

AlMg3/SiCp KOMPOZİT MALZEMELERİNİN  
DARBE DAVRANIŞININ TAKVİYE ORANI İLE  
DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Emrah ŞAHİN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Nilhan Ürkmez TAŞKIN

Edirne, 2011

T.C.  
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AlMg<sub>3</sub>/SiCp KOMPOZİT MALZEMELERİNİN DARBE DAVRANIŞININ  
TAKVİYE ORANI İLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Makine Mühendisi Emrah ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Nilhan Ürkmez TAŞKIN

2011  
EDİRNE

T.C.  
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AlMg<sub>3</sub>/SiCp KOMPOZİTLERİNDE TAKVİYE ORANININ DARBE  
DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Emrah ŞAHİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Bu tez 01.08.2011 tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.

  
Yrd.Doç.Dr.  
Nilhan Ürkmez TAŞKIN  
(Danışman)

  
Yrd.Doç.Dr.  
Vedat TAŞKIN  
(Jüri Üyesi)

  
Yrd.Doç.Dr.  
Kenan KARAÇAVUŞ  
(Jüri Üyesi)

## ÖZET

Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler geleneksel metal üretim yöntemleriyle üretilebilen, dayanım ve fiziksel özellikleri takviye malzemesi ilave edilerek geliştirilebilen ileri malzemelerdir. Hafiflik, yüksek aşınma direnci, yüksek elastisite modülü, yorulma mukavemeti, yüksek sertlik ve düşük termal genleşme özelliklerinden dolayı özellikle uzay, savunma ve otomotiv sanayinde kullanımları artmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler darbeli çalışan makine elemanlarında kullanılmaları durumunda, takviyesiz metallere göre daha düşük darbe dayanım özellikleri gösterirler. Takviye oranı arttıkça kırılma direnci artar ve gevrek kırılma davranışı sergiler. Soğuk biçimlendirme ile dayanım artışı sağlanabilen alüminyum alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanılması ve darbeli yükler karşısında kırılma davranışının incelenmesi bu tür kompozitlerin kullanım alanlarının belirlenmesinde belirleyici olacaktır. Literatürde soğuk sertleşebilen alüminyum alaşımları ile üretilen parçacık takviyeli kompozit malzemelerin darbe davranışını inceleyen yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, farklı takviye oranlarına sahip ve farklı şekil değiştirme oranlarında haddelenmiş AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozitleri düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Kompozit malzemelerin takviye oranlarının ve şekil değiştirme derecelerinin, darbe davranışına etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AlMg alaşımı, SiC takviye, Metal Matrisli Kompozit, Darbe Enerjisi, Soğuk şekil değiştirme

## ABSTRACT

Particle-reinforced metal matrix composites are the materials being manufactured by using traditional material manufacturing methods, strength and physical properties of advanced materials that can be enhanced by the addition of reinforcement material. Due to the properties of light weight, high wear resistance, high modulus of elasticity, fatigue resistance, high hardness and low thermal expansion, especially in aerospace, defense and automotive industry is increasing their use. Particle-reinforced composites exhibit lower impact strength properties than unreinforced metals in case of used machine parts working in pulsed. The higher rate of reinforcement fragility increase and exhibit brittle fracture behavior. Increase in strength can be provided with cold forming of aluminium alloys used as matrix materials and fracture behaviour of investigation against impact loads will be decisive in determining the area of use of such composite. In the literature, cold-hardening of aluminium particle reinforced composite materials, no studies have examined the behavior of impact.

In this study, with different rates of reinforcement and different strain rates AlMg<sub>3</sub>/SiCp rolled composites subjected to low-speed impact tests. Strain rates and degrees of reinforcement of composite materials, impact behavior were examined.

**Key Words:** AlMg alloy, SiC reinforcement, Metal Matrix Composites, Impact Energy, Cold working

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli bilgi ve tecrübelerini bana aktaran ve yol gösteren değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Nilhan Ürkmez TAŞKIN'a, Yrd. Doç. Dr. Vedat TAŞKIN'a ve araştırma görevlisi arkadaşlarım Tolga AKSENCER ile Pınar A. DEMİRHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Aygün GÜNGÖR nezdinde TÜBİTAK MAM'a ve laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederim.

Çalışma süresi boyunca verdikleri destekler için EK-İŞ İNŞ. SAN. TİC. A.Ş. ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Pınar Demir ŞAHİN'e ayrıca teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	viii
SİMGE LİSTESİ .....	ix
KISALTMA LİSTESİ .....	x
1. GİRİŞ .....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER .....	3
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	3
2.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler .....	4
2.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeleri .....	6
2.4 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Takviye Elemanı Çeşitleri .....	7
2.5 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	10
2.5.1 Sıkıştırma Döküm Tekniği .....	11
3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....	13
3.1 Bazı Elementlerin Mekanik Özelliklere Etkisi .....	13
3.2 Takviye Türünün Mekanik Özelliklere Etkisi .....	15
3.3 Süneklik .....	16
3.4 Yorulma Davranışı .....	18
3.5 Parçacık Takviyeli Malzemelerin Mekanik Davranışının Hesaplanmasında Kullanılan Bazı Modeller .....	19
3.6 Plastik Deformasyon Davranışının Hesaplanması .....	20
4. Darbe Davranışı .....	22
4.1 Kırılma Mekanizmaları .....	26
4.1.1 Tane İçi Kırılma .....	26
4.1.2 Taneler Arası Kırılma .....	27
4.2 Tokluk .....	28
4.3 Kırılma Tokluğu .....	28
4.4 Kırılma Mekanizması .....	31
4.4.1 Griffith Teorisi .....	31
4.4.2 Irwin Teorisi .....	32
4.5 Kırılma Enerjisi .....	33
5. LİTERATÜR TARAMASI .....	34
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	39
6.1 AlMg <sub>3</sub> /SiCp Kompozitlerinin Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri .....	39
6.2 Çentik Darbe Deneyleri .....	42
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	46
8. SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....	53
KAYNAKLAR .....	55
ÖZGEÇMİŞ .....	58

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 4.1 Charpy ve İzod darbe deney düzenekleri.....	22
Şekil 4.2 Darbe enerjisi hesabı için gerekli boyutlar .....	24
Şekil 4.3 Tane İçi Kırılma .....	26
Şekil 4.4 Taneler Arası Kırılma .....	27
Şekil 5.1 Isıl işlem görmüş (T6) ve görmemiş (T1) haldeki Al 2124 takviyesiz alaşımı ve kompozitlerinin ısıl darbe dayanımlarının sıcaklığa bağlı değişimi.....	37
Şekil 6.1 AlMg3 %20SiCp kompozit malzemesinin SEM fotoğrafları.....	40
Şekil 6.2 Şekil değişimi uygulanmamış kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin takviye oranları ile değişimi (Ürkmez, 2004) .....	41
Şekil 6.3 Deney numunelerinin teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile gözenek oranları .....	42
Şekil 6.4 Charpy V-çentikli darbe numunesi geometrisi .....	43
Şekil 6.5 Çentik darbe numunelerinin hazırlandığı Mitsubishi RA-90 EDM tezgahı... ..	43
Şekil 6.6 Numune hazırlama. ....	44
Şekil 6.7 Zwick çentik darbe cihazı, Charpy deneyinde numune ve çekiç şeması.....	44
Şekil 7.1 AlMg3 Takviyesiz alaşımı ve kompozitlerin, şekil değiştirme ve takviye oranına göre ortalama darbe enerjileri .....	47
Şekil 7.2 AlMg alaşımlarının SiC takviye oranlarına bağlı olarak darbe enerjilerinin değişimi .....	48
Şekil 7.3 Farklı takviye oranlarındaki kompozit numunelerin darbe sonrasındaki kırılma yüzeylerinin görünümü.....	52



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Alüminyum Matrisli Kompozitlerin potansiyel ve mevcut uygulamaları.....	2
Çizelge 2.1 Al esaslı bazı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri .....	7
Çizelge 3.1 Biçimlenebilir ve dökme alüminyum alaşımları.....	14
Çizelge 3.2 Takviye tipinin etkisi .....	16
Çizelge 4.1 $K_{teorik}$ ve deneysel $K_{deneysel}$ kırılma tokluğu değerlerinin yaşlandırma süresine bağlı olarak karşılaştırılması .....	30
Çizelge 6.1 AlMg3 alaşımının fiziksel özellikleri .....	39
Çizelge 6.2 AlMg3 alaşımının kimyasal bileşimi .....	39
Çizelge 6.3 Deney numunelerinin teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile gözenek oranları .....	40
Çizelge 6.4 %20 şekil değiştirme uygulanmış AlMg3 alaşımının, takviye oranlarına bağlı olarak yüzey sertliklerinin değişimi .....	41
Çizelge 6.5 Numunelerin kodlanması .....	45
Çizelge 7.1 Farklı takviye oranlarındaki kompozit malzemelerde akma dayanımı değerlerinin şekil değişimine bağlı olarak değişmesi .....	46

## SİMGE LİSTESİ

$K$	Gerilme şiddet faktörü
$K_c$	Kritik gerilme şiddet faktörü
$K_{IC}$	Kırılma tokluğu
$\sigma_y$	Akma gerilmesi
$f_p$	Takviye Partikül Hacim Oranı
$d_p$	Partikül çapı
$m$	Deformasyon sertleşmesi katsayısı
$\rho$	Çatlak ucu radyüsü
$M$	Sarkaç ağırlığı
$L$	Sarkaç ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı
$h$	Sarkaç ağırlık merkezinin düşme yüksekliği
$h_1$	Sarkaç ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği
$\alpha$	Düşme açısı
$\beta$	Yükseliş açısı
$W$	Ağırlık
$a$	Çatlak boyunun yarısı
$G$	Kırılma enerjisi
$E_{dö}$	Darbe öncesi enerji
$E_{ds}$	Darbe sonrası enerji
$E_{numune}$	Numune tarafından soğurulan enerji (Darbe enerjisi)
$T_1$	Sıcak ekstrüze edilmiş ve oda sıcaklığında soğutulmuş
$T_6$	Çökeltme uygulanmış ve yapay olarak yaşlandırılmış
$SiCp$	Silisyum karbür (parçacık )
$Al$	Alüminyum
$Ti$	Titanyum
$Al_2O_3$	Alüminyum oksit

**KISALTMA LİSTESİ**

MMK	Metal Matrisli Kompozitler
Al-MMK	Alüminyum Matrisli Kompozitler
EDM	Tel Erozyon İşleme (Electrical Discharge Machining)
AA	Amerikan Alüminyum Birliği
ASTM	Amerikan Malzeme Muayenesi ve Malzeme Kurumu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	Toz metalurjisi
CVD	Kimyasal buhar kaplama
PVD	Plazma ile buhar kaplama

## 1.GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler doğrultusunda üstün özelliklere sahip yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı malzemelerin istenen özelliklerini tek bir malzemede birleştirmeyi başaran insanoğlu, bu malzemeleri kendi hayatını kolaylaştırmak, çeşitli alanlarda üstünlük sağlamak ve fiziki engelleri aşabilmek amacıyla kullanmaya ve geliştirmeye başlamıştır.

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine bağlı olarak; polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler (MMK) olarak sınıflandırılabilirler. Polimer matrisli kompozitlerin ancak düşük sıcaklıkta kullanılabilmesi, seramik matrisli kompozitlerin ise gevrek ve üretim sıcaklığının yüksek olması nedeniyle MMK malzemeler, kompozitler içerisinde ayrı bir yere sahiptir.

Tek bileşenli malzemelerde başarısız olan gerekli ve istenen özellikleri sağlamak üzere en az biri metal, diğeri takviye malzemesi olan iki veya daha fazla farklı malzemenin birleşimi ile elde edilen Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler, mühendislik malzemelerinin gelişim süreci içerisinde yer alan en önemli buluşlardan birisidir.

Alüminyum matrisli kompozitler (Al-MMK) ağırlıkça hafif, yüksek performansa sahip malzemelerdir. Al-MMK'ların mekanik özelliklerini artırmak amacıyla ana yapı içerisine sürekli veya süreksiz yapıda fiberler veya parçacık takviyesi yapılabilir. Takviye miktarı hacimsel olarak en küçük miktarlardan %70 oranlara kadar çıkabilir. Al-MMK'ların özellikleri ana yapının uygun kombinasyonuna, takviyeye ve farklı üretim yöntemlerine göre çeşitli endüstriyel talepleri karşılayabilir. Günümüzde farklı yöntemler kullanılarak birkaç çeşit Al-MMK'lar üretilmektedir. Son otuz yıldan bu yana, Al-MMK'ların fiziksel, termo-mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine seramik katkı fazının etkisi ile ilgili birçok araştırma yapılmaktadır. Son birkaç yıldır da Al-MMK'lar uzay, savunma, otomotiv ve ısı gibi teknolojik yapı ve fonksiyonel uygulamalarda kullanılmaktadır (Natibo, 1993)

Çizelge 1.1 Alüminyum Matrisli Kompozitlerin potansiyel ve mevcut uygulamaları (Natibo, 1993)

SAĞLANAN FAYDA	Ağırlık Azaltılması	Aşınma Direncinin Artması	Rijitlik	Isıl İletkenliğin Önceden Belirlenebilmesi	Yüksek Sıcaklıklarda Performans Artışı	Önceden Belirlenebilir CTE	Korozyon Direnci	Radyasyona Karşı Direnç	Yüksek Dayanım	POTANSİYEL VE MEVCUT UYGULAMALAR
Uçakların Dış Yüzey Kaplamaları	*				*				*	
Taşıyıcı Elemanlar	*	*					*		*	
Bisiklet Gövdeleri	*		*						*	
Deniz Araçlarının Direkleri	*		*						*	
Fren Rotorları	*	*								
Elektronik Ambalaj	*			*	*	*		*		
Elektronik Devre Taşıyıcıları	*			*	*	*				
Motor Silindir Gömlekleri	*	*								
Birleştirme Elemanları, Cıvatalar, Somunlar	*						*		*	
Yer Araçları	*								*	
İniş Takımları Destekleyicileri	*		*						*	
Tıbbi İmplantlar	*		*	*			*		*	
Optik Kılavuz Sistemleri	*		*	*		*				
Pistonlar	*	*								
Uydu Anten Direkleri	*		*							
Deniz Araçları	*		*				*			
Uzay Yapıları	*		*	*				*		
Transmisyon Parçaları	*	*					*			
Nükleer Santral Boru Donanımları	*						*	*		
Türbin Motor Parçaları	*	*			*				*	
Sonsuz Vida Dişlileri	*	*							*	

Bu çalışmanın amacı; farklı takviye oranlarına sahip ve farklı şekil değiştirme oranlarında haddelenmiş AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozitleri düşük hızlı darbe testlerine tabi tutularak, takviye oranlarının ve şekil değiştirme derecelerinin, darbe davranışına etkilerini incelemektir. Bu konuda yapılan çalışmalara ilave olarak yapılan bu çalışma, SiCp takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin darbe davranışları konusunda ek bilgi ve katkı sağlayacaktır.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin istenen özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlerin istenen özelliklerinin bir malzemede toplanması, iyi korozyon direnci, iyi ısıl iletim, mükemmel aşınma direnci, düşük ağırlık, estetik görünüm, su absorpsiyonunun düşüklüğü, gaz ve sıvı fazlarının nüfuziyetinin azlığı ile dayanım, yorulma dayanımı ve sıcaklık kapasitesinin yüksek olması gibi birçok avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin en büyük dezavantajları diğer malzemelere oranla daha pahalı olmalarıdır. Bu da, bu tip malzemelerin yeni olmaları nedeniyle üretim yöntemlerinin yerleşmemiş ve üretimlerinin yüksek üretim oranlarına erişememiş olmasından kaynaklanmaktadır (Lloyd, 1994).

### 2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler kullanılan matris malzemesine göre polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler olarak üç ana grupta sınıflandırılırlar (Chawla, 1998).

Davranışlarına göre termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılan polimer matrisler genellikle sürekli fiberlerle kullanılırlar. Sürekli fiberlerle takviye edilen polyster, polyamidler (naylonlar) ve epoksi reçineler en çok kullanılan matris malzemeleridir. Takviye malzemesi olarak cam, karbon ve organik fiberlerin tercih edildiği polimer matrisli kompozitler havacılık alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan metotlardan bazıları; elle sıvama, tel sarma, pultrizyon, profil çekme, basma transfer kalıplama, tabakalı birleştirme, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon metotlarıdır (Şahin, 2000; Kurşuncu 1999).

Seramik matris malzemeleri seramik fiberler ile takviye edilerek, ani kırılmalara karşı dayanım artışına ek olarak tokluklarının da artırılması amaçlanmaktadır. Geleneksel seramiklere oranla tokluk 20 kata kadar artırılabilir. Seramik matrisli kompozitler iki aşamada üretilmektedir. Birinci aşamada takviye elemanları matris içine ilave edilir, ikinci aşamada ise matris kurutulmaktadır. Soğuk presleme ve sinterleme, sıcak presleme, kimyasal reaksiyon, sıvı infiltrasyon, sol-jel ve polimer proliz üretim yöntemlerinden bazılarıdır. (Kurşuncu, 1999; Mutlu, 1996).

