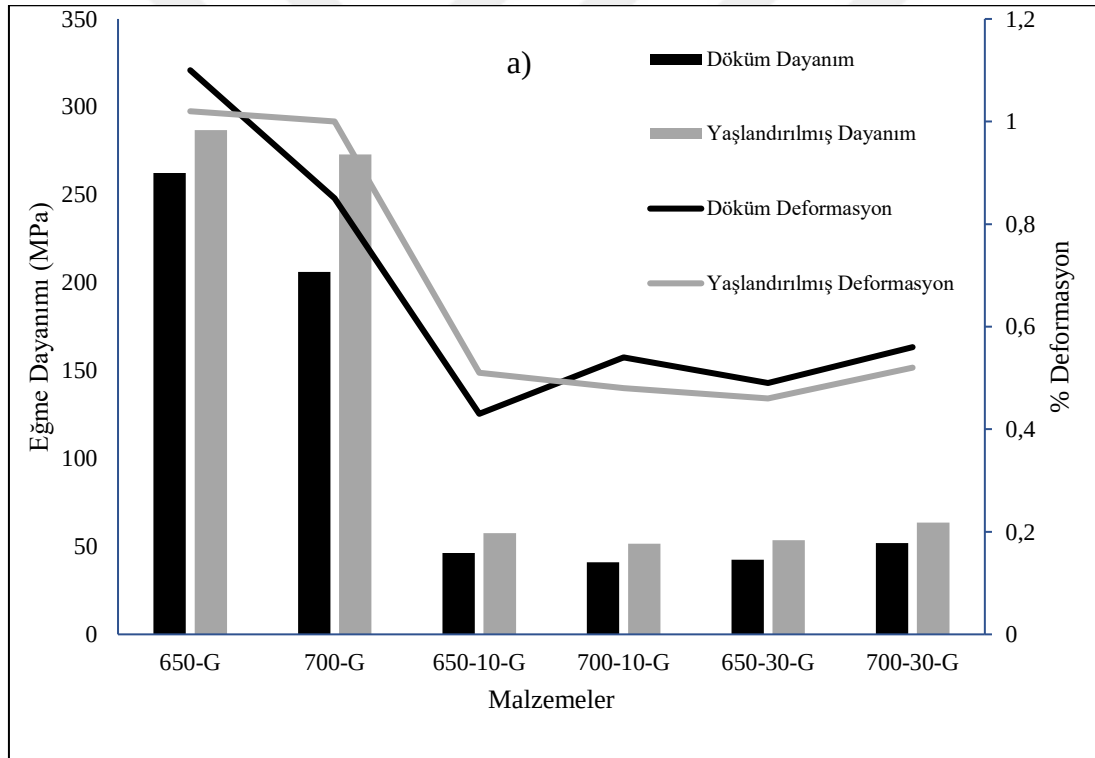
Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında SiC seramik preformların Arşimet prensibiyle teorik yoğunlukları 0,0001 g hassasiyetdeki terazide ölçülmüştür. 10 ppi preformun teorik yoğunluğu $2,52 \text{ g/cm}^3$ iken 30 ppi preformun ise $2,63 \text{ g/cm}^3$ tür. Seramik takviyelerin yoğunluğunun da eğme dayanımında doğru orantılı olarak etkisinin olduğu söylenebilir.



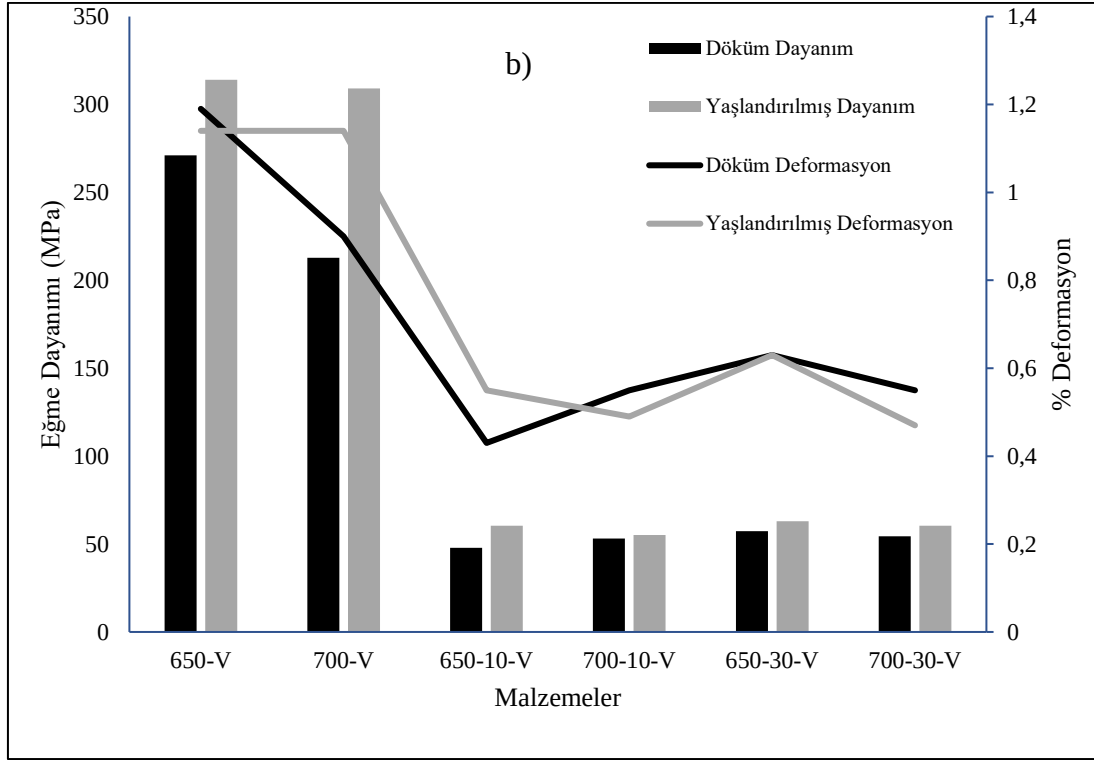
Şekil 7.7. 30 ppi preform gözenek yoğunluğuna sahip malzemelerin eğme dayanımı ve deformasyon oranlarının değişimi

Şekil 7.8’de vakum uygulamasına göre gruplandırılarak sonuçlar verilmiştir. Geleneksel döküm FDM’lerin döküm dayanımları, vakum destekli yöntemle göre daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Yapılan bir çalışmada [58], hazırlanan gözenekli $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ preform

takviye edilerek %10 Si ve %1,2 Mg içeren alüminyum matrisli kompozit malzeme gaz basınçlı infiltrasyon yöntemiyle 3 farklı sıcaklık ve 3 farklı gaz basıncı altında üretilmiştir. Elde edilen 12 farklı malzemeye yapılan eğme testleri sonucunda infiltrasyon sıcaklığı ve basıncı arttıkça eğme dayanımının arttığı görülmüştür. Benzer sonuçlar bu çalışmada vakum desteğinin FDM'lerin döküm eğme dayanımı üzerine etkisinde görülmektedir. Yaşlandırma sonrası dayanımlara bakıldığında ise, yine vakum destekli döküm FDM'lerin dayanımı yüksektir. Bilindiği üzere seramik preformdaki hatalar ve döküm şartlarına bağlı olarak oluşan döküm hataları üretim şartlarının etkisinin belirgin olarak ortaya çıkmasını engellemektedir. Buna bağlı olarak da; takviyesiz malzemelerin dayanımında döküm yöntemi ve ısı işlemin etkisi belirgin olarak görülürken FDM'lerde bazı farklılıklar söz konusudur.



Şekil 7.8. Vakum uygulamasına bağlı olarak malzemelerin ortalama eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişim, a) Geleneksel ve b) vakum destekli döküm sonuçları

