T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

# ÇELİK TEL TAKVİYELİ ZAMAK 5 ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**FÜSUN SAHAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**
**KONYA, 2007**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK TEL TAKVİYELİ ZAMAK 5 ALAŞIMININ
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Füsun SAHAR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ARIKAN

2007, 79 sayfa

Jüri: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ARIKAN

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Bu tezde, sürekli çelik tel takviyeli Zamak 5 alaşımının mekanik özellikleri araştırıldı. Galvaniz kaplı sürekli çelik tel ile Zn-Al alaşımlarından Zamak 5 basınçlı döküm tekniği ile birleştirilerek kompozit kiriş numuneler üretildi. Hacimce %1, %2 ve %3 oranlarında sürekli çelik tel takviyesi kullanıldı. Takviyesiz ve takviyeli tüm numunelere ASTM E–399 standardına göre üç noktadan eğme testi, TSE 206 standardına uygun basma testi ve TSE 138 standardına göre çekme testi uygulandı. Numunelerin eğilme elastisite modülleri, eğilme, basma ve çekme dayanımları tespit edildi. Ayrıca, çentikli numunelere de üç noktadan eğme testi uygulanarak numunelerin kritik gerilme şiddet faktörleri hesaplandı. Takviye oranlarının malzemenin mekanik özelliklerine etkisi incelendi.

**Anahtar Kelimeler:** Metal matrisli kompozitler, Zn-Al alaşımları, çelik tel, basınçlı döküm, üç noktadan eğme testi.

ABSTRACT

MS Thesis

# INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL WIRE REINFORCED ZAMAC 5 ALLOY

Füsun SAHAR

Selçuk University Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2007, 79 page

Jury: Asst. Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

In this thesis, mechanical properties of continuous steel wire reinforced Zamac 5 alloy have been investigated. Metal matrix composites that formed by combining galvanized steel wires and Zamac-5 with squeezing casting technique, has been produced as beam samples. Steel wire contents were used 1%, 2% and 3% of the total volume of the composite system. Three point bending (TPB), compression and tensile tests according to ASTM E-399, TSE 206 and TSE 138 respectively were applied to unreinforced and reinforced samples. The flexural strength, flexural modulus, compression ad tensile strength were determined. Besides, the notched samples were carried out TPB tests The critical stress intensity factors of the specimens were calculated. Effects of reinforced materials on the mechanical properties were examined.

**Keywords:** Metal matrix composites, Zn-Al Alloys, steel wire, squeezing casting and three point bending (TPB).

# TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ARIKAN'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında ve deneylerin yapımında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof Dr.Ahmet AVCI ve Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e, döküm kalıbının hazırlanmasında ve numunelerin üretiminde işyeri imkanlarını kullanmamızı sağlayan ALTUN DÖKÜM A.Ş. adına Mehmet ALTUN'a ve numune üretiminde elinden gelen her türlü yardımı yapan eşim Semih SAHAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan aileme teşekkür ederim.