MMK'ların geliştirilerek ticari olarak kullanılabilir hale getirilmesi, malzeme bilimi alanında son yıllarda gerçekleştirilen en büyük yeniliklerden biridir. MMK'lerin kullanımıyla, malzemenin sahip olduğu özelliklerden fedakarlık etmeden %50'ye varan ağırlık tasarrufları sağlanabilmektedir. Ancak bu malzemelerin kullanımının hızla yaygınlaşmasını engelleyen en önemli faktör maliyetleridir. Buna rağmen son 20 yıl içinde, yüksek dayanım ve hafifliğin ön planda olduğu, fiyatın ise ikincil önemde kaldığı uygulamalarda MMK'lar hızlı bir gelişim göstermiştir (Aran, 1997).

## 2.2 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

MMK malzemeler üzerine ilk çalışmalar sürekli fiber takviyeli kompozitlerde yapılmıştır. Bu alandaki çalışmalar devam ederken, sürekli fiber kompozit malzemelerin üretim kademesinin karmaşık ve yüksek maliyetli olması bu tür kompozitlerin imalatını zorlaştırmış ve istenen yüksek performansa ulaşmasını mani olmuştur. Sürekli fiberlerin bu tip problemleri olması süreksiz takviyeli kompozitlerin geliştirilmesine, özellikle alümina ( $Al_2O_3$ ) kısa fiber ve SİC whisker takviyeli kompozitlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Süreksiz fiberler ticari olarak dizel motorların pistonlarında, whisker takviyeli kompozitler ise uzay çalışmalarında kullanım alanı bulmuşlardır. Partikül takviyeli MMK malzemeler yüksek elastisite modülü ve mukavemet, yüksek aşınma direnci, üretimin kolay çok çeşitli ve düşük maliyeti olarak üretilmesi gibi nedenlerle bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda önemli hale gelmişlerdir (Lloyd, 1994).

1960'ların ortasında nikel kaplı grafitler argon gazı ile birlikte alüminyum matris içerisine başarılı bir şekilde enjekte edilmiştir. Bu çalışma partikül takviyeli MMK

malzemeler üzerine yapılan ilk çalışmalardır. 1968’de Hindistan Teknoloji Enstitüsü, Kanpur, vorteks metodunu ilk defa kullanmış ve  $Al_2O_3$  takviyeli Al kompozit dökümünü gerçekleştirmiştir. 1970’lerin başlarında Masaccusetts Teknoloji Enstitüsü, katı ve sıvı arasındaki belli bir sıcaklık değerinde yarı-katı alaşımlara partikülleri karıştırmayı denemiştir. Bu çalışmalardan sonra Rooke Üniversitesinde yapılan çalışmalarda, sıvı-katı aralığında yarı-katı malzemeye partikül ilavesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Ray, 1993).

Genel olarak MMK üretiminde Al, Mg, Zn, Cu, Ti ve Ni gibi sünek bir metal ve bunların alaşımları matris olarak kullanılırken; silisyum karbür (SiC), bor (B), grafit, alümina ( $Al_2O_3$ ), tungsten ve molibden gibi değişik takviye türleri kullanılmaktadır. MMK’ların, metallere göre avantajları şunlardır;

- İstenen özelliklerin önceden belirlenebilmesi,
  - Geleneksel üretim yöntemlerinin basit modifiyelerle kullanılabilmesi,
  - Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilen malzemeler elde edilmesi,
  - Yüksek özgül mukavemet,
  - Yüksek özgül modül
  - Daha iyi yorulma dayanımı,
  - Daha iyi aşınma direnci,
  - Düşük sürünme oranı gibi yüksek sıcaklık özellikleri,
  - Düşük termal genleşme katsayısı.

MMK’ların dezavantajları olarak ise şu maddeler sayılabilir;

- Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve karmaşık üretim prosesleri,
- Geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan takımların kullanılamaması sebebi ile takım maliyetinde artış,
- Metallere göre sünekliğin azalması,
- Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat,
- Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz oluşudur.



MMK'lerin, takviye elemanlarına göre sürekli ve süreksiz takviyeli olarak iki gruba ayrılabilirken, uzun elyaf, kısa elyaf/whisker ve parçacık takviyeli olmak üzere üç ana gruba ayrılabilirler. Takviye boy/çap oranı esas alınarak yapılan bu sınıflandırmada büyük boy/çap oranına sahip olan takviyeler sürekli (uzun elyaflar, flamentler, vb.), küçük boy/çap oranına sahip takviyeler süreksiz (kırpılmış elyaflar, parçacıklar, whiskerlar, vb.) olarak adlandırılırlar.

### **2.3 MMK Malzemelerde Kullanılan Matris Malzemeleri**

Kompozit malzemelerde matris, bağlayıcı eleman olarak görev yapmaktadır. Matrisin asıl fonksiyonu, yükü takviye malzemesine iletme ve dağıtmaktır. Ayrıca takviye malzemesini ortamın etkilerinden ve darbelerden korumak, kompozit malzemenin tokluğunu arttırmak, kırılan elyaflardan çatlağın yayılmasını önlemek, mukavemete katkıda bulunmak ve takviye elemanlarını bir arada tutmak da matrisin görevidir (Aran,1997).

Hafif metaller, kompozitler için uygun matris malzemeleridir. Plastiklerden daha yüksek elastisite modülü, mukavemet ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklarda özellikleri de daha iyidir. Ancak metal matrisli kompozit üretimi daha zordur. Bunlar her elyafla iyi ara yüzey bağı oluşturmazlar. Silisyum karbürle kaplanan bor elyaf, metallerle en kolay bağ oluşturabilen malzeme olmasına rağmen pahalıdır. MMK'lerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlardır. Bu hafif metal alaşımları dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlarda tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması diğer karakteristik özelliklerden biridir. Genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu, ve Zn matris malzemesi olarak kullanılmakla birlikte bunlardan en yaygın kullanılanlar Al ve alaşımları, Ti ve Mg' dur (Şahin, 2000).

MMK uygulamalarında pek çok farklı metal ve metal alaşımları matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. MMK'lerde matris olarak alüminyum ve alaşımları;

- Düşük özgül ağırlık,
- Döküm ve deformasyon işlemlerine uygunluk,
- Nispeten düşük işlem maliyeti,
- Yüksek korozyon direnci,
- Nispeten kolay sağlanabilen ısı ve elektrik iletkenliği,

gibi fonksiyonel özelliklerinin çok daha iyi olmasından ötürü günümüzde en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. (Ürkmez, 2004)

Çizelge 2.1 Al esaslı bazı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Kaczmar, 2000)

Matris	Takviye elemanı, Hacim oranı (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama e (%)
Al	-	64	90	21
Al	SiC, 20	117	200	10
2014-T6	-	429	476	7.5
2014-T6	SiC, 10	457	508	1.8
2014-T6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 20	495	515	1.2
6061-T6	-	275	290	18
6061-T6	SiC, 15	290	340	5.5
6061-T6	SiC, 20	345	410	4.9
6061-T6	SiC, 30	380	435	1.8
6061-T6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 20	307	349	5.3
7091-T6	-	520	590	10.2
7091-T6	SiC, 20	500	560	1.8

#### 2.4 MMK Malzemelerde Takviye Elemanı Çeşitleri

Kompozit malzemelerde iki ya da daha fazla sayıda farklı faza sahip malzemeler bir araya geldiğinde, malzemeden beklenen özelliklerin gerçekleşebilmesi için fazlar arasında belirli fiziksel ve kimyasal uyumun olması gerekir. Matris ile takviye elemanı arasındaki fiziksel uyum, süneklik ve ısı genleşme özellikleri ile ilgilidir. Kimyasal uyum ise, ara yüzey bağı ve ara yüzey reaksiyonları açısından önem taşır. Takviye

elemanı ve matrisin ısı genleşme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması yönünden önemlidir (Natibo, 1993).

Takviye elemanı, kompoziti oluşturan en önemli elemanlardan biri olup, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır. Yükün takviye elemanına iletilmesi için ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elemanlarının ıslanamaması durumunda ara yüzey bağlarının oluşumunu engellemesine ve hava boşluklarının oluşmasına neden olur. Bundan dolayı takviye elemanı seçimi, matris içerisinde yönlendirilme şekilleri ve hacim oranları, kompozitin fiziksel ve mekaniksel karakteristiklerini etkiler (Natibo, 1993; Lloyd, 1994).

Takviye malzemesi olarak, değişik kimyasal kompozisyonlarda ve yapıda, seramikten grafitte veya karbondan metale, pek çok malzeme çeşidi kullanılmaktadır. Takviye malzemeleri, L/D (çap/boy) oranı yaklaşık 1 olan parçacıklar, yaklaşık 50 olan kırılmış elyaf veya whiskerlar ve 100 den büyük olan sürekli elyaflar olarak başlıca üç gruba ayrılmaktadır (Zhang, X., 2006; Ürkmez, 2004).

Takviye elemanlarının seçimi kompozit için çok önemli olduğundan, takviye elemanlarının özelliklerinin de çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Elyaf; yoğunluk, üretim kolaylığı, ısı direnç, kimyasal uyumluluk gibi kriterlere göre seçilmektedir. Özellikle uzay ve uçak sanayinde düşük yoğunluklu, yüksek mukavemete sahip takviye elemanlarının kullanılması kaçınılmazdır.

Yüksek mukavemete sahip bu takviye elemanlarının bazılarının elyaf veya whisker şeklinde üretilmeleri zordur ve özel tekniklerin uygulanması gerektiğinden ekonomik değildir. Bunun yanında, metalik kompozitler genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirildiklerinden yüksek sıcaklıklarda elyafların mukavemetlerini koruma özellikleri, oda sıcaklığındaki mekaniksel özelliklerinden daha önemlidir. Takviye elemanının metalik matris ile iyi bir ara yüzey bağı oluşturması, matris içerisinde istenmeyen reaksiyonların oluşmaması gerekir (Mori, 1973).

MMK malzemelerin üretiminde kullanılan takviye malzemeleri kimyasal yapılarına göre;

- a) Oksitler ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ )
- b) Karbürler ( $SiC$ ,  $B_4C$ )
- c) Nitrürler ( $Si_3N_4$ ,  $AlN$ )
- d) Elementler (paslanmaz çelik, Si, C, vs)

gibi dört ana gruba ayrılır (Mutlu, 1996; Srivatsan, 1991; Yıldızlı, 2003).

MMK'ların kullanılan takviye malzemesinin geometrisine göre farklı çeşitleri vardır.

Bunlar:

- Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler
- Kısa fiber veya whisker takviyeli metal matrisli kompozitler
- Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler (Chawla, 1998)

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin diğer takviye şekillerine göre önemli avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Üretimin hacmi büyüdükçe maliyet önemli olduğundan, sürekli veya kırılmış elyafa göre daha ucuz maliyetlerle elde edilebilirler,
- Döküm ve toz metalurjisi gibi üretim teknikleri ve bunu takiben haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi ikincil işlemler uygulanabilir,
- Takviye edilmemiş metalden daha yüksek kullanım sıcaklığına sahiptirler,
- Daha yüksek mukavemet ve elastisite modülüne sahiptirler,
- Artan ısı kararlılık gösterirler,
- Elyaf takviyeli kompozitlere göre daha izotropik özellikleri vardır (Ürkmez, 2004).

## 2.5 MMK Malzemelerin Üretim Yöntemleri

MMK malzemelerin üretimi için değişik yöntemler geliştirilmiş olmakla birlikte araştırmalar halen devam etmektedir. Genel olarak bu yöntemler, yapıyı oluşturan malzemelerin üretimi ve şekillendirme işlemleri olarak ayrılabilir. Bu nedenle her üretim tekniğinin bileşen yapısı, büyüklüğü ve buna bağlı içyapı özellikleri ile ilgili kendine özgü sınırlamaları vardır (Özben, 2001).

MMK malzemelerin üretim yöntemleri genel olarak üç grupta sınıflandırılabilir.

- Sıvı hal üretim yöntemleri
- Katı hal üretim yöntemleri
- Reaksiyon (in situ) üretim yöntemleri (Chawla, 1998).

Sıvı ve katı hal üretim yöntemleri konusunda bu güne kadar birçok üretim tekniği geliştirilmiştir. Reaksiyonla MMK üretim tekniği aslında sıvı ve katı faz üretim yöntemlerinin bir kombinasyonudur. Kompozit üretim yöntemleri uygulamaya alındığı ilk yıllarda sıvı ve katı faz teknikleri olarak belirlenmiş, daha sonra geliştirilen reaksiyonla MMK malzeme üretimi birçok araştırmacı tarafından ayrı bir sınıf olarak verilmiştir (İlgaz, 1997).

MMK'lerin üretim yöntemleri genelde iki ana grupta toplanır.

Katı faz üretim yöntemleri

- Difüzyon bağlanması
- Sıcak haddeleme
- Ekstrüzyon
- Toz metalürjisi ( TM ) teknikleri

Sıvı faz üretim yöntemleri

- Basıncılı veya basıncsız olarak ön şekil verilmiş iskelet yapıya ergimiş metal emdirilmesi
- Sıkıştırma döküm

- Basınçlı döküm
- Savurma döküm
- Hassas döküm
- Plazma sprey
- Kimyasal veya plazma ile buhar kaplama ( CVD, PVD).

#### Yarı-Katı üretim yöntemleri

- Rheocasting ve Compcasting Döküm Tekniği

#### 2.5.1. Sıkıştırma Döküm Tekniği

Sıkıştırma döküm yöntemi; metal bir kalıp içerisine yerleştirilen, ön ısıtma yapılmış, seramik elyaf veya başka bir takviye malzemesinden oluşmuş ön şekle, kuvvet yardımıyla sıvı metalin emdirilmesi ve böylece sıkıştırılan sıvı metale yüksek basınç uygulanarak katılaştırılması işlemidir. Bu yöntem, takviyeli ve takviyesiz, yüksek hassasiyetli mühendislik parçalarının üretilmesinde kullanılmaktadır. C, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve paslanmaz çelik elyaf gibi çoğu takviye malzemesi, sıvı metalle uygun bir şekilde ıslanmadıkları için, sıvı metal emdirme yöntemiyle kompozit malzeme üretimi zordur. Buna karşılık, sıkıştırma döküm tekniğinde sıvı metal, elyaf demetlerinden oluşan ön şekil içerisine kuvvet yardımıyla emdirilir; bu arada absorbe olmuş ve sıkışmış gazlar da atılır.

70-100 MPa'lık basınçların uygulanmasıyla, katılma süresinin çok kısa tutulması nedeniyle, matris ile takviye malzemesi ara yüzeyinde reaksiyon meydana gelmemesi, boşluksuz ve yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin elde edilmesini sağlar. Bu da birçok türde takviye ile kompozit malzeme üretimine olanak sağlar. Yüksek basınç uygulaması nedeniyle parça boyutunda sınırlandırılması ve takviye malzemesinin hasara uğraması bu yöntemin en büyük dezavantajı olmakla birlikte, pratik kullanımda sıkıştırma döküm yöntemi, kısa zamanda, karmaşık şekilli MMK parça üretimi için en verimli yöntemdir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al, C/Mg, SiCw/Al, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>W/Al kompozit malzemeleri, bu yöntemle kolaylıkla üretilebilirler.

SiC parçacık takviyeli Al matrisli kompozitlerde SiC parçacık takviye oranı arttıkça porozitenin artmakta, aynı zamanda, hacimce aynı parçacık takviye içeren kompozitlerde parçacık boyutunun küçük olması porozite yüzdesini arttırmaktadır. Üretilen kompozit malzemelerin üretim sonrasında preslenmesi porozite değerlerini düşürmektedir. Alınan bütün tedbirlere rağmen, Al alaşımlı dökümlerde az da olsa porozite bulunmakta ve malzemenin kesit alanını küçülterek yorulma, çekme, basma mukavemetlerini ve darbe dayanımını olumsuz etkilemektedir (Özdin, 2006).

### 3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Metal matrisli kompozit malzemelerin özelliklerinin tanımlanabilmesi için birçok model geliştirilmiş olmasına rağmen, parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin özelliklerine uygun model sayısı oldukça kısıtlıdır. Ancak bu konu hakkında yapılan bazı çalışmalar, parçacık takviyeli kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini karakterize etmiştir (Yılmaz, 1991).

#### 3.1 Bazı Elementlerin Mekanik Özelliklere Etkisi

Alaşım elementlerinin ilk görevi yüksek uzama kabiliyeti ve korozyona dayanıklılık gibi faydalı özellikleri kötü yönde etkilemeden saf alüminyumun düşük akma sınırını yükseltmektir. Bu özelliği kazandıran elementler; manganez, magnezyum, silisyum, bakır ve çinko olup, düşük miktarlarda bile istenilen amaca ulaştırırlar. Kübik yüzey merkezli alüminyum kristal kafesi yapısı, ancak çok küçük oranlarda bu elementlerden olabilir. Yabancı atomlar kristal kafesi içerisinde kaymaya karşı direnci arttırırlar; yani akma sınırını yükseltirler; şekil değiştirme kabiliyeti ise etkilenmez (Şevik, 2004).