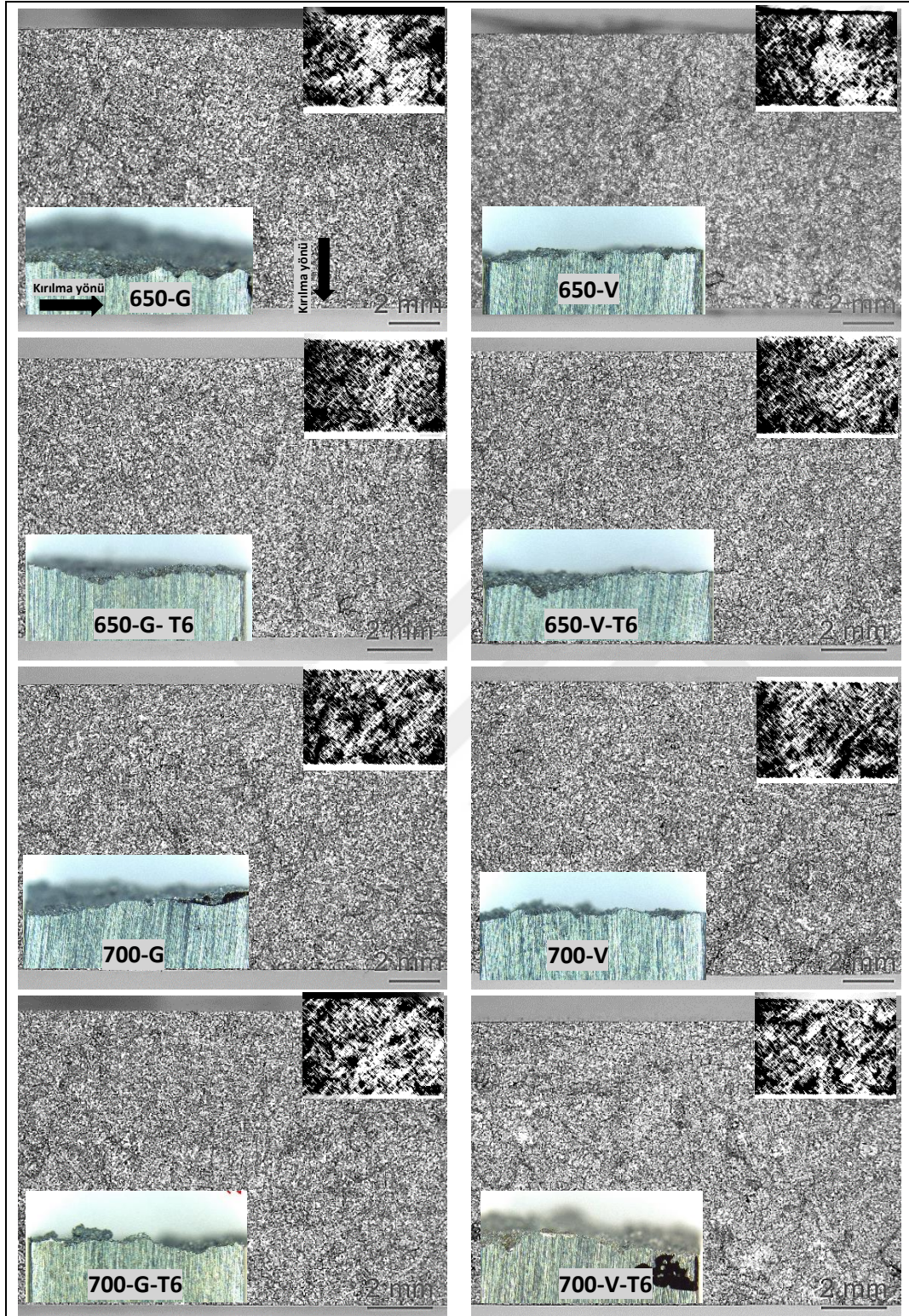


Şekil 7.8. (devam) Vakum uygulamasına bağlı olarak malzemelerin ortalama eğme dayanımları ve deformasyon oranlarının değişim, a) Geleneksel ve b) vakum destekli döküm sonuçları

7.4.1. Eğme numunelerinin kırılma yüzeylerinin incelenmesi

Elde edilen eğme dayanımı sonuçlarının daha iyi anlaşılması bakımından test numunelerine ait kırık yüzey ve kırık profilleri incelenmiştir. Bu incelemelere ait bazı eğme numunelerinin stereo mikroskopla elde edilen kırılma yüzey görüntüleri Resim 7.17-7.19’da verilmiştir.

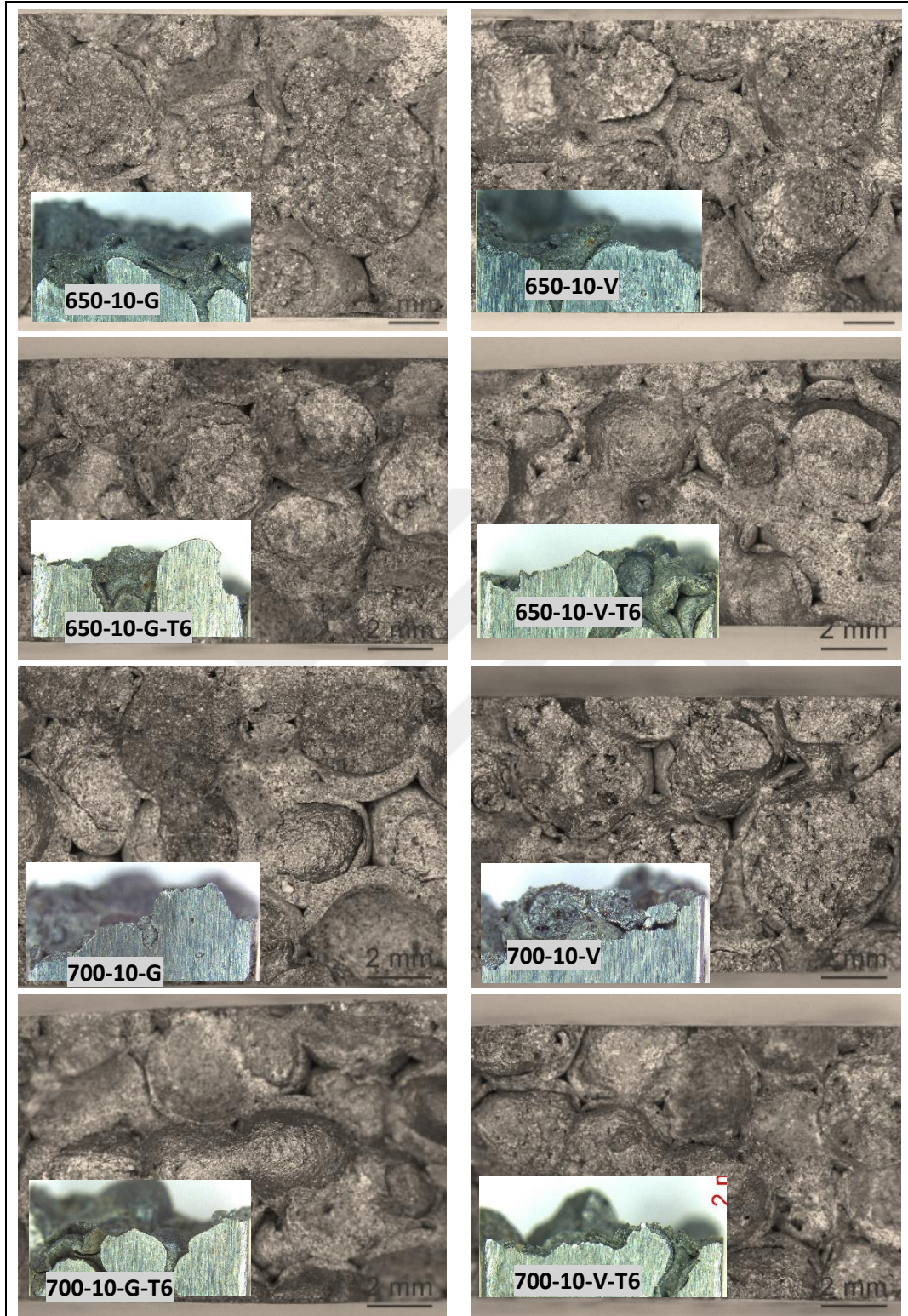
Resim 7.17’de 650 ve 700 C’de geleneksel ve vakum ile dökülen al malzemelerine ait hem döküm hem de ısıtılma işlem sonrasında ait kırılma görüntüleri verilmiştir. Numune görüntülerinin görüntülerdeki alt kısımları basma ve üst kısımları çekme gerilmesi etkisinde kalan kısımlardır. Üst kısımda kalan bölgelerde numune ortasına kadar kırılma ve çatlak izleri belirgin, alt kısımlarda basma/sıkışma etkisiyle daha düz yüzeylerin olduğu görülmüştür. Görüntüler incelendiğinde; geleneksel yerçekimi ile döküm durumunda çok daha düz yüzeyli ve gevrek kırılma yüzeyleri meydana gelirken, vakum ile dökümde kırılma yüzeylerinin girintili-çukurlu ve sünek kırılma gösterdikleri görülmektedir.



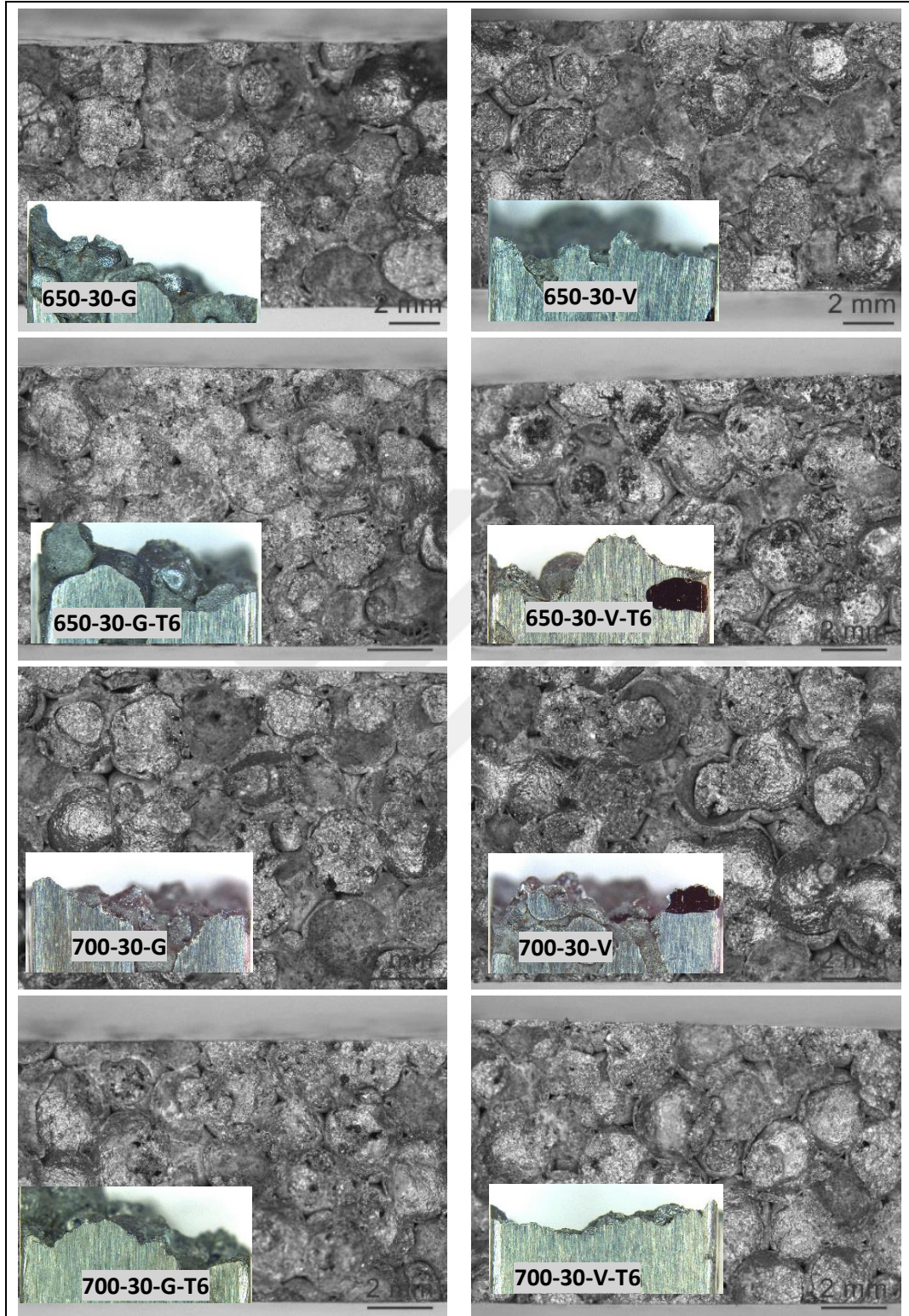
Resim 7.17. Al malzemelerde döküm durumu ve yaşlanmış numuneler ait üç nokta eğme testi kırılma yüzeyleri