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

$E_1$ : Fiber doğrultusundaki elastisite modülü

$E_2$ : Fiberlere dik yönde elastisite modülü

G : Kayma modülü

$E_e$ : Eğilme elastisite modülü

$\sigma_e$ : Eğilme Dayanımı

GŞF : Gerilme şiddet faktörü

LEKM : Lineer elastik kırılma mekaniği

$\delta$ : Deplasman

$K_{IC}$ : Mod I'e göre kritik gerilme şiddet faktörü

$\sigma$ : Nominal Gerilme

$\nu$ : Poisson oranı

a : Çentik derinlği

W : Malzeme genişliği

a / W : Çentik oranı

P : Yük

B : Malzemenin kalınlığı

S : Mesnetler arası mesafe

# İÇİNDEKİLER


ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR iv
İÇİNDEKİLER v
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
3. KOMPOZİT MALZEMELER 7
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı 7
3.2. Kompozit Teknolojisinin Gelişimi 8
3.3. Kompozit Türleri Ve Sınıflandırılması 9
9 3.3.1. Yapı Bileşenlerinin Şekillerine Göre Kompozitler 9
3.3.1.1. Partikül Esaslı Kompozitler 9
3.3.1.2. Lamel Esaslı Kompozitler 10
3.3.1.3. Fiber Esaslı Kompozitler 10
3.3.1.4. Dolgu Kompozitler 11
3.3.1.5. Tabaka Yapılı Kompozitler 11
3.3.2. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler 11
3.3.2.1. Plastik-Plastik Kompozitler 11
3.3.2.2. Plastik-Metal Kompozitler 12
3.3.2.3. Plastik-Cam Elyaflı Kompozitler 12
3.3.2.4. Plastik-Köpük Kompozitler 12
3.3.2.5. Metal Matrisli Kompozitler 13
3.3.2.6. Seramik Kompozitler 13
4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER 14
4.1. Giriş 14
4.2. Metal Matrisli Kompozitlerde Takviye Elemanları 16
4.3. Matris Malzemeleri ve Önemli Kompozitler 17
4.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri 17
4.4.1. Difüzyonla Bağlama 18

4.4.2. Toz Metalurjisi 18
4.4.3. Sıvı-Metal İnfiltrasyonu 20
4.4.4. Püskürtme 21
4.4.5. Karıştırmalı Döküm 22
4.4.6. Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD) 23
4.4.7. Kompo Döküm 24
4.4.8. Basınçlı Döküm 24
4.4.9. Reaktif (In-situ) Yöntemi 25
5. BASINÇLI DÖKÜM 26
5.1. Tanımı 26
5.2. İşlem Sırası 27
5.3. Basınçlı Dökümün Sınıflandırılması 27
5.4. Basınçlı Dökümün Üstünlükleri ve Sakıncaları 29
5.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretiminde Basınçlı Dökümün Önemi 30
6. Zn-Al ALAŞIMLARI 32
6.1. Zn-Al Alaşımlarının Gelişimi 32
6.2. Zn-Al Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri 34
6.2.1. Zn-Al İkili Denge Diyagramı 34
6.3. Zn-Al Alaşımlarının Katılaşması ve Mikro Yapıları 35
6.3.1. Zn-Al Alaşımlarının Mikro Yapısı 36
6.4. Zn-Al Alaşımlarının Özellikleri 36
6.4.1. Zn-Al Alaşımlarının Kimyasal Özellikleri 36
6.4.2. Zn-Al Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri 37
6.4.3. Zn-Al Alaşımlarının Mekanik Özellikleri 37
6.5. Zn-Al Alaşımlarının Kullanıldığı Yerler 38
6.6. Zn-Al Alaşımlarının Kullanım Avantajları 38
6.7. Zn-Al Esaslı Metal Matrisli Kompozitler 39
7. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİĞİ 41
7.1. Elastiklik Yaklaşımları 41
7.1.1. $E_1$'in Belirlenmesi 41
7.1.2. $E_2$'nin Bulunması 44
7.1.3. $\nu_{12}$'nin Bulunması 47

7.1.4. $G_{12}$'nin Belirlenmesi 49
7.1.5. Eğilme Elastisite Modülü ($E_e$) ve Eğilme Dayanımı ($\sigma_e$) 51
7.2. Kırılma Mekaniği 52
7.2.1. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği 53
7.2.2. Başlangıç Çentik Derinliği Metodu 54
8. DENEYSEL ÇALIŞMA 57
8.1. Malzemelerin Tanıtımı 57
8.2. Deney Numunelerinin Hazırlanışı 59
8.2.1. Üç Noktadan Eğme Deneyi Numuneleri 61
8.2.2. Basma Deneyi Numuneleri 61
8.2.3. Çekme Deneyi Numuneleri 61
8.2.4. Çentikli Üç Noktadan Eğme Deney Numuneleri 62
8.3 Deney Cihazının Tanıtımı ve Deneyin Yapılışı 62
9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 65
9.1. Takviye Oranı ile Eğilme Dayanımı ve Eğilme Elastisite Modülü Değişimi 65
9.2. Takviye Oranı ile Eğilme Kuvvet-Deplasman Eğrilerinin Değişimi 66
9.3. Takviye Sayısı ile Basma Dayanımının Değişimi 67
9.4. Takviye Sayısına Göre $E_1$, $E_2$ ve $\nu_{12}$'nin Bulunması 69
9.5. Kritik Gerilme Şiddet Faktörlerinin Bulunması 72
9.5.1. Başlangıç Çentik Derinliği Metodu 72
9.6. Çelik Tel Takviyeli Zamak–5 Alaşımının Mekanik Özellikleri 73
10. SONUÇ VE ÖNERİLER 74
11. KAYNAKLAR 76