Ticari saf alüminyuma yaklaşık %1.2 Mn ilavesiyle orta düzeyde dayanımlı ısıl işlem uygulanamayan bir alüminyum alaşımı elde edilir. Mangan ilavesi alüminyuma ince bir dağılım çökmesi ile mukavemet kazandırır. Bu alaşımlar orta düzeyde dayanım ve iyi şekillendirilebilirlik gerektiren genel amaçlar için kullanılır (Smith, 2001).

İkili alüminyum-magnezyum alaşımları ısıl işlem uygulanamayan 5xxx serileri için esas oluşturmaktadır. Magnezyum, alüminyumda önemli bir çözünürlüğe sahip olmakla beraber katı çözünürlük sıcaklık düştükçe düşer, alüminyum magnezyum alaşımları %7 Mg'dan daha az konsantrasyonlarda kayda değer çökme sertleşmesi göstermezler. Buna karşın magnezyum yüksek sertleştirme özelliği sağlar. Al-Mg alaşımları iyi korozyon direncine sahiptir. Ancak söz konusu bu alaşımlar gerilmeli korozyona ve doğal yaşlanma sertleşmesine duyarlıdır. Sıvı halde magnezyum oksidasyona eğilimli olup döküm esnasında özel koruma işlemleri gerektirir. Al-Si alaşımlarına göre Al- Mg alaşımlarının döküm özellikleri daha az uygundur.



Çizelge 3.1 Biçimlenebilir ve dökme alüminyum alaşımları (Smith, 2001)

ALAŞIMLARIN GÖSTERİLİŞLERİ		
Biçimlenebilir	Döküm	İçerdiği Alaşım Elementleri
1 XXX <sup>(*)</sup>	1XX <sup>(*)</sup>	----
2 XXX <sup>(**)</sup>	2 XX <sup>(**)</sup>	Cu
3 XXX <sup>(*)</sup>	-----	Mn
	3 XX <sup>(****)</sup>	Si+Mg; Si+Cu; Si+Cu+Mg
4 XXX <sup>(***)</sup>	4 XX <sup>(*)</sup>	Si
5 XXX <sup>(*)</sup>	5 XX <sup>(*)</sup>	Mg
6 XXX <sup>(**)</sup>	----	Mg+Si
7 XXX <sup>(**)</sup>	7 XX <sup>(**)</sup>	Zn
8 XXX <sup>(**)</sup>	----	Diğer
	8 XX <sup>(**)</sup>	Sn

- (\*) Yaşlandırma serleştirmesi uygulanamaz
- (\*\*) Yaşlandırma serleştirme uygulanabilir.
- (\*\*\*) Magnezyum varsa yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.
- (\*\*\*\*) Bazılarına yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

Al-Si alaşımları (3XX ve 4XX serileri) döküm alüminyum alaşımları arasında çok iyi akıcılık özelliğine sahip olması nedeniyle en çok rağbet gören alaşımlardır. Silisyumun ana alaşım elementi olarak bulunduğu alüminyum alaşımları, yüksek akıcılık, döküm sırasında düşük çekme, iyi korozyon direnci, kaynak edilebilirlik ve düşük ısıl genleşme katsayısı gibi önemli avantajlara sahiptir. Bu alaşımlar ince kesitli ve karmaşık şekilli parçaların döküm yolu ile elde edilmesi için oldukça uygundur. Akıcılık, MMK malzemelerin döküm yöntemleri ile üretiminde, matris kompozisyonlarının seçiminde oldukça önemli bir etkidir.

Bakır alüminyum için önemli bir alaşımdır, çünkü bakır iyi katı eriyik oluşturur ve uygun ısıl işleme oldukça yüksek dayanım sağlayabilir (Şevik, 2004; Ürkmez, 2004).

### 3.2 Takviye Türünün Mekanik Özelliklere Etkisi

MMK'ler için kullanılan takviye elemanları; parçacıklar, sürekli ve süreksiz fiberler, whiskerler ve benzerleridir. Takviye elemanlarını seçimi kompozit için büyük önem arz ettiğinden, takviye elemanlarının özelliklerinin de çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Fiberler; yoğunluk, üretim kolaylığı, ısıl direnç, kimyasal uyumluluk gibi kriterlere göre tetkik edilip seçilmektedir. Sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler, takviye elemanın paralel yönde mükemmel mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen bu malzemelerin yüksek maliyeti yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Ayrıca, sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin fiber eksenine dik yönlerde anizotropik özelliklere sahiptirler. Sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin kullanılmaları yüksek maliyetleri nedeniyle, çoğunlukla askeri ve çok özel amaçlı uygulamalarla sınırlandırılmıştır.

Seramik parçacık takviyeli MMK'ler, yüksek özgül mukavemet ve özgül modül, aşınma dayanımı ile yüksek sıcaklık mukavemetine sahiptirler. Kompozitin dayanımı; parçacıkların büyüklüğüne, parçacıklar arası mesafeye ve matrisin özelliğine bağlıdır. Parçacıklar yapı içerisinde homojen dağıldığında genellikle parçacık hacminin artışı ile kompozitin dayanımı ve aşınma direnci de doğru orantılı olarak artar. Fakat artan takviye oranı ile porozite de artma gözlenir. Parçacık takviyeli kompozitin diğer kompozitlerden farkı, döküm yolu ile imal edildiğinden, artan takviye elemanı ilavesi ile birlikte yapı içerisinde porozite vb. hatalar, ikincil bir işlem olan haddeleme veya basınçlı döküm ile giderilebilmektedir. Yani, parçacık takviyeli MMK üretimi yapıldıktan sonra, ikincil bir işlem yapılabilmektedir. Bunun kompozit açısından önemi çok büyüktür. Çünkü ara reaksiyon esnasında oluşan bu boşluklar kompozitin dayanımını düşürmektedir (Özdin, 2006).

Yapılarında hemen hemen kristal hataları olmayan whiskerlerin akma dayanımları teorik dayanımlarına yakındır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı süreksiz takviyeli MMK malzeme üretmek için kullanılmıştır. Özellikle, whiskerin yüksek sıcaklıktaki özellikleri diğer elyaflardan iyi olduğu için whiskerlerle takviyeli MMK malzeme üretimi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Plastik deformasyon tekniklerinin yanı sıra, toz metalurjisi

tekniki ile metalik matrislerin SiC whiskerleriyle güçlendirilmeleri mümkündür. Kompleks şekilli parçalar sıcak izostatik presleme ile ekonomik bir şekilde üretilebilirler. Preslenmiş parçalar, minimum düzeyde bitirme işlemine ihtiyaç duyarlar. SiC whiskerleriyle pekiştirilmiş metalik kompozitler, klasik şekillendirme tekniklerinin uygulanabildiği tek sistemdir. Bu whiskerlerle güçlendirilmiş alüminyumun işlenebilirlik özelliği, sürekli SiC, bor ve alümina fiberle güçlendirilmiş esaslı kompozitten daha iyidir (Huda vd., 1993; Kök, 2000).

Çizelge 3.2 Takviye tipinin etkisi (Sriwatsan vd., 1993)

<b>Matris</b>	<b>Takviye Tipi</b>	<b>Takviye Oranı (Hacimce)</b>	<b><math>\sigma_{çekme}</math> (kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\sigma_{akma}</math> (kg/mm<sup>2</sup>)</b>
Al 5456	SiC, parçacık	%8	46,7	25,8
	SiC, whisker	%8	51,2	28
	SiC, parçacık	%20	56,2	33
	SiC, whisker	%20	64,7	38,7

Tablodan açıkça görüldüğü üzere whisker tipi takviyelerin mekanik özellikleri daha iyidir (Sriwatsan vd., 1993). Kohara'nın yaptığı çalışmada SiC parçacık takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin, SiC whisker takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler kadar dayanıma sahip olmadığı belirlenmiştir (Şahin, 2004).

### 3.3 Süneklik

Süresiz takviyeli kompozit malzemelerin süneklik davranışı, diğer malzemelere ve hatta sürekli takviyeli kompozit malzemelere göre oldukça farklı özellikler sergiler. Bu farklılıklar gevrek, yüksek elastisite modülüne sahip ve matrise göre farklı ısıl genleşme katsayısına sahip takviyelerin kullanılması ile açıklanabilir. Takviye malzemesinin bu özelliklerinin yanında kullanılan matris malzemeleri de örneğin alüminyum, sünek, düşük elastiklik modülü gibi çok farklı özelliğe sahiptirler. Tüm bunlara ilaveten takviye ve matris malzemenin gerilme altında farklı kırılma davranışları sergilemesi,

sürekli takviyeli kompozit malzemelerin kırılma mekaniğinde oldukça fazla etkinin rol aldığı belirtilmiştir.

Kompozit malzemelerde ısı işlem sonucunda iyileşmeler gözlenmesine rağmen şekillendirilebilirlikleri sınırlıdır. Takviyesiz alaşımlarda kırılmanın, boşluk oluşumu ve büyümesi ile ilgili olduğu ve boşlukların mikro yapıdaki iri bileşen tanelerinde olduğu bilinmektedir. Boşluk oluşumu için gerekli şart tanelerde tane-matris ara yüzeyinde kritik bir normal gerilmenin oluşmasıdır.

Matris içerisinde yer alan sert ve kırılğan takviyeler, yük altında iken gerilmelerin kendi civarında yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Gerilmenin bu bölgede yoğunlaşması matrisin ve ara yüzeyin dayanımına bağlı olarak o bölgelerin deformasyon sonucu sertleşmesine sebep olmaktadır ve kırılğanlık artmaktadır.

Büyük takviye boyutuna sahip kompozit malzemenin matris içerisinde yüklenmesi ki bu takviyenin kırılması ihtimalini artmasına da sebep olur, gerilme altında civar bölgelerin (ara yüzeyin ve matrisin) daha fazla sertleşmesine dolayısıyla kırılğanlığın artmasına yol açar. Takviye oranının artması ve homojensizlik, deformasyon gerilmesinin bölgeselleşmesine neden olan başka bir etkidir. Bu bölgelerde yoğunlaşan gerilmeler sonucu meydana gelen çatlaklar veya daha önceden var olan mikro çatlakların büyümesi kompozitlerin kırılma davranışını önemli ölçüde etkiler (Özben, 2001).

Sünek-Gevrek Davranışa Etki Eden Faktörler:

A) Sıcaklık:

- Yüksek olursa sünek
- Düşük olursa gevrek

B) Yükleme Hızı:

- Yavaş olursa (statik yük) sünek
- Hızlı olursa gevrek

C) Çentik Durumu:

- Çentiksiz olursa sünek
- Çentikli olursa gevrek tarzda kırılma görülür.

### 3.4 Yorulma Davranışı

Yorulma bir malzemenin veya bir parçanın tekrarlanan bir yük altında mekanik özelliklerinin bozulması olarak tanımlanmaktadır. Bu tekrarlı yük, eğilme, dönme veya titreşim gibi etkilerle oluşabilir. Otomobil parçaları gibi kompozit malzemelerin birçok yüksek hacimli uygulaması, tekrarlı yüklemelere maruzdur (Chawla, 1998).

Klasik hafif alaşımların birçok uygulamadaki yetersiz yorulma dirençleri, MMK malzemelerin geliştirilmesi için itici güç olmuştur. SiC gibi parçacık formdaki yüksek rijitliğe sahip seramik bir takviye elemanının kullanımı ile makul bir fiyat seviyesi korunurken, yorulma direncinde de önemli bir artış sağlanabilir. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin yorulma direnci; Takviye parçacık hacim oranını, parçacık boyutunu, matris mikroyapısını, kalıntıların varlığını veya üretim yönteminden ortaya çıkan kusurları ve deney ortamı içine alan bir çok faktöre bağlıdır (Chawla, 2001).

Kompozit malzemede yükün çoğunu, mukavemeti matristen daha yüksek olan takviye elemanı taşır ve bu yüzden kompozit, takviyesiz alaşımdan daha mukavimdir. Yorulma direncindeki artış, takviye elemanı ve matris malzemesi arasındaki yüksek gerilime farklarında düşerken, yüksek tekrarlı yorulma rejiminde yani düşük gerilimlerde daha belirgindir. Verilen sabit bir parçacık hacim oranına sahip MMK malzeme içerisindeki parçacık boyutunun düşürülmesi ile parçacıklar arası boşluk düşer, sonuç olarak yorulma esnasındaki tekrarlı yüklemeye karşı daha fazla engel olur. Kritik bir parçacık boyutunun üstünde parçacık boyutu artarken kırılmaya karşı eğilim arttığından dolayı takviye elemanı kırılması ağır basmakta ve erken yorulma ömrüne katkıda bulunmaktadır (Chawla, 1998).

Parçacık takviye elemanı gibi matris de kompozitin yorulma davranışını önemli derecede etkiler. Matris mikroyapısını boyut, şekil, tane boyutu ve takviye olmayan dağılımlar veya kalıntılar (demirce zengin kalıntılar vb.) gibi faktörler etkiler. Tane boyutunun etkisi halen açık bir şekilde incelenmemiştir, fakat kompozitler bu konuda klasik alaşımlarla aynı eğilimdedirler (Chawla, 2001).

Üretim yöntemiyle ilgili intermetalik kalıntı formundaki kusurlar veya parçacık kümeleşmeleri de matris mikro yapısının bir parçasıdır ve özellikle toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin yorulma davranışında önemli bir rol oynar. Stres yoğunlaştırıcı etki yaratan bu kusurlar, malzemedeki bölgesel gerilim yoğunluğunu artırır ve çatlak oluşum etkisini kolaylaştırır. Yorulma esnasında çatlak oluşumunun, tipik olarak numunenin yüzeyinde bulunan bu kusurlarla meydana geldiği görülmüştür (Chawla, 2001).

### **3.5 Parçacık Takviyeli Malzemelerin Mekanik Davranışının Hesaplanmasında Kullanılan Bazı Modeller**

Çok fazlı malzemeler alanındaki bilimsel çalışmalarda, bir taraftan mikro yapı ile özellikler arasındaki ilişkileri belirleyip istenilen özellikleri sağlayacak içyapı parametrelerinin belirlenmesine çalışılırken, diğer taraftan da mühendislerin malzeme tasarımlarında kullanabileceği hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesine uğraşmaktadır. Takviyelerin geometrik olarak süreksiz olduğu çift fazlı içyapılarda geometrik etkileşim oldukça karmaşıktır. Fakat kural olarak çift fazlı içyapılarda, hacim oranına da bağlı olarak, yükün daha fazlasını rijit fazın taşıdığı, şekil değişiminin ise daha çok yumuşak fazla karşılandığı düşünülür. Fazlarda ne gerilme ne de genleme sabit olarak dağılmadığından, sabit gerilme veya sabit genleme kabulünden yola çıkan ve fazların paralel veya seri yükleme hallerinin kabul edilebileceği sürekli ve basit geometrili olduğu durumlarda “karışımlar kuralı” gibi basit yaklaşımlar yetersiz kalmaktadır. MMK malzeme göz önüne alındığında genellikle takviye malzemesi olarak kullanılan seramik parçacıkların boyutları, şekilleri ve yapıdaki dağılımları hakkında çok hassas bir bilgiye sahip olunmadığından çeşitli mikro mekanik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller elastik matris yapısını kuvvetlendirmek amacıyla, küresel takviye bileşenlerinin yapıda tesadüfi bir dağılım gösterdiği MMK’ların davranışlarının analizi için gerekli olan etkili elastiklik modülünün tahmininde kullanılmaktadır. Hashin-Strikman, Mori-Tanaka, Self-Consistent modeli ve Tsai-Halpin modeli bu modellerin en önemlileridir. (Yılmaz, 1995; Aboudi, 1991)

Yukarıda sıralanan yaklaşımlar için genel olarak şunlar söylenebilir:

- Çoğunlukla tek bir takviye biçimine bağlı kalındığından her zaman gerçekçi olmamaktadırlar.
- Takviye dağılım geometrisi ve buna bağlı olarak takviyelerin etrafındaki gerilme alanlarının birbirlerini etkilemesini dikkate almayan yöntemlerde, yapılan hesaplar yüksek hacim oranları için gerçekçi olmamaktadır.
- Bu iki sakınca gerçeğe yakın içyapı modelleri kullanılarak giderilmeye çalışıldığında, çeşitli varsayımlar içeren oldukça karmaşık ve uzun hesaplamalar ortaya çıkmaktadır. (Yılmaz, 1995)

### 3.6 Plastik Deformasyon Davranışı

Plastik alanda malzemelerin mekanik davranışları Hooke kanunu gibi basit ifadelerle belirlenememekte ve birçok nedenle plastik deformasyonun matematik formülasyonu elastik davranışinkinden daha güç olmaktadır. Plastik genleme geri alınabilir bir şekil değişimi değildir. Elastik davranış gerilme ve genlemenin başlangıç ve son değerleri ile kesin olarak belirlenebilirken, plastik davranışta son duruma gelene kadar genlemenin izlediği yolun da dikkate alınması gerekir. Değişik elastik deformasyon seviyelerinde gerilme-genleme halleri birbirine benzerken, plastik deformasyonun her aşamasında yeni bir gerilme-genleme dengesinin yazılması gerekmektedir. (Dieter, 1988)

Plastisite teorilerinin geliştirilmesinde karşılaşılan ve yukarıda anılan bu güçlüklerin çok fazlı malzemeler için daha da artacağı açıktır. Daha öncede belirtildiği gibi, çift fazlı içyapılarda gerilme ve genlemenin homojen olarak dağılmaması, hesaplamalarda bu büyüklüklerin dikkate alınmasını zorlaştırmaktadır. Anılan engellerin aşılması için literatürde, düzgün dağılmadığı bilinen gerilme-genleme değerleri yerine, onların ortalama değerlerini ele alan yaklaşımlar yapılmaya çalışılmaktadır. Özellikle çift sünek yapıları içyapılarda denenen bu tür yaklaşımların gerçekçiliği bir yana, iç yapıda birçok faktörden etkilenen ortalama değerlerin doğru olarak belirlenmesi de ayrı bir güçlüktür. Fazların akma dayanımlarının oranına, daha sert fazın biçimine ve hacim oranına bağlı bir büyüklük olan ortalama genleme değerleri için bazı ampirik eşitlikler önerilmiştir. Bu eşitlikler yardımıyla fazların ortalama genlemeleri belirlendikten sonra, karma malzemenin gerilme-genleme davranışının hesaplanabileceği bağıntılar verilmektedir. Bu tür bir deformasyon teorisi çift fazlı çeliklerin geliştirilmesinde kullanılmıştır

(Poech, 1992; Ankem, 1986). İki fazlı malzemelerin deformasyonunda genelde şu aşamalar söz konusudur:

- 1) Önce her iki faz da elastik şekil değiştirir.
- 2) Daha sonra yumuşak faz plastik şekil değiştirmeye başlar.
- 3) Her iki faz da plastik şekil değiştirir.
- 4) Fazlarda veya ara yüzde hasar oluşumları başlar.