Vakum etkisiyle malzeme yoğunluğu ve dayanımının artmasından dolayı deformasyon kabiliyeti iyileşirken kırılma sırasında sünek davranış meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak kırılma yüzeyinde çukur ve yükseltiler oluşmaktadır. Diğer yandan döküm sıcaklığının tane boyutu ve deformasyon kabiliyetine etkisi bilinmektedir [61]. Döküm sıcaklığı 700 °C'ye artırıldığında yoğunluk azalmakta ve tane boyutu büyümektedir. Bu durum ise malzemelerde deformasyon oranının azalmasına ve gevrek kırılmanın meydana gelmesine yol açmaktadır. Artan döküm sıcaklığı gevrek kırılmaya neden olmaktadır.

FDM numunelere ait kırılma yüzey görüntüleri takviye gözenek oranına göre 10 ppi için Resim 7.18'de, 30 ppi gözenek oranlı dökümlere ait görüntüler ise Resim 7.19'da verilmiştir. 10 ppi gözenek yoğunluğuna sahip takviye elemanı kullanıldığında gözenek boyutu artarken, aynı zamanda gözenek duvar kalınlığı da artmaktadır. 30 ppi gözenek yoğunluğunda ise; gözenek sayısı artarken, boyutu ise azalmaktadır. Gözenek sayısının artması gözenek duvar kalınlığında azalmaya neden olmaktadır. Takviyenin gözenek yoğunluğunun artması, bu gözeneklere dolan metal matris bölgelerinin sıklaşması demektir. Yani, takviye bileşeninin, matris içerisindeki gözenek morfolojisinin dairesel olarak, daha küçük aralıklarla ve daha sık bir şekilde dizilmektedir. Bu durum, döküm alaşımlarına uygulanan tane inceltme ile gerçekleştirilen dayanım artışı ile benzerdir. Daha sıkı partikül dokusu içeren kompozit malzemelerde çatlak oluşumu ve ilerlemesi nispeten daha zordur [2]. Isıl işlem uygulaması sonrasında da benzer durum söz konusu olmasına rağmen, yaşlandırma nedeniyle oluşan çökelti fazların etkisiyle eğme dayanımı döküm durumuna göre daha yüksek olmuştur.



Resim 7.18. 10 ppi gözenek yoğunluklu takviye bulunan FDM numunelerde döküm durumu ve yaşlanmış numunelere ait üç nokta eğme testi kırılma yüzeyleri



Resim 7.19. 30 ppi gözenek yoğunluklu takviye bulunan FDM numunelerde döküm durumu ve yaşlanmış numunelere ait üç nokta eğme testi kırılma yüzeyleri

Kompozitlerde ara yüzey bağı kuvvetli ise kırılma matris ve takviye bileşenleri üzerinden gerçekleşir. Ara yüzey bağı kuvveti azaldıkça ara yüzeyden kırılma oranı artar. FDM’lerde genel olarak ara yüzey bağı düşük olmakla birlikte numunelerin kırılma davranışları

dayanımı doğrudan etkilemiştir. 30 ppi takviyeli FDM’lerde ara yüzey bağının nispeten yüksek olduğu söylenebilir.

Diğer yandan; döküm sıcaklığı arttıkça genel olarak eğme dayanımı takviyesiz numunelerde olduğu gibi, kompozit numunelerde de azalma göstermiştir. Bazı numunelerde farklı sonuçlar elde edilmiş olsa da genel eğilim benzerlik arz etmektedir. Sıcaklığın malzeme yapısı üzerindeki etkisi kompozit malzemede de benzer şekilde yapısal kabalaşma, yoğunlukta azalma, yavaş soğuma gibi etkilerle matris malzemesi dayanım özelliklerine olumsuz yönde etki etmektedir. Bunun sonucunda ise dayanım kısmen azalmaktadır. Buradan döküm sıcaklığının olabildiğince azaltılması gerektiği tespit edilmiştir.

7.5. Basma Testi Sonuçları

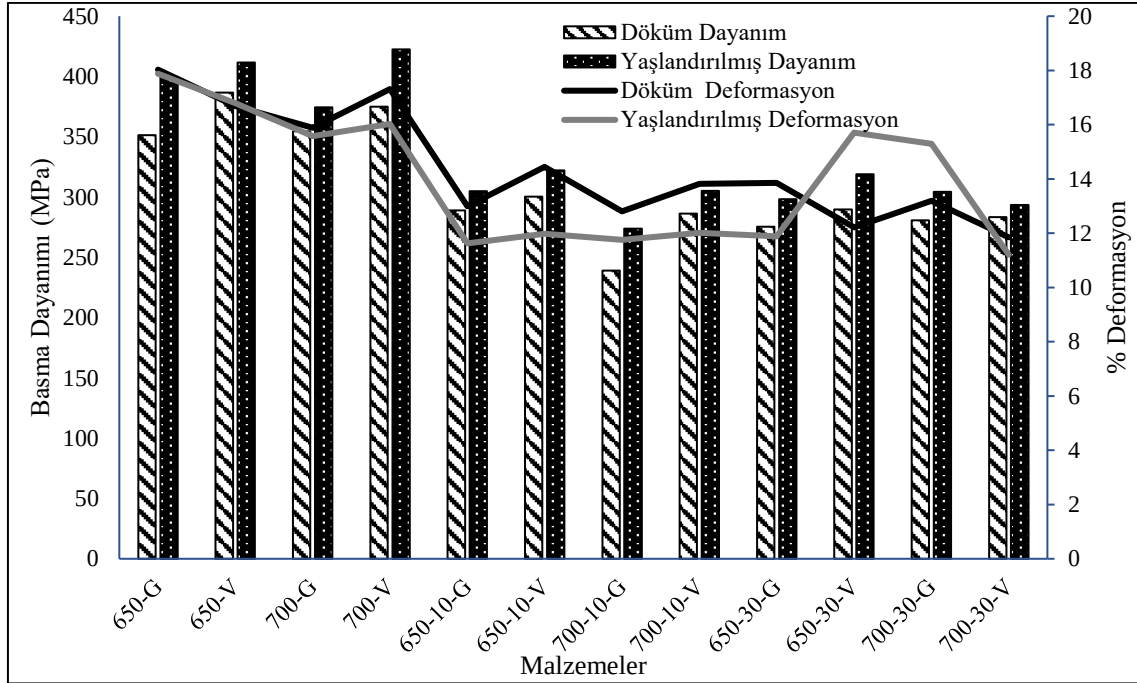
Döküm ve ısıtıl işlem uygulanan alüminyum ve FDM’lerin basma dayanımları Çizelge 7.3, Şekil 7.9-7.15’te verilmiştir. Alüminyum döküm ve yaşlandırılmış numunelerin basma dayanımları FDM’lerden yüksektir. Ancak takviyesiz alüminyum numuneler ve FDM’ler arasında basma dayanımlarının oransal farkı eğme dayanımlarından düşüktür. Çünkü test sırasında basma kuvveti kompozit ve alüminyum bölgeye uygulandığı için alüminyumun eğme dayanımındaki yüksek olan farkı azalmıştır. Hatta basma dayanımlarına standart sapma oranlandığında, eğme dayanımlarına standart sapmaların oranına kıyasla düşüktür.

Çizelge 7.3. Alüminyum ve FDM’lerin basma dayanımları ile boyutsal kısalma miktarları

MALZEME	DAYANIM		% KISALMA	
	İŞLEMSİZ	YAŞLANMIŞ	İŞLEMSİZ	YAŞLANMIŞ
650-G	351,38±10	399,73 ± 14	18,03	17,88
650-V	386,75±17	411,59 ± 9	16,69	16,79
700-G	354,47±12	374,47 ± 14	15,88	15,58
700-V	374,92 ± 16	422,58 ± 4	17,31	16,03
650-10-G	288,91±13	304,78±6	12,99	11,63
650-10-V	300,21±9	322,17±14	14,45	11,98
700-10-G	238,89±5	273,68±6	12,80	11,75
700-10-V	286,20±4	305,07±26	13,82	12,01
650-30-G	275,26±8	298,16±19	13,86	11,88
650-30-V	289,71±9	318,89 ± 7	12,21	15,71
700-30-G	280,80±13	304,44±7	13,20	15,30
700-30-V	283,43 ± 10	293,41±21	11,85	11,21
*** 10 ppi 6,82, ve 30 ppi ise 2.97 MPa ‘dir.				

Çizelge 7.3'te genel olarak takviyesiz alüminyumların döküm ve yaşlandırılmış deformasyon oranları da nispeten yüksektir. Verilen deformasyon oranları test başlangıcından basma dayanımının da hesaplandığı ilk kırılma noktasına kadar olan deformasyon oranıdır. Isıl işlem ile malzemelerin basma dayanımında genel olarak artış görülürken, deformasyon oranları ise azalmıştır. Yaşlandırılmış malzemeler yüksek dayanımlarına rağmen nispeten daha az deformasyon (şekil değişimi düşük) sonucunda kırılmışlardır. Bu durum malzemelerdeki gevrekleşmeyi göstermektedir. Yaşlandırma işlemi Al esaslı malzemelerde dayanım değerlerini artırırken, sünekliği ise bir miktar azaltmaktadır. Buna bağlı olarak yaşlandırılmış malzemeler daha yüksek basma direncine sahip olurken deformasyon oranları (boyut kısılması) ise azalmaktadır. Bir çalışmada [64]; AA6013 ve AA6082 alaşımlarına uygulanan T6 yaşlandırma ısıl işleminin sertlik, akma ve kopma mukavemetlerini artırdığı fakat % uzama oranlarını ise azalttığı tespit edilmiştir.