# 1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, insanların ihtiyaçları teknolojinin gelişimi ile paralel olarak artmakta ve hatta teknolojik gelişmelere zemin hazırlamaktadır. Bu ihtiyaçlardan biri de sanayiinin temel girdisi olan malzeme üretimidir. Malzeme bilimindeki gelişme hızla devam etmektedir. Ancak yeryüzünde sınırlı sayıda bulunan ana malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri nedeniyle teknolojinin gelişmesine ayak uyduramayıp, zaman zaman yeterli olmadığı dönemler olmuştur. Uzay araçlarının yapımına geçildiği asrımızda, çağın yenilikleri ve bilimin gelişmesi paralelinde günün ihtiyaçlarını karşılayabilecek, mevcut malzemelere göre gerek ekonomik, gerekse teknik yönden daha uygun malzemeler üretme yoluna gidilmiştir. Dolayısıyla hem ekonomik, hem daha mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin üretilmesi için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Böylece değişik özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmeleri suretiyle elde edilen kompozit malzemeler büyük önem kazanmıştır.

Kompozit malzemeler, kendilerini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini gösterecek tarzda, genellikle matris adı verilen ana faz ile takviyelendirici tali fazlardan oluşurlar. Fazla ağırlık istenmeyen, ancak yüksek mukavemet gerektiren yerlerde çelik ve benzeri metallerin yerlerini alırlar.

Son zamanlarda çinko endüstrisindeki en önemli gelişme Zn-Al alaşımları yani zamak olarak bilinen ve yüksek Zn içerikli yeni bir seri alaşım geliştirilmesi olmuştur. Zamak; çinko, alüminyum, bakır ve magnezyumdan meydana gelen temel alaşımların adı olarak kullanılır. Çok yönlü bir malzeme olarak, parça dökümündeki üretim kolaylığı ile maliyetleri de düşürmektedir. Zamak malzemenin, yüksek aşınma mukavemeti ve basınçlı döküm kalıbında çok karmaşık parçaların imalinde, hiç talaşlı işleme gerek kalmaksızın kalıplanabilme gibi özellikleri de bulunmaktadır. Günümüzde bu alaşımlar iyi dökülebilirlikleri, yüksek mukavemet ve iyi aşınma özellikleri ile birçok alanda Al, Pirinç, Bronz ve bazı dökme demir gibi konvensiyonel alaşımların uygulama alanlarında rakip malzeme olmaktadır.

Zn alaşımlarının mekanik özellikleri pek çok uygulama için yetersiz kalmaktadır. Alaşım elementi olarak katılan Al bu alaşımların mekanik özelliklerinden başka, döküm özelliklerini de önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yapılan araştırmalar; Cu, Mg, Mn, Si gibi alaşım elementi katkılarının Zn-Al alaşımlarını mukavemetini arttırdığını göstermektedir.