Çok fazlı içyapılarda; bileşenlerin gerilme-genleme davranışları arasındaki fark arttıkça ve içyapı geometrileri karmaşıktıkça, içyapıda yük altında oluşan gerilme ve genleme dağılımları da karmaşıkmaktadır (Yılmaz, 1995). Fazlarda gerilme ve genlemenin düzgün olarak dağılmamasının nedenleri;

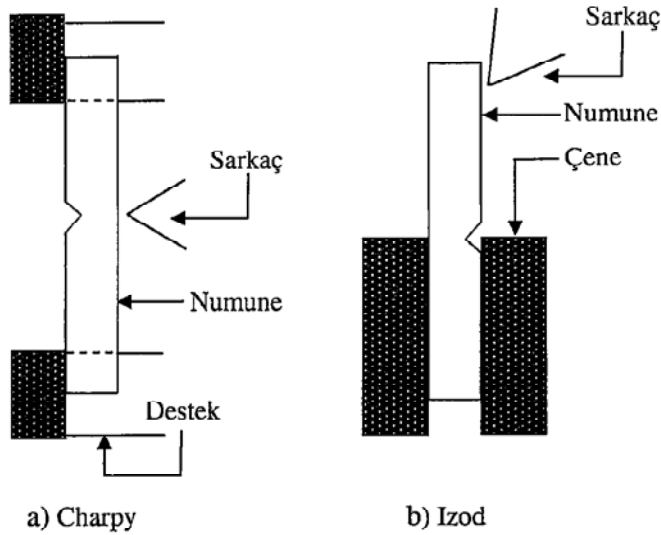
- 1) Fazların farklı elasto-plastik özelliklere sahip olmaları,
- 2) Faz sınırlarının sürekliliğinin korunması için fazların birbirlerine olan kısıtlamalarından doğan üç eksenli gerilme halleri,
- 3) Fazlarda herhangi bir nedenden dolayı hacim değişimi olduğunda doğan iç gerilmeler, (Yılmaz, 1995)

Bu tür çalışmaların tümü her iki fazda da gerilme ve genlemenin düzensiz dağıldığını doğrulamaktadır. Son yıllarda metal matrisli süreksiz seramik takviyeler içeren MMK'lerle ilgili araştırmalarda da sonlu elemanlar yöntemi sıkça kullanılmaktadır. MMK'lere ait çalışmalarda, karma malzemenin içyapısının sonlu elemanlar modeli oluşturulurken, malzemenin kesitini temsil eden iki boyutlu modellerden daha çok, birim hücre modelleri kullanılmaktadır. Birim hücre yaklaşımında, karma malzemenin en küçük hacmini oluşturduğu düşünülen birim hacimler düşünülür ve bu birim hacimlerin yanına gelmesi ile tüm malzemelerin oluşturulabileceği varsayılmaktadır (Aradhya, 1991; Haoran, 1993; Yılmaz, 1995). Birim hücre modeli yaklaşımına dayanan çalışmalar, iki boyutlu eksenel simetrik veya üç boyutlu modeller olmak üzere iki grupta ele alınabilir. İki boyutlu eksenel simetrik modeller çözüm için gereken bilgisayar kapasitesinden ve çözüm zamanından tasarruf için tercih edilmektedirler (Yılmaz, 1995).



#### 4. DARBE DAVRANIŞI

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışardan gelecek herhangi bir ani ve güçlü darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı veya davranışı göstermesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Bu yüzden birçok test tekniği darbe üretmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte MMK malzemelerin darbe davranışını karakterize etmek için standart bir test tekniği veya farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar arasında yaygın bir şekilde kabul edilen herhangi bir teknik mevcut değildir. Bu durum, farklı kaynaklardan sonuçların karşılaştırılacağı zaman, MMK malzemelerin darbe cevabı için uygun bir model geliştirme girişimleri için problem yaratmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen MMK malzemelerin darbe dirençlerinin belirlenmesi amacıyla aşağıdaki test yöntem ve cihazları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar genellikle sarkaç testleri (Charpy ve Izod), ağırlık düşürme testleri, hava veya gaz silah testleri (düşük hız ve balistik testler) olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilirler (Ceyhun, 2003). Bu testlerden Charpy ve Izod test düzenek şemaları Şekil 4.1’de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.1 Charpy ve Izod darbe deney düzenekleri (Ceyhun, 2003).

Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından soğurulan darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, soğurulan darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir. Charpy ve Izod test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemli olanı, numunenin desteklenme şekli ile çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur.

Charpy test düzeneğinde numunenin tam ortasına bir çentik açılır. Numune; çentik yüzeyi, darbe yüzeyine ters durmak üzere basit mesnetli kiriş şeklinde düzleme sabitlenir. Izod test düzeneğinde de yine ortasına çentik açılmış numune bu sefer dikey ankastre kiriş şeklinde deney düzeneğine yerleştirilir.

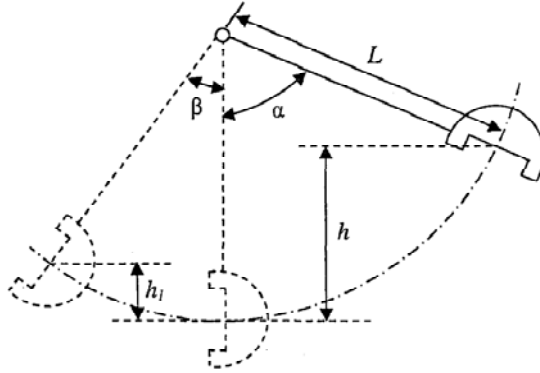
Charpy ve İzod darbe test yöntemleri ufak farklılıklar dışında birbirine çok benzerler. Bu farklılıklardan en önemlisi numunenin destekleme şekli ve çentiğin destek ve darbe noktalarına göre konumudur (Ceyhun, 2003). Ayrıca Izod test tekniği genellikle metal olmayan malzemeler için kullanılmaktadır.

Darbe deneylerinde, numunenin dinamik bir zorlanma altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir. Bulunan bu değer, malzemenin darbe direnci veya tokluğu olarak tanımlanır (Kayalı, 1983).

Charpy ve Izod darbe test yöntemlerinde çentik açılmış bir test numunesi, standart bir yükseklikten bırakılan ve ağırlığı  $M$  olan bir sarkaç ile darbeye maruz bırakılır. Darbeden sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilerek sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonraki sarkacın yüksekliği ne kadar az ise, absorbe edilen darbe enerjisi, dolayısıyla malzemenin darbe direnci veya tokluğu da o derece yüksektir (Kayalı, 1983). Bu enerji aşağıdaki formülle gösterilebilir.

$$\text{Kırılma Enerjisi} = M(h - h_1) = M.L.(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (4.1)$$

Burada  $M$  sarkacın ağırlığı,  $L$  sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı,  $h$  sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği,  $h_1$  sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği,  $\alpha$  düşme açısı ve  $\beta$  yükseliş açısıdır (Kayalı, 1983, ASTM E 23-93a, 1993).



Şekil 4.2 Darbe enerjisi hesabı için gerekli boyutlar (ASTM E 23-93a, 1993)

Standart bir sarkaçlı darbe cihazında ucunda bir kütleyle ( $m$ ) sahip çekiç belirli bir yükseklikte ( $h$ ) tutulur. Çekiç serbest bırakılmadan önce potansiyel enerjisi:

$$E_p = mgh \quad (4.2)$$

Çekicinin numuneye çarpma anındaki kinetik enerjisi:

$$E_k = (1/2)mv^2 \quad (4.3)$$

Kaybedilen potansiyel enerji kinetik enerjiye dönüşecektir. Buradan (4.2) ve (4.3) denklemleri eşitlenerek çarpışma hızı şöyle elde edilir:

$$\begin{aligned} E_p &= E_k \\ mgh &= 1/2mv^2 \\ v &= (2gh)^{1/2} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Darbe öncesi ve sonrası yükseklikleri sarkaç uzunluğu, düşme ve yükselme açıları cinsinden şöyle ifade edilebilir:

$$h = L(1-\cos\alpha) \quad (4.5)$$

$$h_1 = L(1-\cos\beta)$$

Buna göre, darbe öncesi enerjisi ve darbe sonrası enerjisi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E_{d\ddot{o}} = mgL(1-\cos\alpha) = WL(1-\cos\alpha) \quad (4.6)$$

$$E_{d_s} = mgL(1-\cos\beta) = WL(1-\cos\beta)$$

Numune tarafından soğurulan enerji, darbe öncesi ve sonrası enerjilerinin farkı olacaktır.

$$E_{numune} = E_{d\ddot{o}} - E_{d_s} = WL(\cos\alpha - \cos\beta) \quad (4.7)$$

Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap ta malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarının darbeye karşı cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir.

Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjii soğurabilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir.

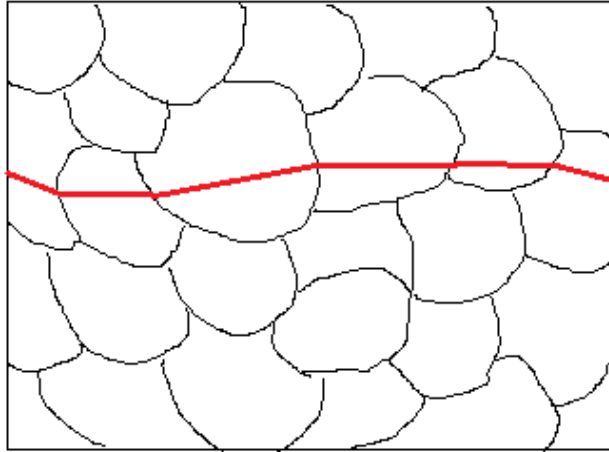
Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmeyebilir. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir.

Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir.

Darbe testleri sadece malzemenin ani yüklemeler altında soğurabildiği enerjiyi ölçmek için yapılmaz. Bunun yanı sıra, malzemenin sünek halden gevrek hale geçiş sıcaklığının belirlenmesinde de darbe testlerine başvurulur.

#### 4.1. KIRILMA MEKANİZMALARI

**4.1.1 Tane İçi Kırılma:** Taneleri kesen kırılma tipidir. Sünek veya gevrek tarzda olabilir.

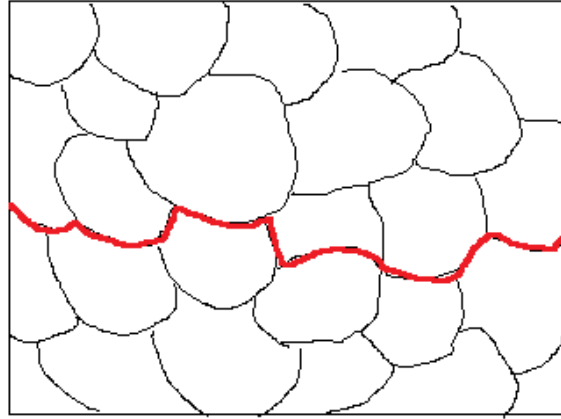


Şekil 4.3 Tane içi kırılma

Sünek Tarzda Tane İçi Kırılma: Boşlukların arasındaki bağ incelerek (kayma yolu ile) kopar ve çatlak yayılır. Oluşan kırılma yüzeyi lifli olur, pürüzlü olur. Yüksek enerjili bir kırılmadır. Çünkü plastik deformasyonla meydana gelmiştir.

Gevrek Tarzda Tane İçi Kırılma: Buna ayrılma kırılması adı da verilir. Az enerji gerektiren bir kırılmadır. Atomların en az yoğun olduğu kristal düzlemlerinde ayrılma olur. Pürüzsüz, parlak bir yüzey görüntüsü vardır.

**4.1.2 Taneler Arası Kırılma:** Mikro boşluklar taneler arasındaki tane sınırlarında oluşursa, bu tip kırılma meydana gelir. Yüksek enerjili kırılma tipidir.



Şekil 4.4 Taneler Arası Kırılma

Taneler Arası Gevrek Kırılma: Az enerjili, hızlı bir kırılma tipidir. Plastik deformasyon çok az oluşur ya da oluşmaz.

Taneler Arası Sünek Kırılma: Mikro boşluklar taneler arasındaki tane sınırlarında oluşursa, bu tip kırılma meydana gelir. Yüksek enerjili kırılma tipidir. (Ay,2009)

## 4.2. Tokluk

Ani darbelere karşı dayanımı yüksek olan malzeme seçimi için, malzemenin kopmaya karşı olan direnci darbe testi ile ölçülmelidir. Malzemenin ani darbelere karşı dayanımı tokluğu ile yakından ilişkilidir. Tokluk bir malzemeyi kırmak için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Darbe deneyi süresince malzeme tarafından soğurulan enerji, malzemenin dayanımının ve tokluğunun bir ölçüsü olarak kullanılabilir. MMK malzemelerin tokluğu aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Takviye elemanının, çeşidi, boyutu ve dağılım özellikleri
- Matris alaşımının özellikleri
- Üretim yöntemi
- Matris içerisindeki takviye elemanı dağılımı,
- Porozite seviyesi ve segregasyon gibi mikro yapısal özellikler

MMK malzemelerin tokluğunu etkileyen malzeme değişkenlerine ilave olarak, kompozitlerdeki tokluğu karakterize etmek için kullanılan teknikleri de ayrıca dikkate almak gerekmektedir. Kompozit malzemelerin tokluk değerlerini belirlemek için birçok ölçüm tekniği mevcuttur. Bununla birlikte, iki ana yaklaşım olan kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi yaklaşımı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Friend, 1989).

## 4.3. Kırılma Tokluğu

MMK malzemelerin kırılma tokluğu, çekme uzamasına benzer özellik göstermekte ve artan takviye hacim oranı ile düşmektedir. Bu düşüşün en önemli olduğu aralık, sıfırdan %10 takviye hacim oranına kadar olan aralıktır. Ayrıca kırılma tokluğu, yaşlandırmaya karşı çekme uzamasından daha az duyarlıdır (Lloyd, 1994). Parçacık takviyeli MMK malzemelerde kırılma tokluğu genel olarak 15-30 MPa  $m^{1/2}$  aralığında değişirken, kısa fiber veya whisker takviyeli MMK malzemelerde 5-10 MPa  $m^{1/2}$  aralığında değişmektedir (Chawla, 1998). Buradan parçacık takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunda önemli bir artış sağladığı anlaşılmaktadır (Lloyd, 1994).