Şekil 7.9'da verilen sonuçlara toplu olarak bakıldığında yaşlandırma işleminin basma dayanımını artırdığı, deformasyon oranını ise azalttığı görülmektedir. Deformasyon malzemelerin çeşitli yükler (çekme, eğme, basma, burulma vb) karşısında şekil değiştirme kabiliyetlerinin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Buradan hareketle, yaşlandırma işlemi sonrasında malzemelerin dayanımları ve özellikle sertlikleri artmaktadır (%25-30 oranında). Sertlikteki bu artış malzemelerin etkiyen kuvvetler karşısındaki deformasyon davranışını etkiler. Malzemenin kuvvetlere karşı direnci attığında, şekil değiştirme kabiliyeti azalma gösterir. Bu nedenle deformasyon oranı (miktarı) azalır. Bu çalışmada da; uygulanan ısıl işlem malzemelerin dayanım ve sertlik gibi özelliklerini artırırken, deformasyon oranını azaltmıştır.



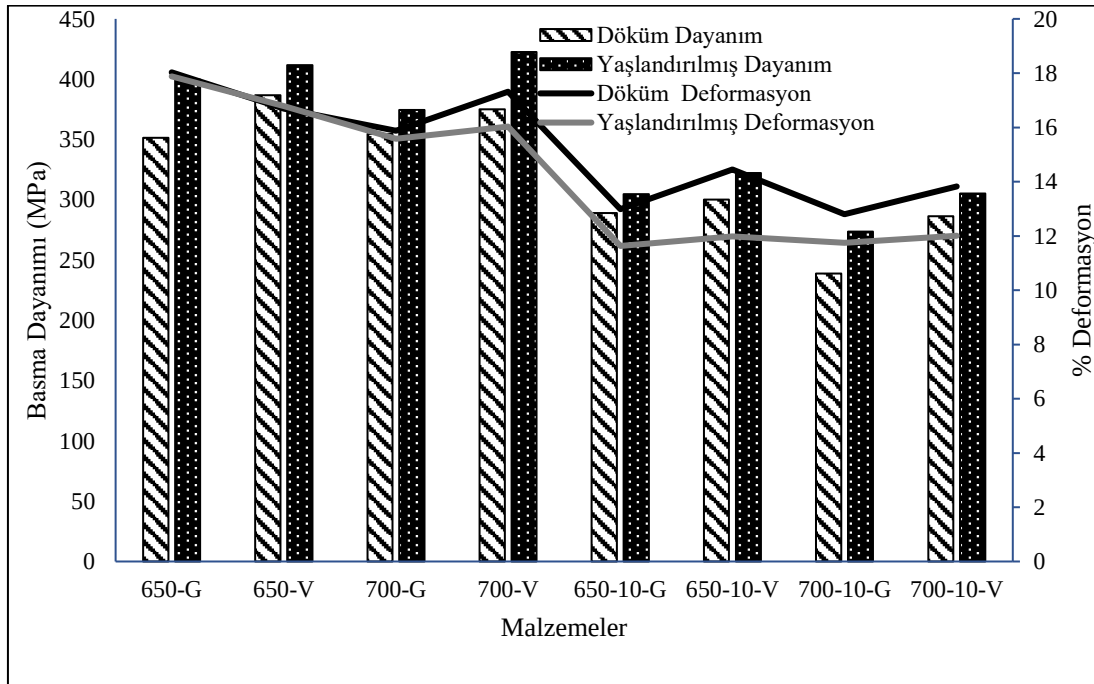
Şekil 7.9. Takviyesiz alüminyum ve FDM'lerin basma dayanımları ve boyutsal kısıalma miktarları

Çizelge 7.3'te takviyesiz malzemelerde aynı döküm sıcaklığında vakum desteği dayanımı artırırken, döküm sıcaklığının artması basma dayanımı değerlerini azaltmaktadır. Döküm sıcaklığı yapısal kabalaşma ve yoğunlukta bir miktar azalmaya neden olduğundan deformasyon kabiliyeti ve basma dayanımını azaltıcı bir etki yapmaktadır.

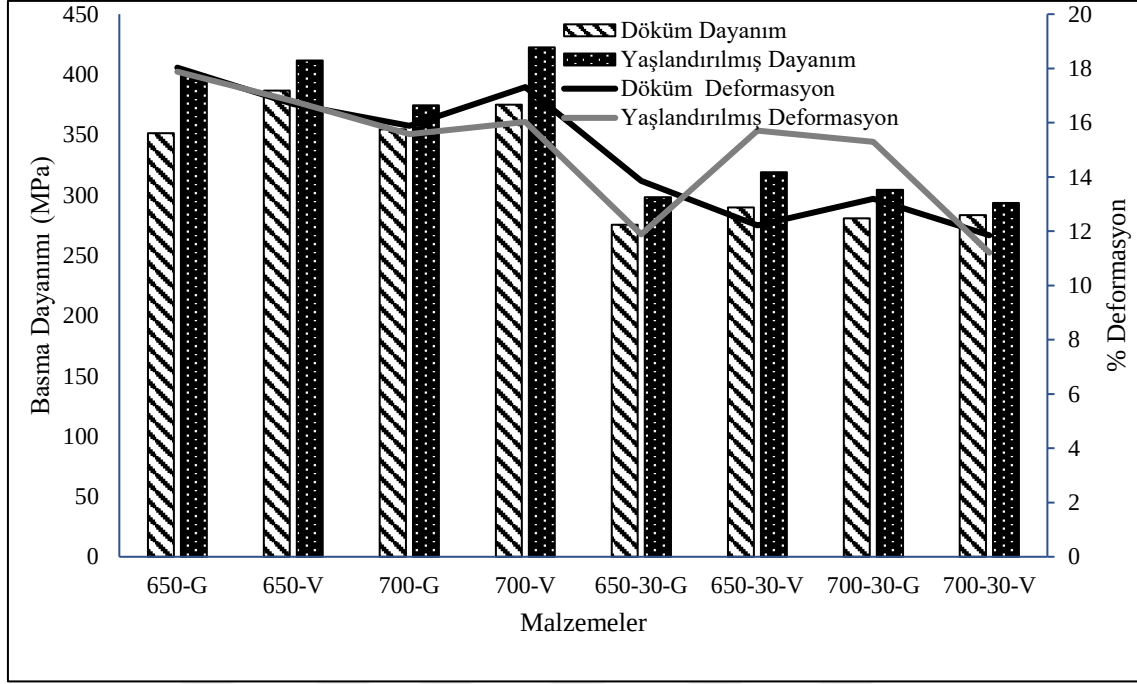
Takviye elemanı bulunan numunelerde ise; takviyesiz numunelere göre genel olarak daha düşük basma dayanımı elde edilmiştir. Her iki malzemenin basma dayanımı değerleri farklıdır. Kullanılan takviye elemanı yapısı ve bileşenleri nedeniyle 10 ppi 6.82 ve 30 ppi 2.97 MPa gibi düşük dayanım değerlerine sahiptir. Al malzemelerin dayanım değerleri ise; sıcaklık ve vakum uygulamasına bağlı olarak, döküm durumunda 351-386 MPa ve ısıtıl işlem durumunda 374-422 MPa arasında değişmektedir. Matris ve takviye elemanlarının kendilerine has basma dayanımı değerleri de kompozitin basma dayanımını belirleyen unsurlar olduğundan kompozitlerde özellikler düşük olmaktadır.

Takviye elemanı gözenek yoğunluğuna göre değerlendirme yapıldığında; eğme dayanımının tersine düşük gözenek boyutlu numunelere (30 ppi) göre, takviye gözenek boyutu fazla olan numunelerde (10 ppi) basma dayanımı genel olarak daha yüksektir (Şekil 7.10-7.11). Basma dayanımı hem matris hem de takviye elemanının birlikte davranışını göstermiştir. Eğme testi

sırasında çekme/sıyırma/ayırma şeklinde kuvvetler etki ederken, basma testi sırasında ezme/sıkıştırma/sürtünme gibi kuvvetler etkin olmaktadır. Bu durumda takviye elemanında bulunan boşluklar, takviye kalınlığı gibi kusurlar olumsuz bir etkiye yol açmamaktadır. Çünkü basma kuvvetleri malzemede ezme etkisi yaparak; önce takviye elemanı deforme olarak takviye elemanında yoğunluğun artmasına yol açmaktadır. Matrise göre çok daha sert olan takviye elemanı basma yüklerine daha fazla direnç göstermektedir. 10 ppi takviyeli numunelerde takviye elemanı birim kalınlığı daha fazla olduğundan, yük/alan nedeniyle basma yüküne karşı direnç de yüksek olmaktadır. Bir çalışmada [63]; 30, 45 ve 60 ppi gözenek yoğunluklu poliüretan köpüklerle üretilen Al_2O_3 seramik takviye edilerek $AlSi12CuMgNi$ alaşım matrisli kompozit basınç-vakum infiltrasyon ve gaz basınçlı infiltrasyon yöntemleriyle üretilmiştir. Basınç-vakum infiltrasyon $720^\circ C$ 'de 15 MPa basınçta ve 15 dakikada yapılırken gaz basınçlı infiltrasyon ise $700^\circ C$ 'de 4 MPa basınçta ve 5 dakikada yapılmıştır. Takviye gözenek yoğunluğu arttıkça her iki infiltrasyon yönteminde de basma dayanımı artmıştır. Bu çalışmada aksi yönde sonuç elde edilmesinde matris alaşımı, takviye bileşeni, üretim yöntemleri ve yapılan çalışmada [63] sadece kompozit numuneye basma kuvveti uygulanırken bu çalışmada sadece kompozit bölgeye basma kuvveti uygulanmaması etkili olmuş olabilir.