Üretim kolaylığından dolayı zamak malzemenin sektördeki kullanım yerlerinin artması, farklı ürünler için yeni hammadde alternatifi olarak kullanılabilmesi sektörel olarak üretim maliyetlerini ucuzlatacak ve malzemenin pazar payını arttıracaktır.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan günümüzde en yaygın kullanıma sahip olan alaşımlar ZA–3 ve ZA–5 alaşımlarıdır. Bu malzemeler endüstride birçok yerde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi başta olmak üzere, ev eşyaları endüstrisi, hırdavat, büro makineleri, elektronik cihazlarda, askeri malzemelerde, otomobil radyatörleri, radyo ızgaraları, karbüratör, yakıt pompası v.b. parça imalinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, sürekli çelik tel takviyeli ZA-5 alaşımının üç noktadan eğme, basma ve çekme testi yapılarak, mekanik özellikleri ve kırılma davranışları araştırılmış ve takviyesiz malzemeye göre üstünlükleri incelenmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Diwecha, A.P. ve ark. (1981), metal matrisli kompozit malzemeleri, takviyesiz matris malzemelerle karşılaştırdıklarında, mukavemet ve toklukta izotropik özelliklerinde önemli iyileşmeler olduğunu görmüşlerdir.

Blucher, J.T. ve ark. (2001), yeni bir sürekli üretim metodu olan sürekli elyaf takviyeli metal matrisli kompozitler üzerinde çalışmışlardır. Matris malzemesi olarak Al, 2024Al ve 6061Al , elyaf malzemesi olarak da $Al_2O_3$, Si-Ti karpit, Si ve C kullanmışlardır. Metal matris kompozit tellerin üretiminde, çalışma yöntemlerini ve mekanik/malzeme özelliklerini anlatmışlardır. Hacimce değişik oranlarda ve değişik çaplardaki elyaf demetlerinin, çeşitli matrislerle değişik kombinasyonlarda ve yüksek hızlarda üretimini sağlamışlardır.

Prasad, B.K. ve ark. (1996), yaptıkları çalışmada, metal matrisli kompozitler, takviyesiz alaşımlarla karşılaştırıldığında yüksek elastisite modülü, çekme mukavemeti, yüksek sıcaklık stabilitesi, yorulma ve aşınma direnci gibi bazı üstün mekanik özelliklerinden dolayı kritik yapısal uygulamalara aday olduğunu görmüşlerdir.

Chou, T.W. ve ark. (1986), fiber takviyeli metal matris kompozitlerin üretim yöntemleri, işleme teknikleri ve ara yüzeyleri üzerinde çalışmışlardır.

Sun, S. ve ark. (2001), çalışmalarında matris malzemesi olarak düşük karbonlu çelik, takviye malzemesi olarak da martenzitik, beynitik ve perlitikteller kullanarak bunları sıcak ve soğuk haddeleme yöntemiyle birleştirerek metal matrisli kompoziler üretmişlerdir. Yüksek mukavemet ve uygun süneklik gibi iyi sonuçları, beynitik tel takviyeli kompozitlerden elde etmişlerdir. Martenzitik tellerde mikro çatlaklar bulunması nedeniyle kompozite zayıf mukavemet ve süneklik özellikleri verdiğini tespit etmişlerdir.

Arıkan, H. ve ark. (2003), gri dökme demir malzemenin mukavemet ve tokluğunu arttırmak için, düşük karbonlu çelik telle takviye etmişlerdir. Çalışmalarında, tel çapı ve diziliminin, döküm ve ısıl işlem koşullarının mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkilerini araştırmışlardır. 800ºC ve 850ºC'de normalizasyon ısıl işlemi uygulamışlar ve daha sonra numunelere üç noktadan eğme testi yaparak mukavemet ve tokluktaki değişiklikleri karşılaştırmışlardır.

Sonuçta hacimce %5 oranında çelik tel takviyesi ve normalizasyon ısıl işlemi ile eğilme mukavemeti ve kırılma tokluklarında yüksek oranda artış sağlamışlardır.

Hemant, Joel (2001), cam parçacık takviyeli kokil döküm alüminyum alaşımlı kompozit malzemeyi, işleme, mekanik özellikleri, mukavemet ve kırılma tokluğu açısından incelemiştir.