Hahn ve Rosenfield kırılma tokluğu  $K_{IC}$ ' yi takviye elemanın hacim oranına bağlı olarak ifade etmişlerdir.

$$K_{IC} = [2\sigma_y E(\pi/6)^{1/3} d_\rho]^{1/2} f_\rho^{-1/6} K_{IC} \quad (4.8)$$

Burada  $K_{IC}$  kırılma tokluğu,  $\sigma_y$  akma gerilmesi, E elastisite modülü,  $d_\rho$  parçacık çapı ve  $f_\rho$  parçacık hacim oranıdır. Bu modelde, kompozitin mukavemetinin artışıyla tokluğunda arttığı tahmin edilmektedir. Bu tahmin, takviyesiz alaşımlarda genel olarak geçerli değildir (Lloyd, 1994).

Kraft kırılma tokluğunun çatlak ucu önündeki bağların hasarı ile kontrol edilebileceğini belirtmiş ve bir model geliştirmiştir. Buna göre:

$$K_{IC} = Em(2\pi\lambda)^{1/2} \quad (4.9)$$

Burada E elastisite modülü, m deformasyon sertleşmesi katsayısı,  $\lambda$  işlem bölge boyutudur. Kraft modeli, çatlak ucundaki şekil değişimi dağılımını daha doğru ifade etmek için Thomason tarafından daha da geliştirilen bir sınırlı yük hasar modelidir. Thomason kırılma tokluğu ifadesi

$$K_{IC} = 2.58(\rho\sigma_y E\varepsilon_c)^{1/2} \quad (4.10)$$

şeklindedir. Burada  $\rho$  çatlak ucu radyüsü ve tipik olarak 50  $\mu m$ 'dir,  $\sigma_y$  akma gerilmesi, E elastisite modülü,  $\varepsilon_c$  mikro boşluk oluşum şekil değişimidir ki, bu son özellik ortalama normal gerilmeye, boşluk oluşturan parçacıkların hacim oranına ve matris-takviye elemanı ara yüzey mukavemetine bağlı olan bir özelliktir (Lloyd,1994).



Çizelge 4.1'de %15  $Al_2O_3$  takviyeli AA2014 ve AA6061 esaslı kompozitlerin teorik  $K_{teorik}$  ve deneysel  $K_{deneysel}$  kırılma tokluğu değerlerinin yaşlandırma süresine bağlı olarak karşılaştırılması verilmektedir.

Çizelge 4.1 Teorik  $K_{teorik}$  ve deneysel  $K_{deneysel}$  kırılma tokluğu değerlerinin yaşlandırma süresine bağlı olarak karşılaştırılması (Lloyd, 1994).

Kompozit	Yaşlandırma süresi ve sıcaklık	$K_{deneysel}$ MN m <sup>3/2</sup>	$K_{teorik}$ (Thomason eşitliği) MN m <sup>-3/2</sup>	$K_{teorik}$ (Hahn ve Rosenfield eşitliği) MN m <sup>-3/2</sup>
2014/ %15 $Al_2O_3$	3 saat, 160 °C	24.2	25.4	31.1
	7 saat, 160 °C	21.7	12	-
	16 saat, 160 °C	19.5	12.4	-
	40 saat, 160 °C	19	11.7	-
	48 saat, 160 °C	18.1	15.6	-
6061/ %15 $Al_2O_3$	1 saat, 177 °C	24.7	21.5	24.8
	3 saat, 177 °C	23.2	21.8	-
	10 saat, 177 °C	22.7	17.6	-
	25 saat, 177 °C	21.5	17.2	-
	100 saat, 177 °C	21.2	18	-

Hahn ve Rosenfield eşitliği, kompozit mukavemeti ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla yaşlandırma ile kompozit mukavemetinde meydana gelen artış, tabloya bakıldığında Hahn ve Rosenfield eşitliğinin kırılma tokluğunda deneysel sonuçların aksine bir artış vermesine neden olmaktadır. Thomason sınırlı yük yaklaşımı ise genel olarak yaşlandırma zamanının artışı ile kırılma tokluğunda bir düşüş vermektedir, fakat Thomason eşitliği, özellikle AA2014 matrisli kompozitte kırılma tokluğunu eksik çıkarmaktadır (Lloyd, 1994).

MMK malzemelerin kırılma tokluğu için ifade edilmiş modellerden de anlaşılacağı üzere şu ana kadar ki geliştirilen modellerin bu malzemelerin tokluğunu belirlemede bazı eksikleri vardır. Bu sebeple kırılma tokluğunun doğru bir şekilde ifade edilmesi için kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır. Kırılma tokluğunu etkileyebilecek takviye elemanı homojensizliği, parçacık boyutu ve kompozitdeki kalıcı gerilmeleri hesaba katmak oldukça zordur (Lloyd, 1994).

#### 4.4. Kırılma Mekanîği

Kırılma mekanîği, mühendislik yapılarda kullanılan malzemelerdeki çatlak, boşluk ve inklüzyon şeklindeki hataların yük taşıma kapasitesine etkisini ve kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılma mekanîği, kırılmayla belirlenen hasarları incelemekte iki türlü yaklaşım öngörmektedir. Bunlardan birincisi Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı (1920), diğeri de Irwin Teoremidir (1956).

##### 4.4.1 Griffith Teorisi

Griffith camın kırılma mukavemetini incelerken, cam çubuğun boyu uzadıkça mukavemetinin azaldığını görmüştür. Bu durumun, camın yüzey hatalarından ileri geldiği düşünülmüştür, çünkü cam çubuğun boyu uzadıkça yüzey hatalarının bulunma ihtimali artmaktadır. Griffith gevrek bir malzemede çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıyı geliştirmiştir.

$$\sigma_f = \left( \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

$\sigma_f$ : Kırılma gerilmesi

$\gamma$ : Yüzey enerjisi

E: Elastisite modülü

a: Çatlak boyunun yarısı

Griffith denklemine göre, kırılmaya sebep olan gerilme miktarı “ $\sigma_f$ ”, mevcut çatlağın boyutu ile ters orantılıdır. Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre “G” kullanılır. Bu durumda denklem;

$$\sigma_f = \left( \frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

şeklini alır. Burada  $G_c = 2 \cdot \gamma$  olup, kırılma için gerekli toplam işi gösterir.

Griffith, analizinde, deformasyon enerjisinin çatlak ilerlemesi sırasında, ara yüzey enerjisine dönüşümünü esas almıştır. Dolayısıyla “G”, aynı zamanda çatlağın birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarıdır. Birimi N/m 'dir. Kırılma, G'nin kritik bir değeri olan  $G_c$ 'de meydana gelir.

#### 4.4.2 Irwin Teorisi

Irwin ve arkadaşları gevrek kırılmayı ayrı bir görüşle analiz etmişlerdir. Onlar analizlerinde çatlağın ucu civarındaki gerilme durumunu esas almışlardır. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasından, bir gerilme şiddet faktörü “ K ” parametresi geliştirmişlerdir. Gerilme şiddet faktörü uygulanan gerilmenin, çatlağın boyut ve şeklinin ve bir geometrik faktörün fonksiyonudur.

Griffith denklemi aşağıdaki şekilde yazıldığında;

$$\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = \sqrt{E \cdot G_c} \quad (4.13)$$

elde edilir.

Yukarıdaki eşitlikten  $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ 'nın değerinin  $\sqrt{E \cdot G_c}$ 'ye ulaştığında çatlağın ilerleyeceği anlaşılmaktadır.  $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$  teriminin çatlak ilerlemesi için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek, bu terim gerilme şiddet faktörü olarak isimlendirilir.

Dolayısıyla,

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.14)$$

olarak gösterilir. Gerilme şiddet faktörünün kritik bir değerinde kırılma olur.

$$K_c = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.15)$$

olur. Kritik gerilme şiddet faktörü “  $K_c$  ” genellikle kırılma tokluğu olarak isimlendirilir. Kırılma tokluğunun birimi  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ’dir.

Gerilme şiddet faktörü “  $K$  ”, yalnız gerilme durumu ve çatlak geometrisiyle ilgili bir parametre olup malzemenin özelliklerine bağlı değildir. Halbuki kırılma tokluğu “  $K_{Ic}$  ”, malzeme özelliğiyle ilgili bir parametredir. Kırılma tokluğu özelliğini belirlemek için gerilme şiddet faktörü ölçülür.  $K = K_c$  olduğunda çatlak ilerler ve kırılma olur.

Yukarıdaki bağıntılar sonsuz boyuttaki levhalar için geçerlidir. Belirli boyuttaki numuneler için gerilme şiddet faktörünün hesaplanmasında deneysel ve teorik yolla geliştirilmiş farklı bağıntılar kullanılır.

#### **4.5. Kırılma Enerjisi**

MMK malzemelerin tokluğunu ölçmek için kullanılan diğer bir teknik, malzemelerin kırılma enerjilerini değerlendirmektir. Bu ölçüm yöntemleri, tipik olarak sarkaç darbe deneyleri, quasi-statik eğilme deneyleri, ağırlık düşürme darbe deneyleridir. Basitlikleri ile bu deneyler, kullanılan numunelerin kesiti vasıtasıyla kırılmayı başlatmak için ve kırılmanın ilerlemesi için gereken toplam enerji değerlerini verirler. Bu deneylerden elde edilen kırılma enerjisi değerleri ile karakteristik bir malzeme özelliğini ilişkilendirmek, ölçülen enerjinin, numunenin boyutu ve deney geometrisi gibi faktörlere bağlı olmasından dolayı çok zordur. Bununla birlikte, bu tip deneyler kırılma tokluğu ölçümleri ile ulaşılamayan tokluk değerlerini ölçebildiklerinden dolayı faydalı deneylerdir (Friend, 1989).

## 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Hasson ve arkadaşları (1985) ekstrüzyonla ürettikleri % 20 takviye içeren AA6061 matrisli kompozitin, darbe dayanımına T6 (çözündürme uygulanmış ve yapay olarak yaşlandırılmış) ısıtılmasının etkisini incelemiştir. Ayrıca kompozitlerden elde edilen sonuçlarla takviyesiz AA6061-T6 kompozitin dayanımının AA6061-T6 alaşımından daha yüksek olduğu, kompozitin darbe dayanımına ısıtılmasının önemli bir etkisinin olmadığı ve darbe dayanımının alaşımından daha düşük olduğu sonuçlarını bulmuşlardır.

MMK malzemelerin parçacık boyutunun kırılma tokluğuna etkisi ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, bunların bir kısmı, parçacık boyutunun artırılması ile kırılma tokluğunu arttırdığını, bir kısmı ise bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Fakat genel olarak kırılma tokluğu, parçacık boyutu ile arasında güçlü bir bağlantı göstermez. SiC takviyeli AA1100 kompozitin kırılma tokluğuna parçacık boyutunun etkisini inceleyen Flom ve Arsenault (1989), AA1100/ SiC kompozitin kırılma tokluğuna 20  $\mu\text{m}$ 'den küçük parçacık boyutunun üzerindeki değerlerde SiC' ün kırılmada baskın bir rol oynadığını ifade etmişlerdir. Flom ve Arsenault, SiC ve Al arasındaki termal genleşme katsayısı farkından dolayı ara yüzeyde oluşan yüksek dislokasyon yoğunluğunun matrisi etkilediğini belirtmişlerdir.

Klimowicz ve Vecchio (1990),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  takviyeli AA6061 ve AA2014 matrisli kompozitlerin kırılma tokluğunu incelemişler ve yaşlandırma zamanının artışıyla mukavemetin artmasına rağmen kırılma tokluğunun düştüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca mukavemetin de düştüğü aşırı yaşlandırma şartlarında bile kırılma tokluğundaki bu düşüşün sürdüğünü belirten Klimowicz ve Vecchio, bunu yaşlandırma sonucu oluşan çöküntülerin matris ile takviye faz arasında oluşturduğu boşluklara, bağlantı zayıflamasına ve takviye parçacıklarındaki kırılmalara bağlamışlardır.

Manoharan ve Lewandowski (1992) % 20 takviyeli AA7091 kompozitler üzerinde yaptıkları çalışmalarda yaşlandırma ile kompozitin mukavemetinin arttığını,

sünekliğinin azalmasına bağlı olarak kırılma tokluğunun düştüğünü ve ayrıca parçacık boyutunun kırılma tokluğuna önemli bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Downes ve King (1993) farklı parçacık boyutlarına sahip SiCp takviyeli AA8090 kompozitin kırılma tokluğuna yaşlandırmanın etkisini incelemişler, parçacık boyutunun tokluğa bir etkisinin olmadığını ve yaşlandırma süresinin artışıyla mukavemetin artmasına rağmen kırılma tokluğunun düştüğünü belirtmişlerdir.

MMK malzemelerin tokluk değerleri, ölçüm tekniğine, üretim yöntemine, takviye elemanının hacim oranına, şekline, boyutuna ve matris alaşımının içeriğine bağlıdır. MMK malzemelerin tokluğunun belirlenmesi için hala standart bir metot belirlenmemiştir. Darbe deneyi, tokluk ölçümü için kullanılan metotlardan birisidir. Bu deney vasıtasıyla, bir malzemenin hem kırılma enerjisi ve hem de dinamik kırılma tokluğu tespit edilebilir. Literatürde süreksiz parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin darbe dayanımı üzerine yapılan çok az çalışma mevcuttur (Surappa, 1993). Yapılan literatür araştırması sonucunda bu kompozitlerin darbe dayanımları hakkında aşağıdaki çalışmaların yapıldığı tespit edilmiştir.

Alüminyum kompozitlerin ihtiva ettiği SiC'ün darbe yükü altında enerji absorbe etme kabiliyetini azalttığını belirten Ellis ve Lewandowski (Ellis, 1994), MB-85 Al (Al-Cu-Mg)/SiC parçacık takviyeli kompozite takviyesiz Al bir tabaka ilave ederek sünekliğini arttırmışlar ve bu sayede darbe direncini iyileştirmişlerdir.

Harrigan ve arkadaşları (1995), toz metalurjisi ile ürettikleri %15-30'luk SiC parçacık takviyeli Al 6061 alaşım matrisli kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde sıcak haddelemenin etkilerini incelemişlerdir. Haddeleme ile kalınlıkta yaklaşık %80 gibi önemli bir şekil değişimi sonrası, mekanik özelliklerin iyileştiğini ve bu durumun, metal-metal bağlarının iyileşmesinin bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir.

Doel ve arkadaşları (1996), SiC parçacık takviyeli alüminyum MMK'ların mekanik özelliklerine parçacık boyutunun etkisi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında matris alaşımı olarak Al 7075 (ağırlıkça %5.6 Zn, %2.5 Mg, %1.6 Cu), takviye malzemesi

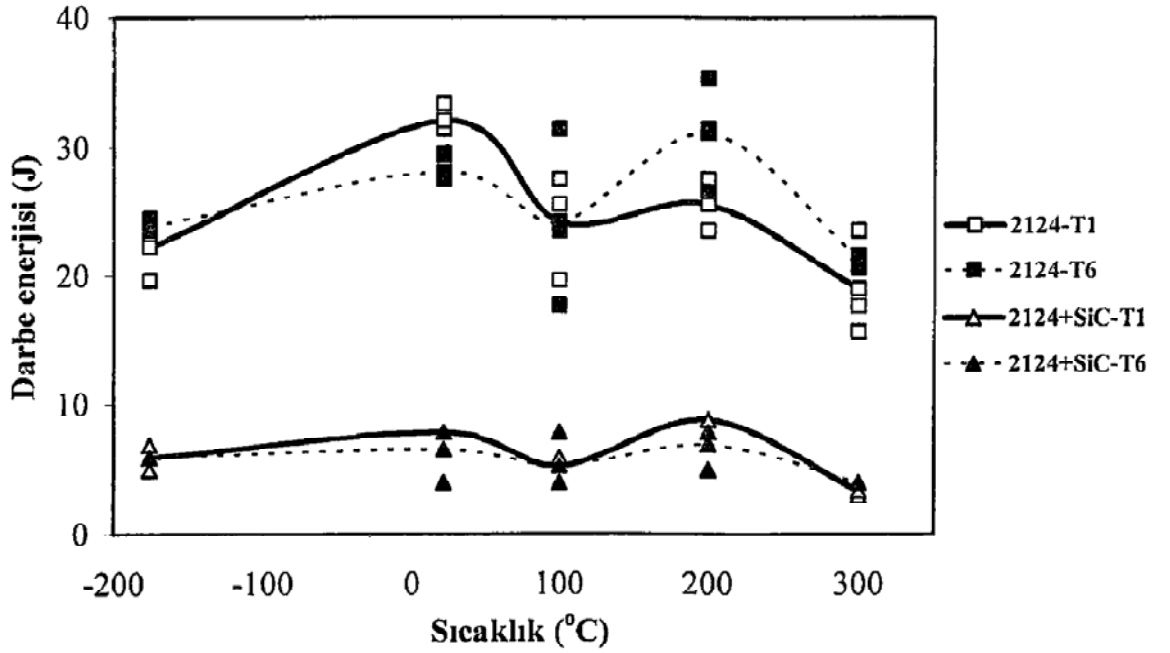
olarak 5  $\mu\text{m}$ , 13  $\mu\text{m}$  ve 60  $\mu\text{m}$  boyutlarında %15 hacim takviyeli SiC parçacıkları kullanmışlardır. Akma gerilmesi, çekme dayanımı ve süneklik gibi mekanik özelliklerin parçacık boyutlarının azalmasıyla iyileştiğini belirtmişlerdir.