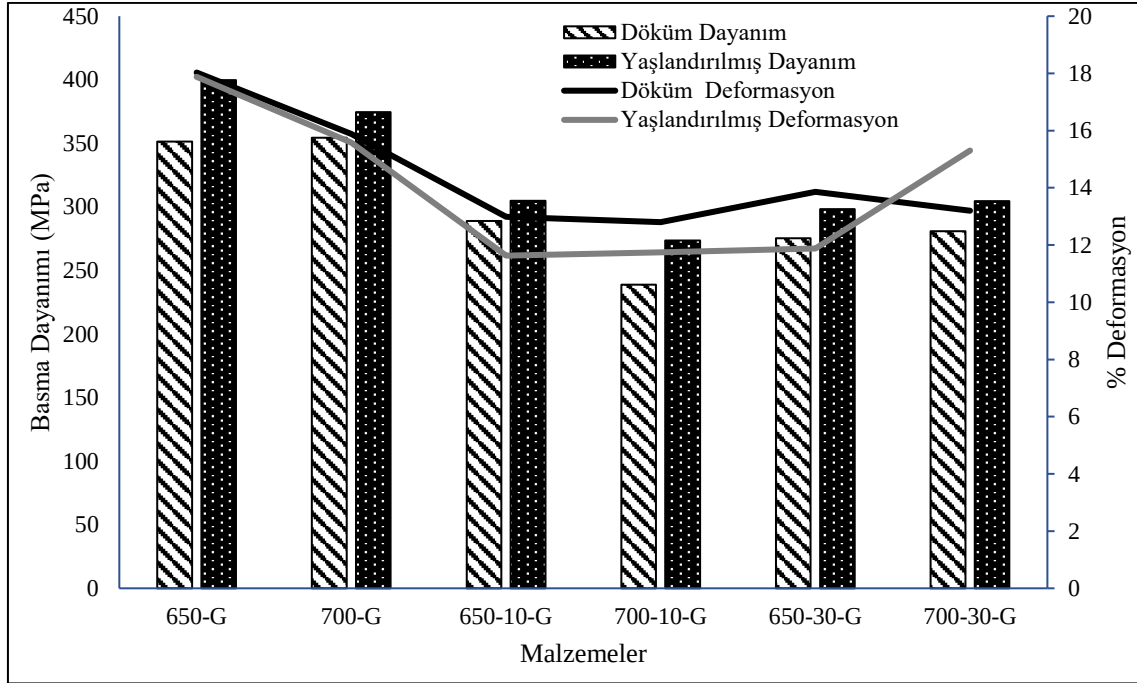


Şekil 7.10. 10 ppi takviye gözenek yoğunluğuna göre basma dayanımları ve % deformasyon oranları

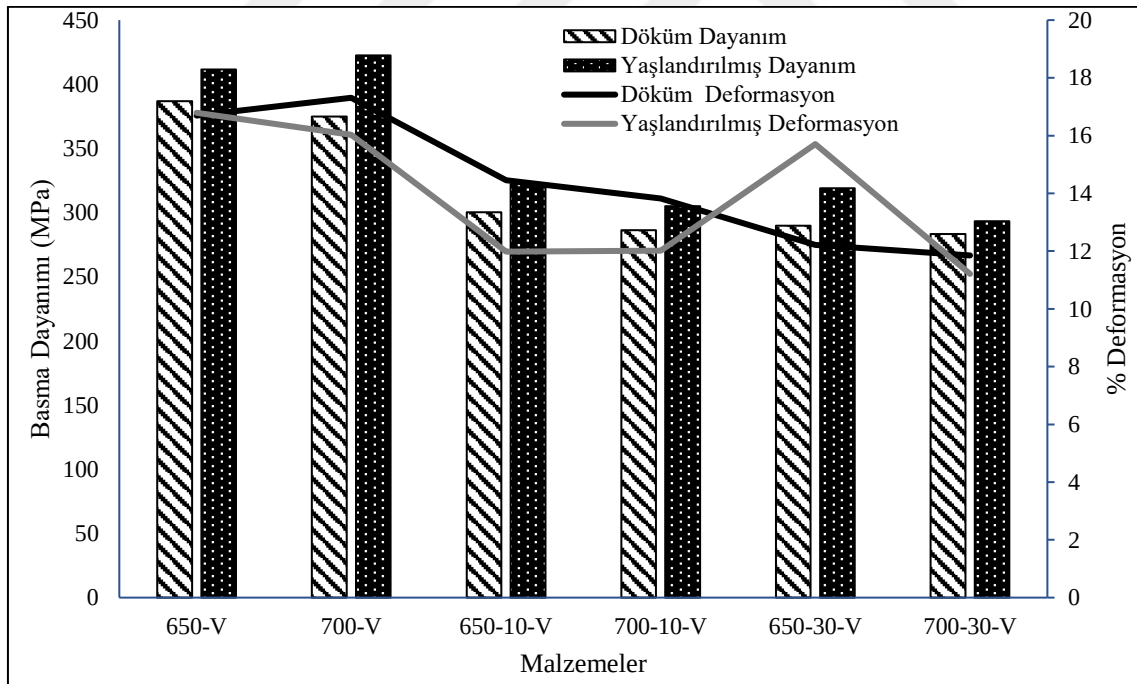


Şekil 7.11. 30 ppi takviye gözenek yoğunluğuna göre basma dayanımları ve % deformasyon oranları

Döküm sıcaklığına bağlı olarak döküm yöntemi değiştirildiğinde üretilen numunelerdeki basma dayanımları incelendiğinde (Şekil 7.12-7.13); döküm sıcaklığı arttıkça basma dayanımı genel olarak azalırken, vakum uygulamasına bağlı olarak dayanım arttığı görülmektedir. Yaşlandırma işlemi sonuçlara bakıldığında da benzer eğilimin olduğu, ancak döküme göre yapısal değişimler nedeniyle daha yüksek basma dayanımının elde edilebildiği tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığı malzemelerde yavaş soğuma, tane irileşmesi, gaz oluşumu gibi bazı problemlere neden oluşturmaktadır. Bu olumsuzluklar da dayanımı azaltıcı yönde etki etmektedir.



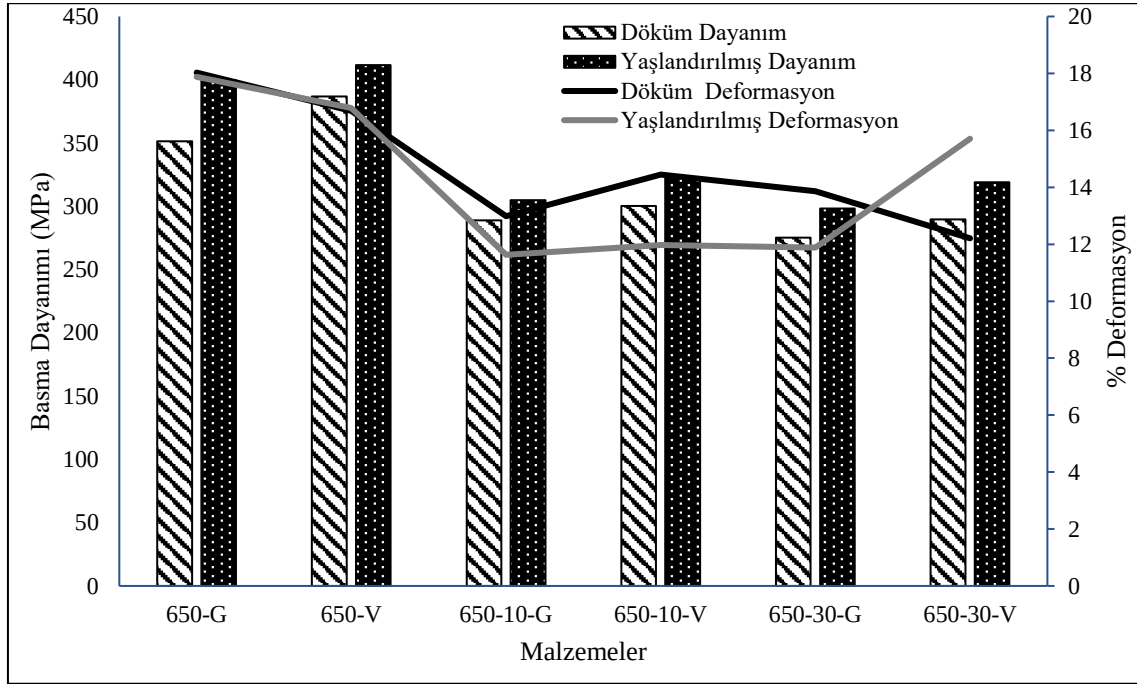
Şekil 7.12. Döküm sıcaklığına bağlı olarak geleneksel yöntemle üretilen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları



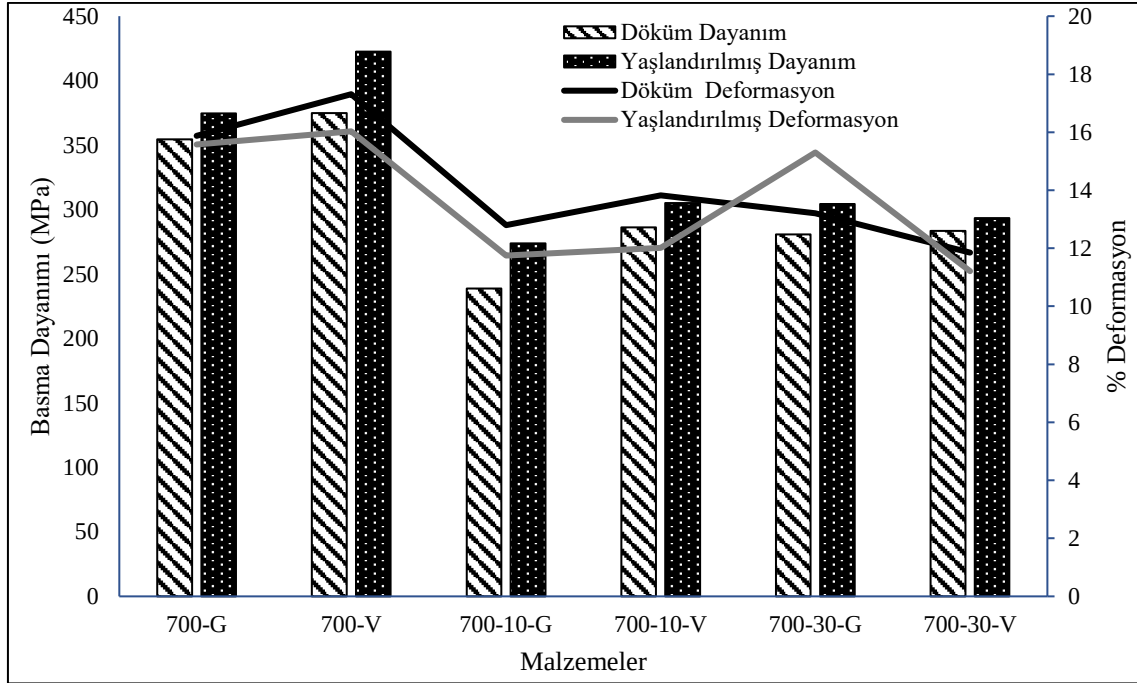
Şekil 7.13. Döküm sıcaklığına bağlı olarak vakum uygulaması dökülen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları

Aynı döküm sıcaklığında döküm yöntemlerinin değişimi esas alınarak değerlendirme yapıldığında (Şekil 7.14-7.15) ise; vakum uygulamasının etkisi açıkça görülmektedir. Aynı sıcaklıkta fakat vakum uygulanan ve uygulanmayan numunelerin basma dayanımları

arasında % 5-15 oranında fark meydana gelmektedir. Bu çalışmada vakum uygulaması sadece kompozit bölgeye yapılmamasına rağmen bu farklar elde edilmiştir. Vakum veya basınç uygulaması literatürdeki çalışmalar gibi [2, 58, 59, 60, 63] sadece kompozit alana uygulama yapılmış olsa çok daha yüksek sonuçların elde edilmesi mümkün olacaktır. Ancak bu çalışma FDM olarak planlandığından dolayı bu şekilde üretimler yapılmış ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.



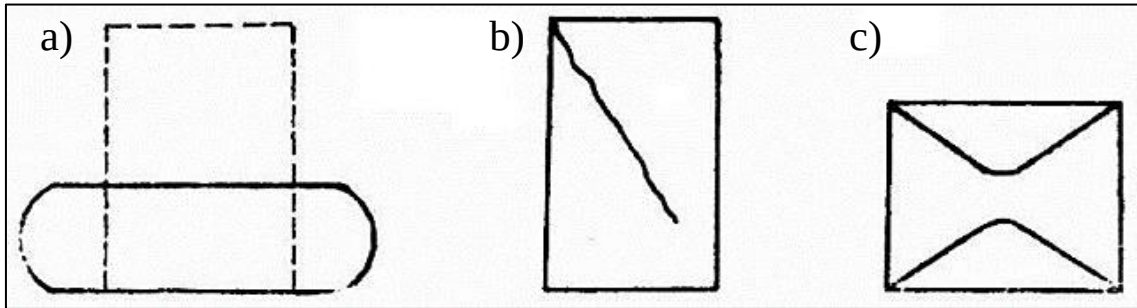
Şekil 7.14. Döküm yöntemine bağlı olarak 650 °C'de üretilen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları



Şekil 7.15. Döküm yöntemine bağlı olarak 700 °C'de üretilen numunelerin basma dayanımları ve % deformasyon oranları

7.5.1. Test sonrası basma numunelerinin incelenmesi

Basma testlerinde numunelerin deformasyonu ve kırılma şekilleri Şekil 7.16'daki gibidir. Test sırasında sünek malzemeler genellikle kırılmaz ve şişerek yığılma şeklinde deforme olurlar (Şekil 7.16.a). Gevrek malzemeler, genellikle kayma ile malzemenin iki parçaya ayrılmasıyla kırılır (Şekil 7.16.b). Yarı gevrek malzemeler ise koni şeklinde kırılır (Şekil 7.16.c) [65].

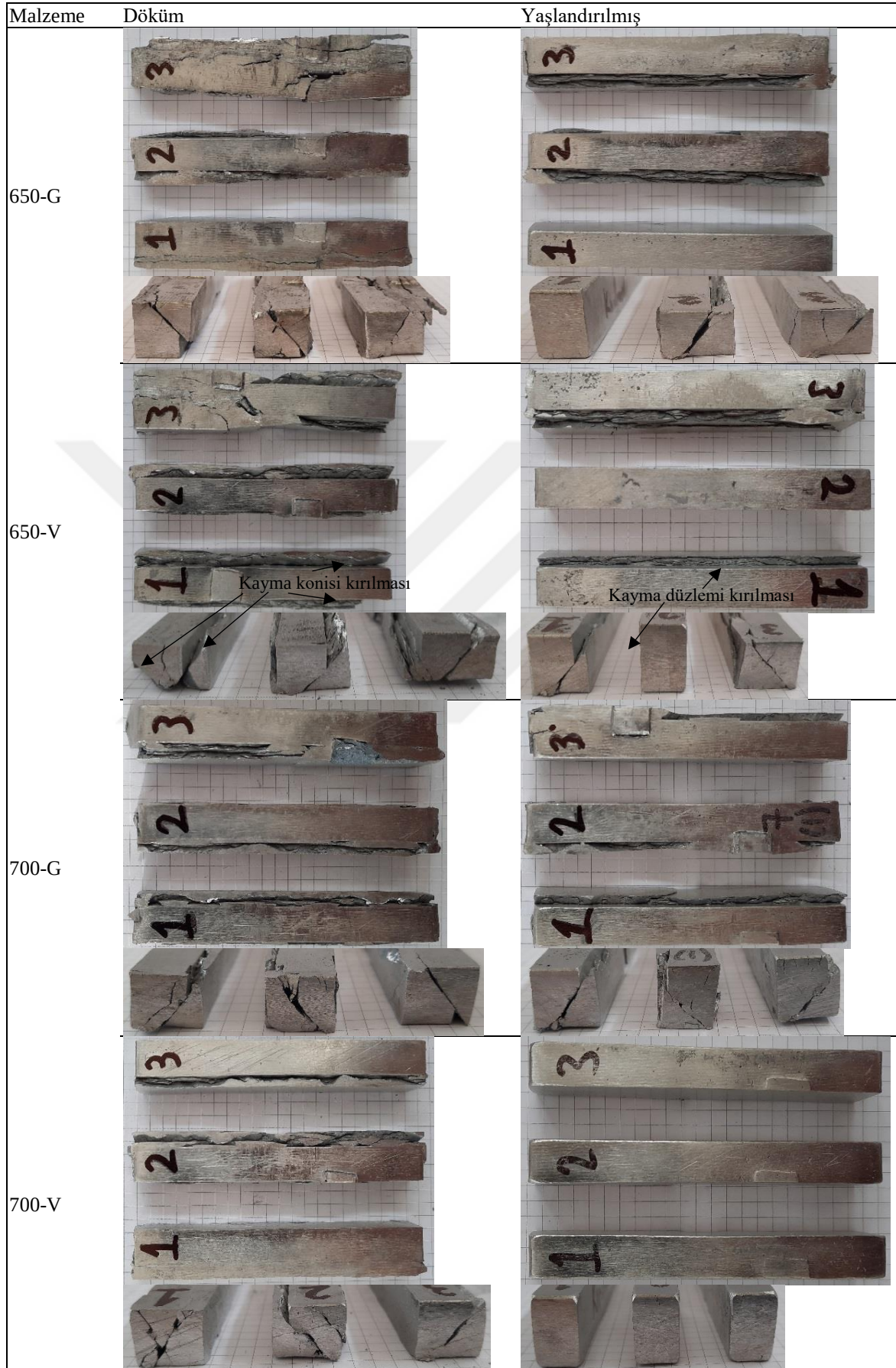


Şekil 7.16. Basma testinde a)sünek, b)gevrek ve c)yarı gevrek malzemelerin deformasyon ve kırılma şekilleri [65]

Basma dayanımı sonuçlarının daha detaylı değerlendirilebilmesi açısından deforme olan numunelere ait görüntüler Resim 7.20-7.22'de verilmiştir. Görüntüler üst (basma yönüne

dik) ve yan (basma yönüne paralel) şekilde verilmiştir. Numunelerin genelinin kırılma düzlemleri ve yönleri incelendiğinde; numune tabanı ile yaklaşık 45° açı yapacak şekilde deformasyon ve kırılmanın olduğu görülmektedir. Kırılmalar kayma düzlemi boyunca veya koni şeklinde oluşmuştur. Al malzemeler incelendiğinde (Resim 7.20) tam olarak belirtilen şekilde numuneler deforme olmuş ve kırılmıştır. Döküm sıcaklığının artması tane kabalaşması ve yoğunlukta azalmaya neden olduğundan dolayı deformasyon oluşumu ve ilerlemesi farklılaşarak koni biçimli kırılmanın olduğu görülmektedir. Bu malzemelere ısı işlem uygulandığında dayanımın artmasına bağlı olarak numunelerde oluşan çökelti faz ve intermetalikler nedeniyle gevrekleşme meydana geldiği ve böylece deformasyon oranının (şekil değişim oranı veya boyutsal kısalma miktarı) azaldığı görülmektedir. Bazı numunelerde kırılma olmamasının nedeni, test sırasında bu numunelere uygulanan yükün cihazın yük kapasitene ulaşmasından dolayı cihazın testi otomatik olarak sonlandırmasıdır.