Arıkan, H. (2002), çelik fiber takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışlarını incelemiştir. Çelik fiber, kum ve reçinenin birleştirilmesi ile oluşturulan polimer kompozit kiriş numuneler üretilmiş ve bunlara bağlı olarak eğilme modülü, eğilme dayanımı, kritik gerilme şiddet faktörlerini tespit etmiştir. Kritik gerilme şiddet faktörü, başlangıç çentik derinliği, J-integral ve kompliyans metotları gibi birkaç metot kullanılarak hesaplamıştır.

Taylor, Lydon ve ark. (1997), tarafından çelik fiber takviyeli çimento esaslı betonun kırılma tokluğu araştırılmış ve değişik fiber oranları için betonun kırılma toklukları bulunmuş ve fiber takviyesinin kırılma davranışına etkileri incelenmiştir.

Avcı, A. ve ark. (2003), çalışmalarında çelik tel takviyeli polimer matrisli kompozit malzemenin kırılma davranışlarını araştırmışlardır. Ağırlıkça farklı çelik tel oranlarındaki numunelere farklı oranlarda çentikler açıp, üç noktadan eğme deneyine tabi tutmuşlar ve Mod I'e göre kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Aynı zamanda kritik gerilme şiddet faktörleri, başlangıç çentik derinliği, kompliyans ve J-integral metotlarını kullanarak hesaplamalar yapıp, elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yin, J. ve ark. (2003), beton matrisin içerisine kısa çelik elyaflar karıştırarak mukavemetini geliştirmeye çalışmışlar, bunun için bir dizi deneyler yapmışlardır. Hacimce değişik oranlarda kısa çelik elyaf ile takviyelendirilen beton kirişlere üç noktadan eğme deneyleri uygulamışlardır. Sonuç olarak kısa çelik elyaflar karıştırarak hem çatlağın yayılmasını kontrol etmişler, hem de betonun tokluğunu arttırmışlardır.

Sayman, O. ve ark. (2002), eğilme momentine maruz bırakılmış çelik fiber takviyeli alüminyum matrisi kompozitlerde elastik-plastik gerilme dağılımını analitik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada kompozit malzemenin şekil değiştirme sertleşme parametresini n=0.625 olarak bulmuşlardır.

Xia, X. ve ark. (2002), $Al_2O_3$ ile takviye edilmiş Al (2xxx veya 6xxx) kompozitlerde hacimsel oranın kırılma tokluğu üzerine etkisini üç noktadan eğme deney numunesi kullanarak incelemiştir. Yük-deplasman eğrisini kullanarak çatlak açılma kuvvetlerini ve enerji yutma seviyelerini belirlemiştir. 6xxx serisi kompozitlerde çatlak açılma kuvvetini 1180 N ve enerjisini 250 KJ olarak bulmuştur. Bu değerler V=0.1 hacimsel oranında elde edilmiştir. Hacimsel oran iki katına çıkarıldığında değerler sırası ile %8 ve %53 artmıştır. Görülmüştür ki hacimsel oranın değişiminin çatlak açılma yükü üzerine büyük bir etkisi yoktur.

Chiang, C.R. (2000), fiber takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunun tahmininde kullanılmak üzere bir metot geliştirmiştir. Malzemenin kırılma direncinin fiber sıyrılma uzunluğu ile ilişkilendirmiştir. Yaptığı analizler soncunda önce matrs fiber ayrılması sonra fiber sıyrılmasının gerçekleştiğini kabul ederek fiber sıyrılma prosesinin çatlak büyüme direncine büyük etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Fakat fiber ile matris ayrılmasının ve fiber sıyrılma prosesinin arayüzey dayanımı yüksek kompozitlerde ve yüksek hızlı yükleme durumlarında ortadan kalkacağını belirtmiştir.

Potti, P.K.G. ve ark. (2000), üç farklı sürekli fiber takviyeli kompozit malzemede ortalama gerilme kriteri olarak bilinen Whitney-Nuismer kırılma modelini analitik olarak incelemiştir. Bu modelde karakteristik numune boyutları ve eşit çentik uzunlukları kullanılmıştır.