Dod ve Petitcorps (1997), toz metalurjisi ve karıştırma döküm yoluyla ürettikleri Al-2124 matrisli MMK'ların soğuk şekillendirilebilirliğinin artırılması için uygun ısı işlemlerin bulunmasına çalışmışlardır. Çalışmalarında, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş Al-2124/SiC<sub>p</sub> (hacimce %17, 3 ile 13 $\mu\text{m}$  ebatlarında) kompoziti ve karıştırarak döküm yoluyla üretilmiş A356/SiC<sub>p</sub> (hacimce %15, 16 $\mu\text{m}$  ebatlarında) kompoziti kullanmışlardır. Karıştırarak döküm yönteminde şekillendirebilirliğinin daha ucuz olmasının toz metalurjisi yöntemine göre büyük bir avantaj olduğunu vurgulamışlardır.

Morelli ve arkadaşları (2001), çalışmalarında, %20 oranında, 5 $\mu\text{m}$ , 7 $\mu\text{m}$ , 23 $\mu\text{m}$  gibi farklı parçacık boyutunda SiC ile takviye edilmiş Al-3,6Cu-1,9Mg-0,2Zr matrisli kompozit malzemeyi, toz metalurjisi ile üretmiş ve ekstrüzyon işlemi ile şekillendirmişlerdir. Daha sonra T6 ve T8 ısı işlemleri uygulanmıştır. T8 ısı işlemi ile daha ince taneli ve daha homojen dağılım meydana gelmiştir. Diğer yandan, T8 işleminde haddemele aşamasının bir sonucu olarak, matriste homojen bir dislokasyon dağılımı elde edilmiştir. En büyük parçacık boyutlu takviyeleri içeren kompozit malzemelerin haddelenmesinde ise, parçacık kırılmaları meydana gelmiş, böylece dayanım değerleri, takviyesiz matris alaşımından düşük çıkmıştır.

Ahlatcı ve arkadaşları (2002), %60 SiC parçacık içeren Al (%99.8) kompozitin darbe davranışı üzerine tane boyutunun etkisini araştırmışlar ve SiC tane boyutu arttıkça kompozitin darbe dayanımının düştüğünü ifade etmişlerdir. Bunu parçacık boyutunun artışı ile parçacıklardaki kırılma hasarının artmasına bağlamışlardır.

Ekici (2004) üretimini gerçekleştirdiği Al MMK'leri, düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmak amacıyla ASTM E23 A standartlarına göre V çentikli darbe numunesi boyutunda işlemiştir.



Şekil 5.1 T6 ve T1 ısıl işlem uygulanmış Al 2124 takviyesiz alaşımı ve kompozitlerinin ısıl darbe dayanımlarının sıcaklığa bağlı değişimi

Darbe testleri, farklı matris alaşımı ve matris yaşlandırma halinde hazırlanmış V çentikli deney numunelerine  $-176^{\circ}\text{C}$ ,  $21^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$ 'de farklı SiC tane boyutu ve farklı ekstrüzyon oranlarında hazırlanmış V çentikli deney numunelerine  $21^{\circ}\text{C}$ 'de charpy darbe deney makinesinde gerçekleştirmiştir. Şekil 5.1'de örnek olarak AA 2124 takviyesiz alaşımı ve kompozitlerinin ısıl darbe dayanımlarının sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere takviyesiz AA 2124 alaşımı, kompozitten çok yüksek darbe enerjisine sahiptir. Isıl işlem, takviyesiz AA 2124 alaşımında farklı sıcaklıklarda farklı etkiler yaratırken, kompozitte ısıl işlem genelde darbe enerjisini düşürmüştür. Darbe deney sonuçları mikro yapısal ve fraktografik incelemeler, kompozit ve takviyesiz alaşımların hasar mekanizmaları ve deformasyon davranışları ile ilişkilendirmiştir. Parçacık kümelenmesi, parçacık çatlak oluşumu ve zayıf matris-takviye elemanı ara yüzeyi ile ilgili ara yüzey hasarı gibi olayları açıklamıştır. Deney sıcaklığı, parçacık boyutu ve ekstrüzyon oranının yanında matris karakteristiklerini yorumlamıştır.



Öztürk (2007) SiC ilaveli alümina seramik kompozit üretimi ve bu seramik kompozitlerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini incelemiştir. Deneysel çalışmada alümina ve SiC tozlarını kullanmıştır. Şekillendirilen numuneler 1500–1550–1600–1650 °C sıcaklıklarda sinterlemiştir. Üretilen numunelerin üzerinde pişme küçülmesi, su emme, gözenek miktarı, bulk yoğunluk, relatif yoğunluk, üç nokta eğme mukavemeti, sertlik, kırılma tokluğu deneylerini yapmış ve değerler tespit edilmiştir. XRD ve SEM ile mikroyapı incelemeleri yapmıştır. Yapılan bu fiziksel ve mekanik testler sonucunda üretilen seramik kompozitlerin özelliklerini vermiş ve yorumlamıştır.

Eren (2007), Alüminyum-termoplastik kompozit panelleri incelemiştir. Darbe testini, sabit ağırlıkta, farklı yüksekliklerde yapmıştır. 15J, 30J, 45J ve 60J'lük enerjilerin numune üzerinde oluşturdukları hasarları incelemiştir. Deneysel sonuçları grafiksel olarak yorumlamıştır. Delaminasyon olayı 45J ve 60J' lük enerjilerde oluştuğunu gözlemiştir.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, takviye oranlarının ve soğuk haddelenmenin AlMg<sub>3</sub>/SiCp kompozit malzemelerinin darbe davranışları üzerine etkilerini araştırmak amacı ile değişik oranlarda SiC parçacıkları ile takviye edilmiş AlMg<sub>3</sub> matrisli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada farklı takviye oranlarında üretilmiş ve farklı oranlarda haddelenmiş kompozit malzemelerden çentik darbe testi numuneleri standartlara uygun olarak çıkarılmış ve çentik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri sonucunda kırılma yüzeylerinin fotoğrafları çekilerek metalografik inceleme yapılmıştır.

### 6.1 AlMg<sub>3</sub>/SiCp Kompozitlerinin Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak seçilen AlMg<sub>3</sub> alüminyum alaşımı ısıl işlemle sertleştirilebilme özelliği olmayan, yüksek dayanımlı bir alaşım olup, özellikle deniz suyuna karşı mükemmel korozyon dayanımı, çok iyi kaynak edilebilirliği ve iyi şekil verilebilme özelliği olan bir alaşımdır. AlMg<sub>3</sub> alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi sırasıyla Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmektedir.

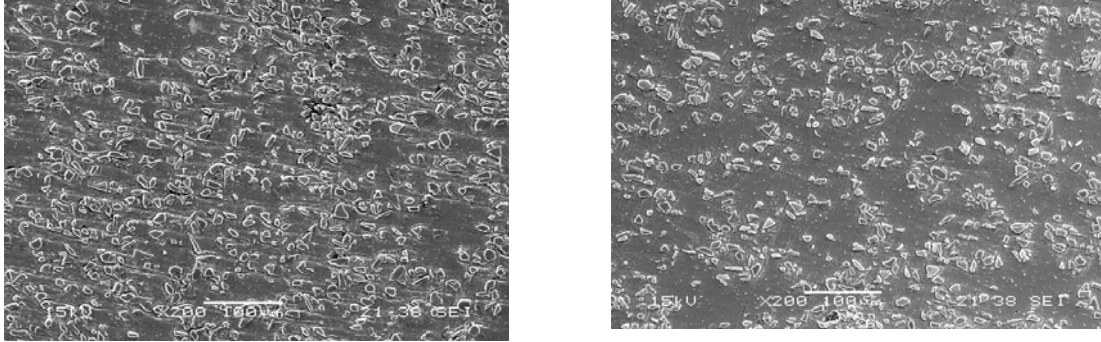
Çizelge 6.1 AlMg<sub>3</sub> alaşımının fiziksel özellikleri

AlMg <sub>3</sub> 'ün Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	2.66	g/cm <sup>3</sup>
Elastisite Modülü	68-72	GPa
Kayma Modülü	27	GPa
Ergime Aralığı	600-620	°C
Özgül Isı (273-373K)	0.97	J/gK
Lineer Genleşme Katsayısı (293-373K)	24x10 <sup>-6</sup>	1/K
Termal İletkenlik (373-673K)	147-168	W/mK
Elektriksel Direnç (293K)	0.049x10 <sup>-6</sup>	Ωm

Çizelge 6.2 AlMg<sub>3</sub> alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Mg	Si	Fe	Mn	Diğer	Al
2.6-3.2	0.40	0.40	0.5	0.15	Kalan

Çentik darbe dayanımı özelliklerinin belirlenmesi için %0-%5-%10-%15 ve %20 takviyeli kompozit malzemeler ve %20 oranında haddelenmiş numuneler kullanılmıştır. Haddelenmiş numuneler, her bir pasoda malzemeye % 1-1.5 şekil değişimi uygulanarak hazırlanmıştır.



a)

b)

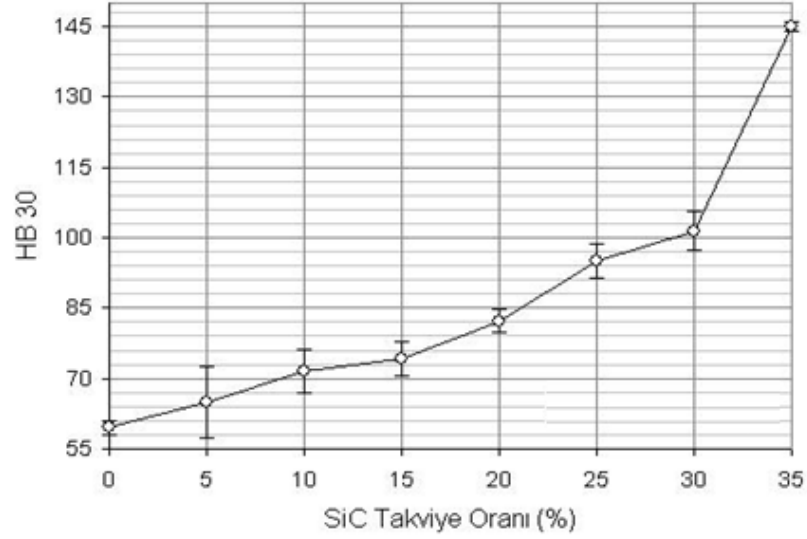
Şekil 6.1 AlMg3/%20SiCp kompozit malzemesinin a) %20 haddeleme uygulanmış b) haddeleme uygulanmamış SEM mikro yapı fotoğrafları (Ürkmez, 2004)

Kompozit numunelerin deneysel olarak yoğunluk ölçümleri, Arşimed prensibine göre yapılmış özgül ağırlık ve gözenek ölçüm sonuçları Çizelge 6.3’de, numunelerin özgül ağırlıklarının ve gözenek miktarlarının takviye oranı ile değişimi Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Deney numunelerinin teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile gözenek oranları (Ürkmez, 2004)

Malzeme	SiC (Hacimce) %	Özgül Ağırlık (Teorik) (g/cm <sup>3</sup> )	Özgül Ağırlık (Deneysel) (g/cm <sup>3</sup> )	Gözenek %
AlMg3	-	2,66	2,62	1,5
AlMg3+ % 5 SiC	5	2,69	2,65	1,2
AlMg3+ % 10 SiC	10	2,71	2,68	1,1
AlMg3+ % 15 SiC	15	2,74	2,72	0,8
AlMg3+ % 20 SiC	20	2,77	2,74	1,2

Darbe deneylerinde kullanılan şekil değişimi uygulanmamış kompozit malzemelerin Brinell sertlik deneylerine ait sonuçlar (62,5 kg yük ve 2,5 mm çaplı bilya) Şekil 6.2’de verilmiştir.



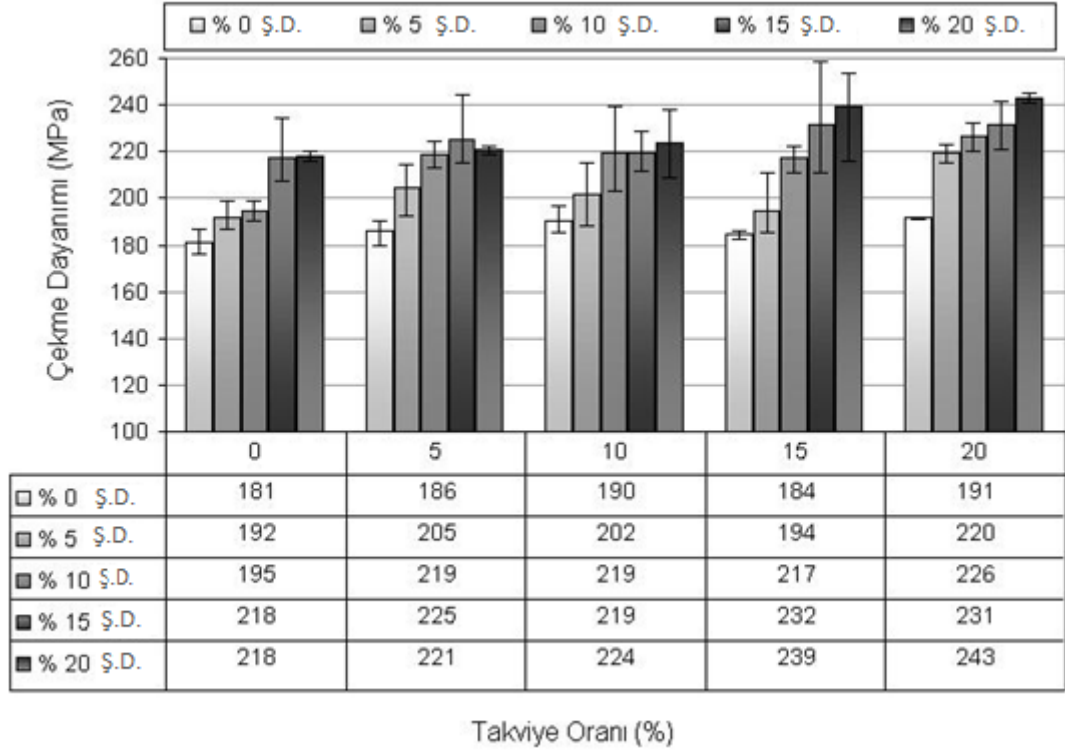
Şekil 6.2 Şekil değişimi uygulanmamış kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin takviye oranları ile değişimi (Ürkmez, 2004)

Şekil değişimi uygulanmış (haddelenmiş) numunelerde meydana gelen sertlik artımları da Çizelge 6.4 de verilmiştir.

Çizelge 6.4 %20 şekil değiştirme uygulanmış AlMg3 alaşımının, takviye oranlarına bağlı olarak yüzey sertliklerinin değişimi

Malzeme	Sertlik Artışı (%)
AlMg3	46
AlMg3+ % 5 SiC	36
AlMg3+ % 10 SiC	27
AlMg3+ % 15 SiC	34
AlMg3+ % 20 SiC	28

Kompozit malzemelerin farklı takviye ve şekil değiştirme (ŞD) oranlarında çekme dayanımı değerlerinin değişimi Şekil 6.3' de gösterilmiştir.

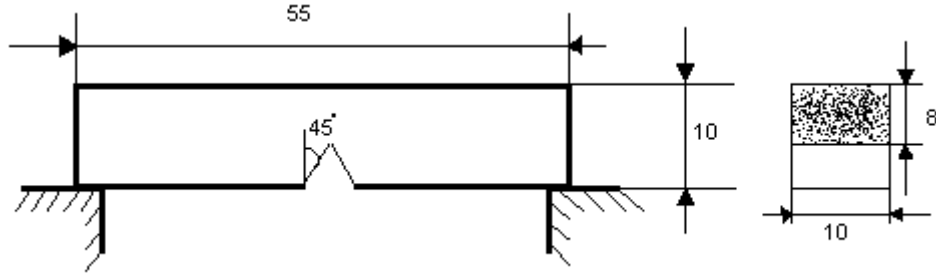


Şekil 6.3 Farklı takviye ve şekil değiştirme oranlarında kompozit malzemelerin çekme dayanımları (Ürkmez, 2004)

## 6.2 Çentik Darbe Deneyi

Çentik darbe deneyi yatay ve basit kiriş halinde iki mesnete yaslanan çentik darbe numunesinin çentik tabanına, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tespit etme işlemidir. Çentik darbe deneyleri TÜBİTAK-MAM malzeme laboratuvarında Zwick darbe cihazında maksimum 50 J'luk çekiç kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bütün numunelere aynı şartlarda çentik darbe testi uygulanmıştır.