FDM numuneler incelendiğinde (Resim 7.21 ve 7.22); Al kısımların benzer şekilde deformasyon ve kırılma davranışı açıkça görülürken, kompozit olan kısımların ezilerek, kenarlara doğru şişerek parçalanıp dağıldıkları görülmektedir. Kompozit malzemelerde deformasyon takviye elemanı türü, boyutu, dağılımı, şekli, mekanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan takviye elemanı sürekli ağlar şeklindedir. FDM numuneler üzerine yük uygulandığında malzeme üzerinde akma gerilmesi değeri aşıldığında deformasyon başlamaktadır. Ancak bu deformasyon matris ve takviye üzerinde farklı etki oluşturmaktadır. Matris kısmında yukarıda da belirtildiği şekilde basma yükü nedeniyle deformasyon oluşurken, takviye elemanının seramik olması nedeniyle farklı durum oluşmaktadır. Seramik malzemeler kısa dizilime sahip, sert ve kırılmandır. Bu nedenle genellikle deformasyon kabiliyetleri düşüktür. Kullanılan takviye elemanı seramik olduğundan çok az deformasyona ve toplam olarak şekil değişimine uğratılabilmektedir. Basma testi sırasında uygulanan yük seramik malzemede akma direncini aştığında doğrudan takviye elemanında kırılma meydana gelmektedir. Bu nedenle FDM numunelerinin tamamında deformasyon miktarları da düşük olmaktadır. Burada kullanılan takviye elemanı gözenekli ve sürekli ağlar şeklinde bir yapıya sahiptir. Basma yükü uygulandığında takviye elemanı neredeyse deformasyona uğramadan kırılmaktadır. Bu durum deformasyon miktarlarından da açıkça görülmektedir. Al malzemeye göre FDM'in deformasyon miktarı % 30-35 oranında azalmıştır. Kırılan takviye elemanlarının matris ile bağlanması arttıkça bu deformasyon miktarı da yükselmektedir. Bu durum vakum uygulanan numunelerde artış olarak gözükmektedir.



Resim 7.20. Takviyesiz alüminyum numunelerin basma testi sonrası görüntüleri

Malzeme	Döküm	Yaşlandırılmış
650-10-G		
650-10-V		
700-10-G		
700-10-V		

Resim 7.21. 10 ppi takviyeli FDM numunelerin basma testi sonrası görüntüleri



Resim 7.22. 30 ppi takviyeli FDM numunelerin basma testi sonrası görüntüleri

Normalde sıcaklık artışı bu bağlanmayı olumlu yönde etkilemesi gerekmektedir. Ancak burada hem matristeki yapısal kabalaşma ve yoğunluktaki azalma hem de kısa süredeki katılaşmanın etkisiyle yeterli takviye/sıvı metal etkileşmesi sağlanamadığından dolayı döküm sıcaklığının artması olumsuz etki oluşturmuştur.

Diğer taraftan takviye elemanının gözenek yoğunluğunun azalması daha olumlu etki yapmıştır. Takviye elemanı gözenek yoğunluğu azaldığında takviye kalınlığı artmaktadır. Kalın olan takviye elemanları basma yönünde uygulanan kuvvetlere karşı direncin artmasına neden olmaktadır. Seramik malzemeler yüksek basma ve akma mukavemetine sahiptir. Bu nedenle artan kalınlık etkisiyle basma sırasındaki takviye kütlesi (kalınlık) artışı direnci artırmakta ve basma dayanımını da geliştirmektedir. Ancak artan takviye elemanı kalınlığı 10 ppi takviyeli numunelerde deformasyonun etkisiyle kompozit kısımların tamamen dağılıp parçalanmasına yol açmıştır.

Isıl işlem uygulaması diğer özelliklerde olduğu gibi basma dayanımında artışa neden olurken, deformasyon kabiliyetini azaltmıştır. Isıl işlem uygulaması sonucunda hem matris yapısında sertliği ve dayanımı artıran çökelti fazların oluşması hem de takviye/matris ara yüzey bağının artması nedeniyle basma dayanımı artarken kompozit malzemenin deforme edilebilirliği azalmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yaş kum kalıba yerçekimi yönünde geleneksel döküm ve vakum destekli döküm yöntemiyle 2 farklı malzeme üretilmiş ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Metal ve kompozit malzemelerin karşılaştırılması amacıyla; bazıları sadece Al ve diğerleri ise orta kısmı SiC esaslı takviye elmanı kullanılan Al kompozit fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedan (FDM) üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir:

1. Hem yerçekimi hem de vakum uygulamasına bağlı olarak Al ve kompozit üretimi gerçekleştirilebilmiştir. Vakum uygulamasının özellikle FDM üretiminde avantaj sağladığı görülmüştür.
2. Döküm sıcaklığının artmasıyla mekanik özelliklerin genel olarak kötüleştiği tespit edilmiştir.
3. Sürekli ağlar şeklinde SiC malzemedan üretilmiş olan preformlar kullanılarak FDM kompozit malzeme üretimi yapılabilmektedir. Preform gözenek yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak özelliklerin kötüleştiği belirlenmiştir.
4. Al ve kompozit malzemelerde T6 ısıt işlem uygulamasının yapı ve özelliklere genel olarak olumlu etki yaptığı görülmüştür. Ancak ısıt işlem uygulanan malzemelerde eğme ve basma testleri sırasındaki deformasyon miktarı ise azalmıştır.
5. Döküm sıcaklığı ve döküm yöntemine bağlı olarak Al matrisin mikro yapısında değişimler söz konusudur. Döküm sıcaklığı arttıkça α -Al dentritleri ve ötektik yapı büyürken dökümde vakum desteği ile α -Al dentritleri küçülürken, Si taneleri incelmeyle birlikte Si ve ötektik Al küreleşmektedir. Vakum desteğiyle oluşan hızlı katılaşmanın oluşturduğu tanelerin ve dentrit kolları arasındaki mesafenin azalması dentrit ara yüzeyinde oluşan Si fazlarının küçülmesine neden olmuştur.
6. T6 ısıt işlemi ile birlikte mikroyapılarda ötektik yapının incelendiği, ötektik Si fazlarında bir incelme ile birlikte küreleşme oluştuğu ve yaşlandırılmış alaşımlarda bu fazların nispeten homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Döküm alaşımlarda üretim şartlarının mikro yapıya etkisi, benzer şekilde yaşlandırılmış alaşımlarda da tespit edilmiştir.
7. İşlem şartlarına bağlı olarak bir miktar değişim gösterse de; FDM kompozit matris-takviye ara yüzeyinde sıvı metalin takviye ile bağ oluşturabildiği tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığı ve döküm yönteminin etkisi görülürken, takviye gözenek boyutunun ısılatma özelliğine etkisi tam olarak belirlenememiştir. Değişen üretim şartları ve ısıt

işlemin özelliklere etkisi olmasına rağmen, matris/takviye arasında kimyasal bir etkileşim çok düşük olduğundan sonuçlara etkisi çok net olarak mikro yapı incelemelerinde tespit edilememiştir.

8. Döküm sıcaklığının artması FDM'lerin alüminyum bölgelerinde üst kısımlarda çekme çöküntülerinin oluşmasına neden olmaktadır. Vakum uygulaması sonucunda bu çekme çöküntüleri azalmıştır. Bu çekme çöküntü oluşumları sıcaklığın artmasının yanında tek meme bağlantısı yapılmasına bağlı olarak dolum süresinin uzaması ve bölgesel aşırı ısınmadan kaynaklandığı anlaşılmıştır.
9. 30 ppi takviyeli FDM'lerde eğme dayanımı daha yüksektir. Diğer yandan basma dayanımında ise takviye elemanı kalınlığı uygulanan yüke karşı direnci artırarak 10 ppi takviyeli numunelerde basma dayanımının artmasına neden olmuştur.
10. Hem 10 hem de 30 ppi takviye gözenekli FDM'lerde, özellikle vakum ile yapılan dökümlerde ve yüksek sıcaklıkta dökülen numunelerde boşluklar % 98 oranında doldurulabilmiştir. Bu bakımdan vakum destekli dökümün bu çalışmadaki kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabileceği görülmüştür.

Öneriler

1. Replikasyon yöntemiyle farklı gözenek yoğunluklu (10, 30, 40, 60 ve 80 ppi) seramik preformlar üretilip ve bunlara kaplama yapılarak kullanılması,
2. Farklı türde seramiklerden gözenekli preform üretilmesi,
3. Islatabilirliği artıran alaşım elementlerinin alüminyum alaşımlarında kullanılması ile üretim yapılması,
4. Farklı vakum miktarlarında döküm yapılarak FDM üretiminin yapılması,
5. Basınç ve/veya titreşim destekli döküm yöntemiyle FDM üretiminin yapılması,
6. Farklı geometrilerde takviyeler kullanılarak FDM üretimi yapılması,
7. Katılma çekmesini engellemek için kalıp tasarımının değiştirilmesi ile kompozit üretim çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Karakoç, H. (2017). *TM Yöntemi ile B₄C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin ve Balistik Performansının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-27.
2. Soy, U. (2009). *SiC/B₄C Takviyeli Metal Matriks Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-244.
3. Kayabaşı, İ. (2016). *Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sistemi İmalatı ve Performansının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 1-18.
4. Şenel, M. C., Gürbüz, M., ve Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), 36-47.
5. Erden, İ. O. (2005). *Alüminyum-Silisyumnitrür Kompozit Malzemenin Difüzyon Kaynağı İle Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37.
6. Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimasauskiene, R., and Pinca-Bretotean, C. (2020). A Study of Advancement in Application Opportunities of Aluminum Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 2419-2424.
7. Senthil, S., Raguraman, M., and Manalan, D. T. (2021). Manufacturing Processes & Recent Applications of Aluminium Metal Matrix Composite Materials: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 45(7), 5934-5938.
8. Sharma, D. K., Mahant, D., and Upadhyay, G. (2020). Manufacturing of Metal Matrix Composites: A State of Review. *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 506-519.
9. Giray, Ö. Ç. (2019). *Otomotiv Fren Disk Tasarımı için Isı Transfer Karakteristiği İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1.
10. Kolbasar, Z. (2020). *Fren Disklerinde Plazma Sprey Alümina Esaslı Kaplamaların Uygulanabilirliği ve Kaplamalı Disk-Balata Arası Sürtünme Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 10.
11. Toptan F., Kumdalı, F., ve Kerti, I. (2006). Al-B₄C Kompozitlerinin Fren Diski Olarak Kullanılabilirliğine Genel Bir Bakış. *Metalurji Dergisi*, 145, 11-18.
12. Karanfil, S. (2017). *Fren Disklerinin HVOF Yöntemi ile Kaplanması ve Taşıtlarda Fren Performansına Etkisinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 6.
13. Chakrapani, P., and Suryakumari, T. S. A. (2021). Mechanical Properties of Aluminium Metal Matrix Composites-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 45(7), 5960-5964.

14. Yıldız, T. (2021). *AA7XXX ve Seramik Parçacıklardan Oluşan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretimi ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, 7-10.
15. Ceyhun, N. (2019). *Hava Delikli Fren Disklerinin Termal ve Mekanik Gerilme Analizi ve Geometrik Optimizasyonunun Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan, 32.
16. Güneş, S. (2019). *Sıcak Preslenmiş Metal Matris Kompozitlerde SiC Katkısının Malzeme Özelliklerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Munzur Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli, 3-18.
17. Yastımoğlu, F., ve Özkan, A. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
18. Gültekin, D. (2007). *Metal Matrisli Kompozit Fren Diski, Balatası Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 8-22.
19. Sak, N. (2018). *Alümina Katkılı ve Nikel ile Alaşımlandırılmış Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Özelliklerin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 6-7.
20. Deniz, Ş. (2021). *Atık Pet-Cam Elyaf-Kalsit/Nişasta Kullanılarak Üretilen Kompozit Malzemenin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 18.
21. Çınar Daşkesen, R. (2021). *Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozit Malzemeden Açık Hücreli Metal Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 10.
22. Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering* (Third Edition). New York: Springer Science & Business Media, 225-301.
23. Köymen Çağar, P. (2021). Endüstriyel Ürünlerin Tasarımında Yaygın Yer Edinen Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Özellikleri. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(2), 79-88.
24. Callister, W. D., and Rethwisch, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (Eight Edition). New York: John Wiley & Sons, Inc., 437-656.
25. Kotoul, M., Pokluda, J., Sandera, P., Dlouhy, I., Chlup, Z., and Boccaccini, A. R. (2008). Toughening Effects Quantification in Glass Matrix Composite Reinforced By Alumina Platelets. *Acta Materialia*, 56(12), 2908-2918.
26. Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., and Pruncu, C. I. (2019). Recent Progress of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview of Composite Materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.

27. İşıklı, Y. (2012). *Tabakalı Kompozit Plakların Kalıp Malzemesi Olarak En Uygun Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 14-15.
28. Kalemtaş, A. (2014). Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. *Putech&Composites*, Ekim-Kasım-Aralık Sayısı, 18-30.
29. Arunachalam, R., Krishnan, P. K., and Muraliraja, R. (2019). A Review on the Production of Metal Matrix Composites Through Stir Casting-Furnace Design, Properites, Challenges, and Research Opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 213-245.
30. Kalyoncu, S. (2020). *Alüminyum Alaşımlarında Alçak Basınçlı Döküm Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 3-8.
31. Turna, A. (2019). *Döküm EN AC 43300 Alüminyum Alaşımının Kısa Ömürlü Yorulma Davranışı Modelinin İncelenmesi ve Modelin Parça Tasarımında Kullanılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-9.
32. Güneren, A. (2019). *T6 Heat Treatment Optimization of A356 Alloy*, Master Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 20.
33. Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K. K., Hussain, C. M., and Gupta, P. (2019). Advance Research Progresses in Aluminium Matrix Composites: Manufacturing & Applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(5), 4924-4939.
34. Yılmaz, E. (2019). *SiC Seramik Preform Optimizasyonu ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Alüminyum Matris Kompozit Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 12-47.
35. Ahmad, R., Ha, J-H., and Song, I-H. (2014). Processing Methods for the Preparation of Porous Ceramics. *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*, 21(5), 389-398.
36. Liu, G. (2011). *Fabrication of Porous Ceramics and Composites by a Novel Freeze Casting Process*, Phd Thesis, The University of Birmingham College of Engineering and Physical Sciences, Birmingham, 12-14.
37. Kultayeva, S., Ha, J-H., Malik, R., Kim, Y-W., and Kim, K. J. (2020). Effects of Porosity on Electrical and Thermal Conductivities of Porous SiC Ceramics. *Journal of European Ceramic Society*, 40(4), 996-1004.
38. Tekoğlu, E. (2015). *Mekanik Alaşımlama Yöntemleri ile Üretilmiş Al₁₅Si_{2,5}Cu_{0,5}Mg Matrisli ve CeO₂, Y₂O₃, La₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-19.
39. Singh, H., Brar, G. S., Kumar, H., and Aggarwal, V. (2021). A Review on Metal Matrix Composite for Automobile Applications. *Materials Today: Proceedings*, 43(1), 320-325.

40. Öztoprak, N. (2018). *Investigation of Similar and Dissimilar Friction Stir Welded Metal Matrix Composites Under Variable Loading*, Phd Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 22-29.
41. Owoputi, A. O., Inambao, F. L., and Ebhota, W. S. (2018). A Review of Functionally Graded Materials: Fabrication Processes and Applications. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(23), 16141-16151.
42. El-Galy, I. M., Saleh, B. I., and Ahmed, M. H. (2019). Functionally Graded Materials Classifications and Development Trends From Industrial Point of View. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-23.
43. Gariba, A. M. M. (2021). *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Ti-B₄C Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Korozyon Özellikleri*, Doktora Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu, 26.
44. Şahin, B. (2021). *Ni Matrisli B₄C Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 17.
45. Mostefa, A. H., Merdaci, S., and Mahmoudi, N. (2018). An Overview of Functionally Graded Materials <<FGM>>. *Proceedings of the Third International Symposium on Materials and Sustainable Development*, 267-278.
46. Nişancı, M. C. (2019). *Batarya Kalıplarında Döküm-Kalıp Isı Transfer Katsayısı Hesaplanması ve Yolluk Tasarımı ile Kalıp Isı Dağılımının Optimize Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 3-5.
47. Campbell, J. (2015). *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design* (Second Edition). Butterworth-Heinemann, 821-882.
48. Yavuz, H. (2019). *Investigation of the Cooling System Efficiency in Aluminum Low Pressure Die Casting*, M.Sc. Thesis, İzmir Katip Çelebi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 3-9.
49. Polmear, I., StJohn, D., Nie, J., and Qian M. (2017). *Light Alloys: Metallurgy, of the Light Metals* (Fifth Edition). Butterworth-Heinemann, 109-156.
50. İnternet: *Kayıp Mum Tekniği Nedir?* URL: <https://www.dokumtek.com/kayip-mum-tekniği-nedir> Son Erişim Tarihi: 19.11.2022.
51. Güler, K. A. (2012). *Hassas Dökümde Boyutsal Hassasiyete ve Yüzey Kalitesine Etki Eden Unsurlar*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8-9.
52. Yalçın, N., Kocatepe, K., and Tekeli, S. (2007). Köpük Model Döküm Yöntemindeki Teknolojik Gelişmeler. *Politeknik Dergisi*, 10(2), 179-184.
53. Hasırcı, H. (2006). *Yaş Kum Kalıplarda Yerçekimine Ters Yönde Döküm İşlemlerinin Uygulanabilirliği ve Yöntemin Yapı ve Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 75-125.

54. Gül, F. (2014). AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 30-37.
55. Kara, A. (2010). *Karşıt Ekstrüzyon İşleminin Al Esaslı Seramik Takviyeli Kompozitlerde Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 11-13.
56. Kılıçarslan, A. (2009). *Al-B₄C Kompozitlerinde Islatılabilirliği Artırmak Amacıyla B₄C Partiküllerinin Yüzey Özelliklerinin Değiştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6-13.
57. Chang, Q., Chen, L., Zhang, J., Li, Y., and Liang, X. (2019). Study on the Technology and Performance of 3D-Reticulated Porous SiC/Fe Composite Material. *Composite Interfaces*, 26(3), 247-262.
58. Demir, A., and Altınkök, N. (2004). Effect of Gas Pressure Infiltration on Microstructure and Bending Strength of Porous Al₂O₃/SiC- Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Composites Science and Technology*, 64(13-14), 2067-2074.
59. Soy, U., and Demir, A. (2020). AlSi10Mg Alloy Infiltration into Porous SiC Structures Manufactured by Sponge Replication. *Emerging Materials Research*, 9(3), 868-876.
60. Gecu, R., and Karaaslan, A. (2019). Sliding Wear of the Ti-Reinforced Al Matrix Bi-Metal Composite: A Potential Replacement to Conventional SiC-Reinforced Composites for Automotive Application. *International Journal of Metalcasting*, 13(3), 641-652
61. Hasırcı, H., ve Gül, F. (2006). Üretim Şartlarının Yerçekimine Ters Döküm Yöntemiyle Üretilen Parçaların Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 257-264.
62. Askeland, D. R., Fulay, P. P., and Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Materials* (Sixth Edition). Stamford: Cengage Learning., 574.
63. Boczkowska, A., Chabera, P., Dolata, A. J., Dyzia, M., and Ozieblo, A. (2013). Porous Ceramic-Metal Composites Obtained by Infiltration Methods. *Metalurgija*, 52(3), 345-348.
64. Akyüz, B., ve Şenaysoy, S. (2014). Alüminyum Alaşımlarında Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerindeki Etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-9.
65. İnternet: *Metalik Malzemelerin Basma Deneyi*. URL: <http://w3.bilecik.edu.tr/wp-content/uploads/sites/119/2016/12/Basma-Deneyi.pdf> Son Erişim Tarihi: 16.12.2022.





Gazili Olmak Ayrıcalıktır...