Çentik darbe deneylerinde kullanılan deney numuneleri, ASTM E23 A standardına göre (Şekil 6.4) Mitsubishi RA-90 CNC tel erozyon tezgahında (Electrical Discharge Machining–EDM) 0.25 mm çapında pirinç tel kullanılarak işlenmiştir. (Şekil 6.5)



Şekil 6.4 Charpy V-çentikli darbe numunesi geometrisi



a)

b)

Şekil 6.5 Çentik darbe numunelerinin hazırlandığı Mitsubishi RA-90 EDM tezgahı

AlMg3/SiCp kompozit malzemeler seramik parçacıklarla takviye edildiklerinden dolayı geleneksel talaşlı şekil verme yöntemleri ile numune çıkarılması mümkün olmamıştır. Çentik Darbe numuneleri özel imalat yöntemlerinden EDM yöntemi ile hazırlanmıştır. EDM ile kesme işlemi dielektrik sıvı içerisinde ortalama 3mm/dak. hızla gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemleri sırasında malzeme içinde bulunan takviye sebebiyle sık sık tel kopması problemi ile karşılaşmıştır. 8 adet plakadan toplam 24 adet çentik darbe numunesi kesilerek çıkarılmıştır.



a)



b)



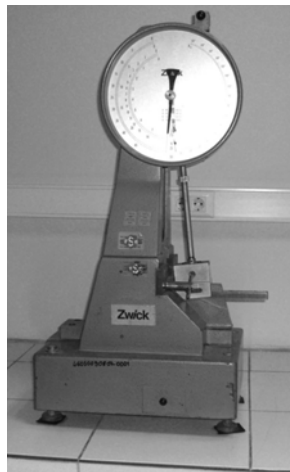
c)



d)

Şekil 6.6 Numune hazırlama a) yüzey paralelliğinin sağlanması, b) Numunelerin kesilerek istenilen boyutlara getirilmesi, c) Numunelerin çıkarıldığı kompozit plaka, d) Standart ölçülerde kesilmiş çentik darbe numunesi

Çentik darbe deneyleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi bünyesinde mevcut Zwick marka çentik darbe test cihazında (Şekil 6.7) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.7 Zwick çentik darbe cihazı

Çentik darbe deneyleri için hazırlanan numuneler aşağıdaki Çizelge 6.6’de gösterildiği şekilde kodlanmıştır. Kodlama işleminde takviye T harfi ile gösterilip takviye oranı yanına yazılmıştır. Haddelme işlemi E harfi ile gösterilip yanına oranları belirtilmiştir. Örneğin 2 nolu deneyde T5E20 olarak kodlanan numuneler %5 SiCp takviyeli ve %20 oranında haddelenmiş numunelerdir.

Çizelge 6.5 Numunelerin kodlanması

Deney No	Numune Grup Adı	Hacimsel Takviye Oranı %	Şekil Değişirme Oranı %	Çentik Darbe Numune Adedi
1	T00E00	0	0	3
2	T00E20	0	20	3
3	T05E00	5	0	3
4	T05E20	5	20	3
5	T10E00	10	0	3
6	T10E20	10	20	3
7	T15E00	15	0	3
8	T15E20	15	20	3
9	T20E00	20	0	3
10	T20E20	20	20	3



## 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, haddeleme yöntemi ile soğuk şekil değiştirmiş farklı takviye oranlarındaki kompozit malzemeler ile soğuk şekil verme uygulanmamış kompozit malzemelerin çentik darbe deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Hazırlanan her grup için yapılan üç deney sonucunun ortalaması alınarak Ortalama Darbe Enerjisi hesaplanmıştır (Çizelge 7.1).

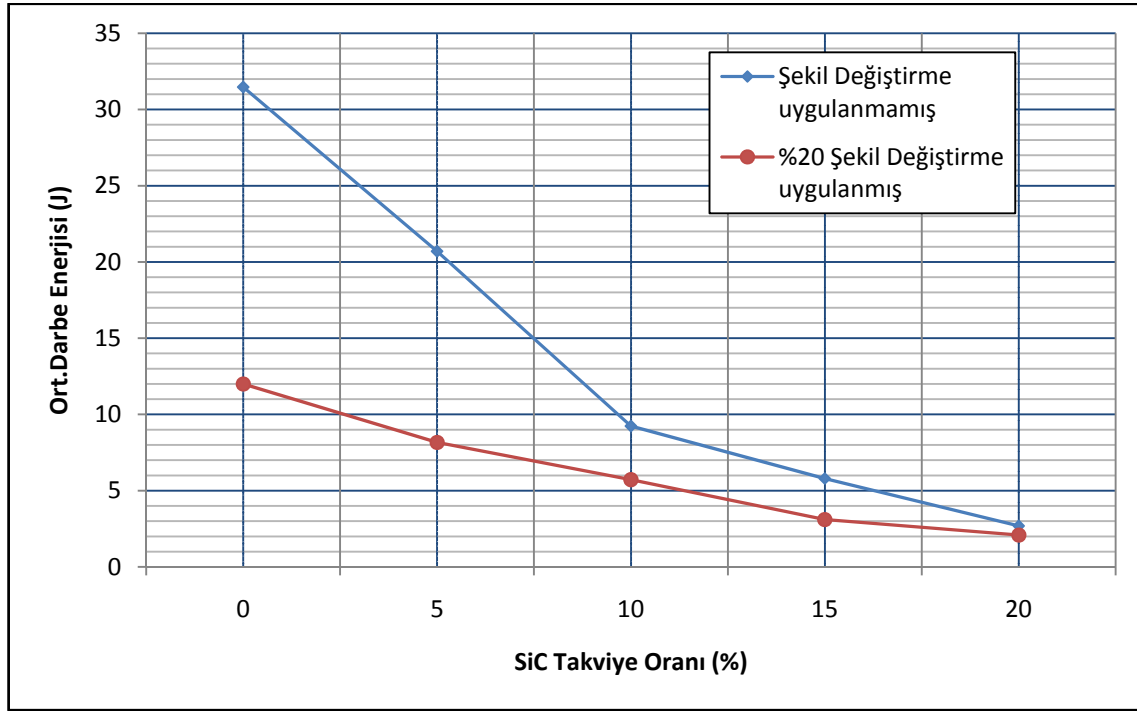
Çizelge 7.1 AlMg3 alaşımı ve AlMg3/SiCp kompozitlerinin çentik darbe deney sonuçları

Malzeme	Şekil değiştirme oranı %	Darbe Enerjisi (J) 1.Deney	Darbe Enerjisi (J) 2.Deney	Darbe Enerjisi (J) 3.Deney	Ort. Darbe Enerjisi (J)
AlMg3	-	29.57	31.37	33.47	31.47
AlMg3	20	12.77	11.57	11.47	12.00
AlMg3+ % 5 SiC	-	22.37	19.77	19.97	20.70
AlMg3+ % 5 SiC	20	10.07	7.27	7.17	8.17
AlMg3+ % 10 SiC	-	8.97	9.27	9.47	9.24
AlMg3+ % 10 SiC	20	5.07	6.12	5.97	5.72
AlMg3+ % 15 SiC	-	6.27	5.67	5.47	5.80
AlMg3+ % 15 SiC	20	2.99	3.27	3.07	3.11
AlMg3+ % 20 SiC	-	2.52	2.47	3.07	2.69
AlMg3+ % 20 SiC	20	2.42	1.97	1.87	2.09

Takviyesiz AlMg3 alaşımından hazırlanan numunelerle yapılan deneylerde numunelerin kırılması için daha fazla enerji gerekmiştir (Çizelge 7.1). Takviye oranı arttıkça numuneleri kırmak için harcanan enerji azalmıştır. AlMg3 alaşımı SiCp ile takviye edildiğinde, artan takviye oranı ile akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliği artış göstermektedir ancak % uzama ve kırılma için gerekli darbe enerjisi azalmaktadır.

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde malzemenin mekanik özellikleri matris malzemesine, takviyenin boyutuna, cinsine, malzeme içindeki oranına, dağılıma ve

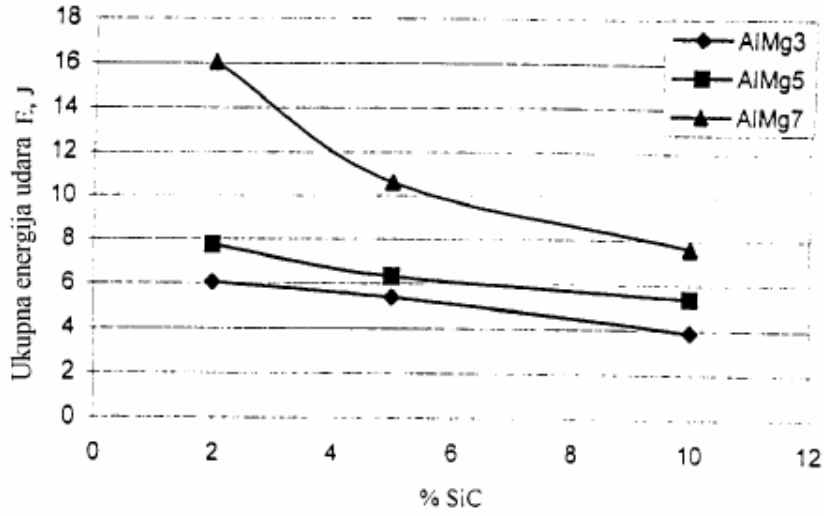
özellikle takviye ile matris arasında oluşan ara yüzey fazlarına bağlı olarak değişmektedir. Arayüzeyde oluşan ikincil fazlar malzemenin mekanik özellikleri ile darbeli yükler karşındaki davranışını etkilemektedir. Takviye oranı arttıkça arayüzey oranı artacağından ikincil fazların gevrek ya da sünek oluşuna bağlı olarak malzeme kırılma davranışı gösterir.



Şekil 7.1 AlMg3/SiCp kompozitlerin, şekil değiştirme oranına ve takviye oranına göre ortalama darbe enerjileri

AlMg3 alaşımı soğuk şekil verme ile sertleşebilen alüminyum alaşımlarından olduğu için haddeme işlemi uygulanarak akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertliği artırılabilir. Şekil değişimi uygulanmış kompozit malzemeler içerdikleri takviye oranına bağlı olarak sertlikleri değişmektedir. Takviye oranı arttıkça sertlikleri artmaktadır. Sertlik arttıkça malzeme gevrek davranış göstermektedir. Bulunan sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir (Dieter 1988, Askeland 1989)

Soğuk şekil verme uygulanmamış numunelerde takviye oranı %5 olduğunda malzeme çentik darbe dayanımının yaklaşık %30'unu, %10 takviye edildiği durumda yaklaşık %60'ını kaybetmektedir.



Şekil 7.2 AlMg alaşımlarının SiC takviye oranlarına bağlı olarak darbe enerjilerinin değişimi (Burzic, 2002)

Şekil 7.2’de Burzic ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmaya ait grafik görülmektedir. Bu grafikte, matris malzemesi olarak AlMg alaşımı kullanılan ve döküm yöntemi ile üretilen SiCp takviyeli kompozit malzemelerin çentik darbe deneyi sonucunda takviye oranına bağlı olarak toplam darbe enerjileri verilmektedir. Çalışmada, SiC takviye oranının artmasına bağlı olarak darbe enerjileri düşmüş, %10 SiC takviyeli AlMg3 alaşımının darbe enerjisi 4J olarak belirlenmiştir. Şekil 7.1 de AlMg3/SiCp kompozitlerin, şekil değiştirme oranına ve takviye oranına göre ortalama darbe enerjileri verilmiştir Burzic’ in çalışması ile karşılaştırıldığında aynı takviye oranında malzemenin kırılması için gerekli darbe enerjisi 9J, %5 SiC ilavesi yapılan kompozit malzemede bu değer 20J olarak belirlenmiştir. %20 SiC takviyesi yapıldığında ise kırılma için gerekli darbe enerjisi 3-4J civarında gerçekleşmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan kompozit malzemeler yarı-katı halde karıştırma ve arkasından sıkıştırma döküm uygulanarak elde edilmiştir. Bu durumda, üretim yöntemi kompozit malzeme dayanımını belirlemektedir ve darbe dayanımı daha yüksek kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3te görüldüğü gibi AlMg3 alaşımı %20 oranında SiC ile takviye edilip %20 oranında şekil değiştirmesi halinde çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertliği yaklaşık %25-%30 artmaktadır. Yarı katı karıştırma ve sıkıştırma döküm yöntemi ile takviye malzemesi matris tarafından daha iyi ıslatılmakta, yük takviye malzemesine daha fazla aktarılmakta ve homojen karışım sağlanmaktadır (Şekil 6.1). Böylece darbeli yükler karşısında malzemenin kırılması için daha yüksek enerji gerektiği Şekil 7.1 de görülmektedir.

Metalografik inceleme sonucunda çentik darbe deneyi sonucunda oluşan kırılma yüzeyleri fotoğraflanmış ve sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Şekil 7.3' te şekil değişimi uygulanmış ve uygulanmamış malzemelerin kırılma yüzeyleri iki ayrı grup halinde verilmiştir. A, B, C, D ve E' deki fotoğraflar sırası ile %0, %5,%10, %15 ve %20 oranlarında takviye edilmiş kompozit numuneleri göstermektedir. 1 ile gösterilenler soğuk şekil değişimi uygulanmamış numuneler 2 ile gösterilenler soğuk şekil değişimi uygulanmış numunelerdir.

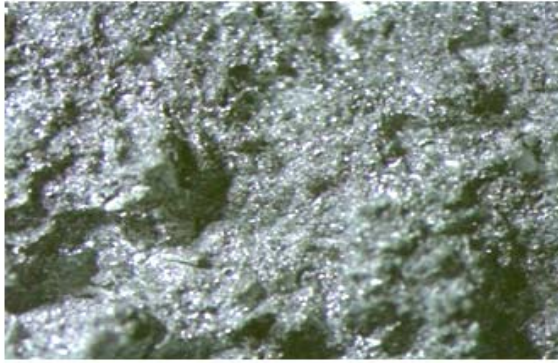
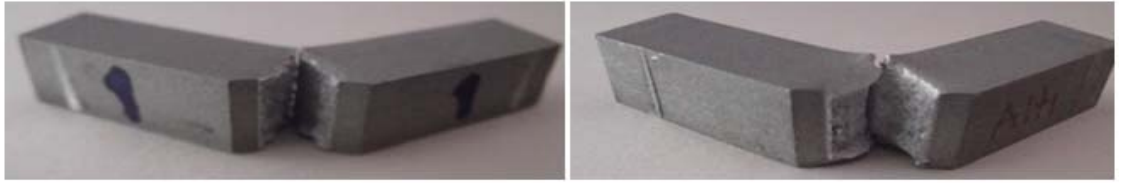
Şekil 7.3 A1' de şekil değişimi uygulanmamış takviyesiz AlMg3 alaşımı, Şekil 7.3 A2' de ise %20 şekil değişimi uygulanmış numune örneği gösterilmiştir. Numunelerin kırılmaları sırasında plastik deformasyon belirtisi olarak kesit büzülmesi meydana gelmiş ve parçaların her iki tarafında yanak oluşumu gözlenmiştir.

Şekil değişimi uygulanmamış numunelere nazaran şekil değişimi uygulanmış olan numunelerde daha az yanak oluşumu ve kesit büzülmesi meydana gelmiştir. Şekil değişimi uygulanmamış numunelerin kırılma yüzeylerinde sünek kırılmaya işaret eden çekme yırtılmasına bağlı krater oluşumu gözlenmiştir.

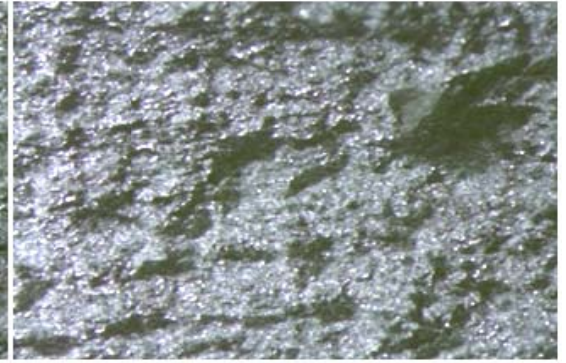
Şekil değişimi uygulanmış olan takviyesiz numunelerin kırılma yüzeylerinde çok daha az sayıda krater oluşumu ve daha az sünek kırılma meydana gelmiştir. %5 SiC takviyeli şekil değişimi uygulanmamış numunelerde az sayıda olmasına karşın yinede sünek kırılma işareti olan kraterler oluşmuş, daha az yanak oluşumu ve kesit büzülmesi meydana gelmiştir.

Şekil değişimi uygulanmış yüksek oranda takviyeli kompozit malzemelerde ise yüzeyde yok denecek kadar az krater olduğu görülmüştür.

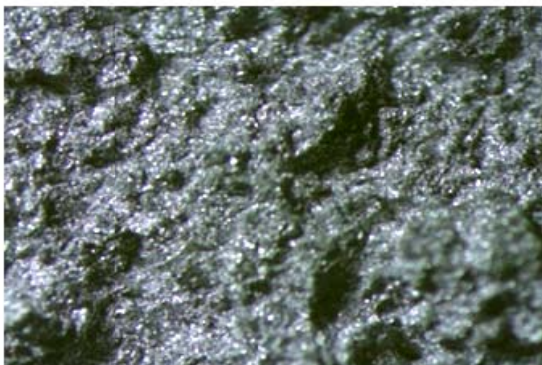
Takviye oranları arttıkça malzeme daha fazla gevrekleşmiş boyunlaşma, yanak oluşumu ve kesit büzülmesi meydana gelmemiştir. Malzeme düz bir kesit boyunca kırılmıştır. Ayrıca takviye artışı nedeni ile malzeme içinde daha fazla gaz boşluğu bulunmakta ve içerdiği gaz boşlukları nedeniyle malzemeler dayanımını kaybederek gevrek kırılmıştır.



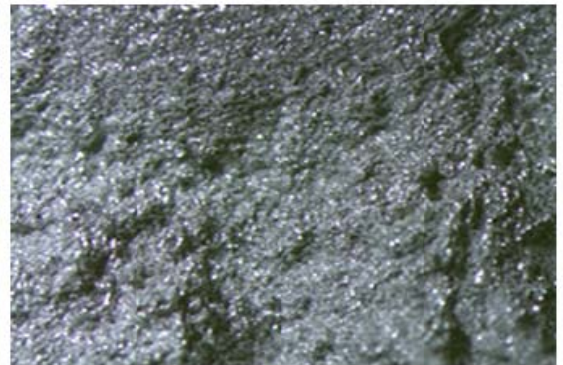
A1) Takviyesiz



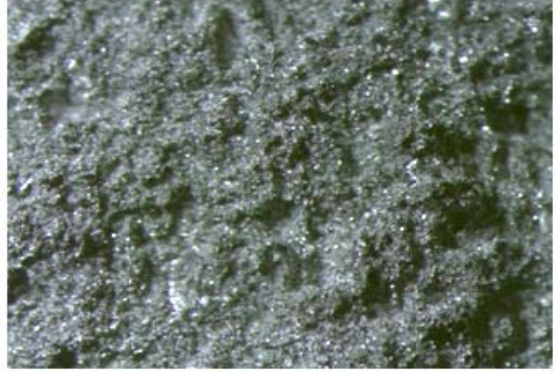
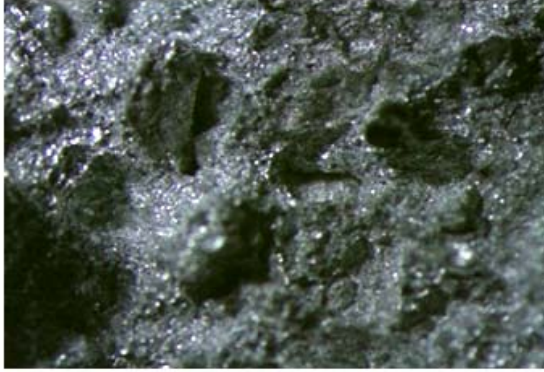
A2) Takviyesiz + %20 ŞD



B1) %5 SiCp

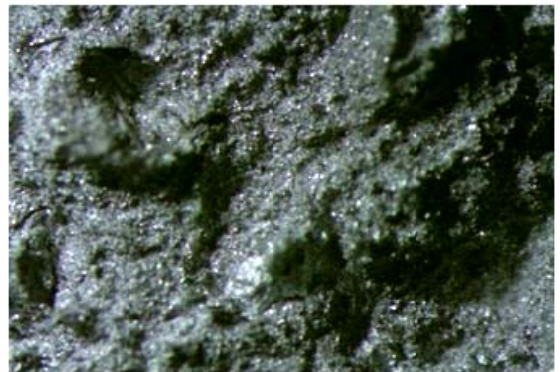
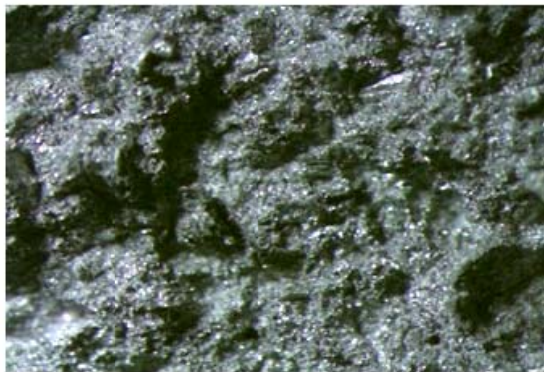


B2) %5 SiCp + %20 ŞD



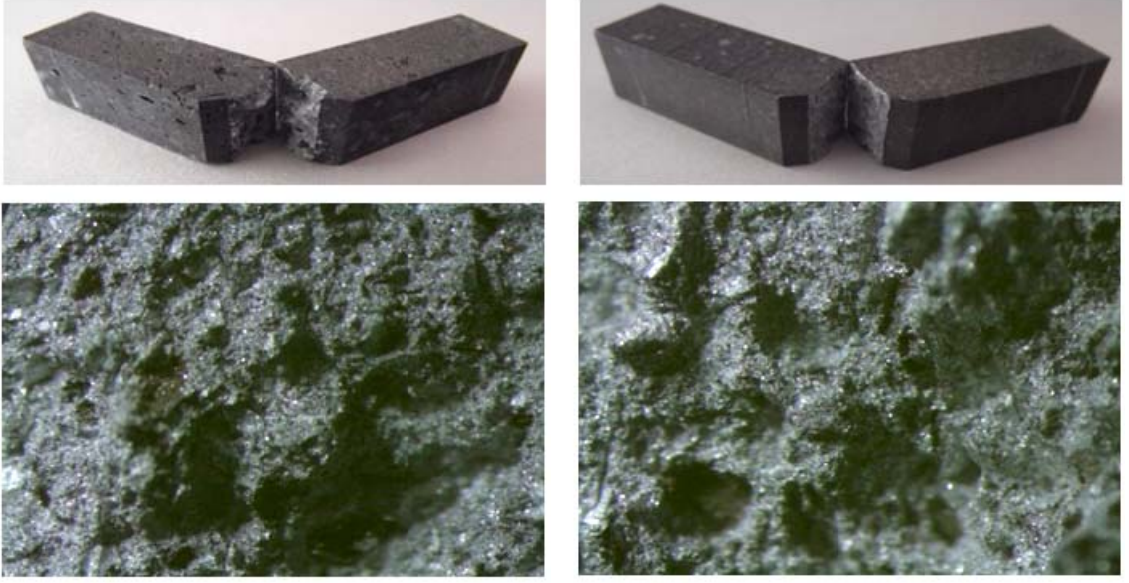
C1) %10 SiCp

C2) %10 SiCp + %20 ŞD



D1) %15 SiCp

D2) %15 SiCp + %20 ŞD



E1) %20 SiCp

E2) %20 SiCp + %20 ŞD

Şekil 7.3 Farklı takviye oranlarındaki kompozit numunelerin darbe sonrasındaki kırılma yüzeylerinin görünümü

## 8. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

1. AlMg3 alüminyum alaşımı SiCp parçacıkları ile takviye edilerek meydana getirilen kompozit malzemelerin çentik darbe deneyinde darbe sonucu kırılması için gerekli darbe enerjisi takviye oranı arttıkça düşmektedir.
2. Soğuk şekil verme işlemi AlMg3/SiCp kompozit malzemelerin çekme dayanımı, akma dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerini arttırdığı halde çentik darbe dayanımını düşürmektedir.
3. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde darbe yükleri karşısında kırılmanın sünek ya da gevrek olması matris malzemesinin sünek ya da gevrek olmasına ve aynı zamanda takviye oranına bağlıdır. Alüminyum matris içindeki takviye hacim oranı arttıkça malzemenin süneklik özelliği azalır, daha gevrekleşir. Gevrek SiC takviye parçacıklarının yapıya ilavesinin kompozitleri gevrekleştirdiği ve darbe dayanımlarının düşmesinde etkin rol oynadığı görülmektedir.
4. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde darbe yükleri karşısında darbe dayanımının yüksek olması üretim yöntemi ile yakından alakalıdır. Takviyenin matris malzemesi tarafından iyi ıslatıldığı ve arayüzde istenmeyen kırılma fazların oluşumunun azaltıldığı yarı katı üretim yöntemlerinde darbe dayanım değerleri yükselmektedir.
5. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde dayanım artışı parçacık ile matris arasındaki ara yüzey bağlarının güçlü olması ile yakından alakalıdır. Dayanım temel olarak yükün matristen takviye ara yüzey yoluyla etkin biçimde iletilmesiyle oluşmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda AlMg3 alaşımı farklı takviye malzemeleri ile takviye edilerek darbe davranışları incelenebilir. Düşük takviye oranlarında, düzgün olmayan takviye dağılımından dolayı, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde düşüşler meydana gelmektedir. Yüksek takviye oranlarında da porozite probleminden dolayı



mekanik özelliklerde düşüşler meydana gelmektedir. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için optimum takviye oranları belirlenmeli ve takviyenin matris içinde düzgün dağılımını sağlayacak arayüzeyde kırılma fazların oluşumunu azaltacak üretim yöntemleri seçilmelidir. Yarı katı halde karıştırma ve sıkıştırma döküm yöntemi ile kompozit malzemelerde daha az gözenek ve daha yüksek dayanım sağlanabilir.

Daha önceki çalışmalarda haddeleme işlemi ile mekanik özelliklerin iyileştirildiği belirtilmiştir. (Harrigan vd., 1995; Morelli vd., 2001) Bu çalışmada da; haddeleme işlemi ile kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. Bu sebeple, kompozit malzeme üretiminden sonra, kompozitin mekanik özelliklerini arttırmak için, ikincil işlem olarak haddeleme işleminin uygulanabileceğini söylemek mümkündür. Ancak malzeme sertliği arttığından dolayı çentik darbe dayanımı düşmektedir. Takviye oranı arttıkça %10, %15 ve %20' de darbe dayanımının düştüğü, malzemelerin gittikçe gevrekleştiği anlaşılmaktadır. Haddeleme işlemi darbe enerjisini düşürmüştür.

## KAYNAKLAR

- Aboudi, J., 1991, "Mechanics of Composite Materials; A Unified Micromechanical Approach", Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam
- Ankem, S., Margolin, H., 1986, "Modeling Deformation in Two Phase Alloys", J. Met., Vol. 38, pp. 25-29
- Aradhya, K.S. and Surappa, K., 1991, "Estimation of Mechanical Properties of 6061 Al-SiC Composites Using FEM", Scr. Metall., Vol. 25, pp. 817-822
- Aran, A., 1997, "Metal Matrisli Kompozit Malzemeler Alanında Yeni Gelişmeler", İ.T.Ü. Makine Fakültesi 1. Makine Mühendisliği Kongresi, 368-372
- ASTM E23-93a, 1993, "Standart Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, 1993 Annual Book of ASTM Standards", 206-226
- Ay, İ., 2009 Kırılma Mekaniği Ders Notları 7-19
- Burzic, M., Sedmak, S., Burzic, Z., Jakovic, D., Momcilovic, D., 2002, "The Effect of Reinforcement content on Impact Toughness of Cast Al-SiCp Metal Matrix Composite, Integritet i vek konstrukcija, vol. 2, iss. 1-2, pp. 11-14
- Ceyhun, V., Turan, M., 2003, "Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı, Mühendis ve Makine Dergisi", 516
- Chawla, K. K., 1998, "Composite Materials Science and Engineering" USA
- Chawla, N, and Shen, Y.-L., 2001, "Mechanical Behaviour of Particle Reinforced Metal Matrix Composites, Advanced Engineering Materials" 3(6), 357-370
- Dieter, G., 1988, "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill, London
- Ekici, R., 2004, "Alüminyum Esaslı SiC Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi", Kayseri
- Eren Y., 2007, "Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi", Kütahya
- Flom, Y. And Arsenault, R. J., 1989 "Effect of Particle Size on Fracture Toughness of SiC/Al Composite Material, Acta Metallurgica", 37, (9) 2413
- Friend, C.M., 1989, "Toughness in Metal Matrix Composites, Materials Science and Technology", 5, 1-7
- Haoran, C., and Qingsheng, Y., 1993, "A Micromechanical Analysis of Plastic Deformation for Short Fiber Reinforced Metal Matrix Composites" ICCM9, Spain

Hasson, D. F., Hoover, S. M., Crowe, C. R., 1985, "Effect of Thermal Treatment on the Mechanical and Toughness Properties of Extruded  $SiC_w$ /Aluminium 6061 Metal Matrix Composites", Journal of Materials Science, 20,4147-4154

Huda, D., El Baradie M.A. and Hashmi, M.S.J., 1993, "Metal Matrix Composites: Materials Aspects, Part II", Journal of Materials Processing Technology, 37: 529-541

Ilgaz, M. U., 1997, "Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilen Seramik Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri", İstanbul

Kayalı, E. S., Ensari, C., Dikeç, F., 1983, "Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Yayını, İstanbul"

Klimowicz, T. F. and Vecchio, K. S., 1990, The influence of the aging condition on the fracture toughness of alumina reinforced aluminium composites, Fundamental Relationships Between Microstructure and Mechanical Properties of Metal Matrix Composites, Metallurgical Society of AIME, 255-267

Kök, M., 2000, "Metal Matrisli ( $Al_2O_3$  Takviyeli) Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Seramik Takımlarla İşlenebilirliğinin Araştırılması", Elazığ

Kurşuncu, B., 1999, "SiC Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi", İstanbul

Lloyd, D.J., 1994, "Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites" International Materials Review", Vol 39, No 1, pp. 1-22

Manoharan, M, and Lewandowski, J. J., 1992, Effect of Reinforcement Size and Matrix Microstructure on the Fracture Properties of An Aluminum Metal Matrix Composite, Materials Science and Engineering A, 15A 139-146

Mutlu, İ., 1996, "Alüminyum Matrisli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi", Kütahya

Natibo, 1993, "Metal Matrix Composites- Sector Study", The North American Defense Industrial Base Organization

Özben, T., 2001, "Sıkıştırma Döküm Yöntemiyle Üretilen Seramik Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri", İstanbul

Özdin, K., 2006, "Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitlerin Üretimi ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması", Ankara

Öztürk, M., 2007, "SiC İlaveli Alumina Seramik Kompozitler", Sakarya

Poehch, M.H. and Fischmeister, H.F., 1992, "Deformation of Two Phase Materials: A Model Based on Strain Compatibility", Acta. Metall. Mater., Vol. 40, pp. 487-494

Ray, S., 1993, "Review Synthesis of Cast Metal Matrix Particulate Composites" Material Science and Engineering, 28, pp. 5397-5413

Smith, F.W., Çeviri: Erdoğan M., 2001, "Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri Demir Dışı Alaşımalar" Cilt 2, Nobel Kitabevi, Ankara

Şevik, H., 2004, "Alümina Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Kompozitlerin Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi", Sakarya

Ürkmez, N., 2004, "AlMg<sub>3</sub>/SiC<sub>p</sub> Kompozitlerinin Üretimi ve Mekanik Özelliklerindeki Değişimlerin İncelenmesi", İstanbul

Yıldızlı, K., Nair, F., Karamış, M. B., Cerit, A. A., 2003, "Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Erozyon Davranışının İncelenmesi" Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 517-524, 10-12

Yılmaz, M., 1991, "The Microstructure and Mechanical Properties of a Particulate SiC Reinforced Aluminum Matrix Composite", İstanbul

Yılmaz, Ş., 1995, "Al-SiC Metal Matrisli Karma Malzemelerin Deformasyon Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Parametrik Analizi", İstanbul

## ÖZGEÇMİŞ

**Doğum tarihi** : 13.10.1983

**Doğum yeri** : İstanbul

**Lisans** : 2002-2007 Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi  
Makina Mühendisliği Bölümü

**Yüksek Lisans** : 2007-2011 Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

**2008**

SMART MÜHENDİSLİK

*Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Kanalları*

**İmalat ve Proje Sorumlusu**

**2009**

1'İNCİ MOT. P. TUG. K.LİĞİ

*Sakarya Kışlası, Muhabere Birliği*

**Kısa Dönem Er**

**2010**

EK-İŞ İNŞ. SAN. TİC. A.Ş.

*Afyon Şehri Dinar, Bolvadin, Çay Doğalgaz Dağıtım Projesi 3. Etap İnşaatı (AKSA)*

**Şantiye Şefi**

AL-ÖZ MÜHENDİSLİK NAKLİYAT İNŞAAT SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.

*Konya Şehir İçi Doğalgaz Dağıtım Projesi Yapımı (ENERGAZ)*

**Saha Mühendisi**

**2011**

BELKA HAFRİYAT NAKLİYAT İNŞAAT OTOMOTİV PETROL EMLAK GIDA SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.

*Afyon Şehri Doğalgaz Dağıtım Projesi 4. Etap İnşaatı (AKSA)*

**Şantiye Şefi**

EK-İŞ İNŞ. SAN. TİC. A.Ş.

*6. Etap Edirne Çelik, Polietilen, Servis Hatları Doğalgaz Dağıtım Hatları Yapım İşi (GAZDAŞ)*

**Saha Mühendisi**