Smith, W. (1993), yaptığı çalışmada, çinko alaşımların, metal mariksli kompozitlerde dökme demir ve alüminyum alaşımlarına göre matriks malzemeleri için uygun olduğunu savunmuştur. Bu alaşımlar iyi yataklama ve aşınma özelliklerine sahiptir.

Çay, Fatih (2003), döküm ve kokil kalıba döküm yöntemiyle üretilen ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarının yüksek sıcaklıkta çekme ve akma dayanımı, yorulma dayanımı sertlik ve metalografi gibi özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak basınçlı döküm yöntemiyle üretilen ZA alaşımlarının mekanik özellikler açısından, kokil döküm ile üretilen ZA alaşımlarından daha iyi sonuçlar verdiği ve bu alaşımların basınçlı döküm yöntemiyle üretilmesinin avantajlı olacağı bulunmuştur.

Seah, K.H.W. ve ark. (1996), grafit takviyeli ZA-27 alaşımı ile ilgili çalışmalar yapmış ve parçacıklı grafit takviyesinin sünekliğe, maksimum çekme mukavemetine, basma mukavemetine, sertliğe ve elastisite modülüne etkisi araştırılmış, takviye malzemesinin çekme mukavemetini, basma mukavemetini ve elastisite modülünü arttırırken, sertlikte ise önemli ölçüde düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Bu sertlikteki düşüş yazarlara göre takviye malzemesi olan grafitin yumuşaklığından kaynaklanmaktadır.

Kurnaz, S.Can (2003), Zn-Al alaşımlarının mukavemet/kütle oranını arttırmanın en iyi yollarından birisinin düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve ucuz fiberler kullanarak yeni bir kompozit yapmak olduğunu düşünmüştür. Bu amaç için mevcut çalışmada kullandığı ZA-12 alaşımını saffil alümina fiber 0.10, 0.15, 0.20 ve 0.30 hacim oranlarında takviyelendirmiştir. Kompozitler ve takviyesiz alaşımlar infiltrasyon tekniği kullanılarak üretilmiş ve mekanik davranış, sertlik, aşınma v.b. özellikler araştırılmıştır .

Tao, L. ve ark. (1998), ZA-8 alaşımını sinterlenmiş düşük karbonlu çelik teller ile takviyelendirerek kompozit malzeme üretmişlerdir. Numunelere sürünme testi ve çekme testi yapılmış, takviye malzemesi olan çelik teller sinterlendiği için sinterleme zamanı ve sinterleme sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak deney sonuçları incelenmiştir. Takviye tellerinin sinterleme sıcaklığı ve zamanının arttırılmasıyla kompozit malzemenin sürünme mukavemeti artmış olduğu görülmüştür.

Sharma, S.C. ve ark. (1999), Zircon takviyeli ZA-27 kompozitlerin mekanik ve kırılma özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmada zircon parçacıklarının miktarlarının kompozit malzemenin kırılma davranışı ve mekanik özeliklerine etkisi ele alınmıştır. ZA-27 alaşımı içerisine ağırlıkça %1, 3, 5 oranlarında zircon parçacıkları takviye edilmiştir. Zircon parçacıklarının varlığı kompozitin kırılma davranışları üzerine büyük değişiklik yapmıştır. Takviye sayesinde maksimum çekme mukavemeti, akma mukavemeti, sertlik ve elastisite modülünde artış gözlenmiş, ancak süneklik ve darbe mukavemeti zircon takviye miktarlarının artışıyla azalmıştır. Çatlak ilerlemesi de maksimum yükte aniden kırılma ile sonuçlanmıştır.

# 3. KOMPOZİT MALZEMELER

## 3.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit terimi, tek başına pek bir anlam ifade etmez. Yeterli derecede detaylı incelendiğinde, tüm malzemelerin farklı malzemelerden oluştuğu görülür. Ancak, modern malzeme mühendisliğinde bu terim genellikle, bir takviye malzemesiyle takviye edilmiş matris (ana yapı) malzemesine karşılık kullanılmaktadır. Buradan hareketle, kompozit malzemeler, en geniş anlamıyla, iki veya daha fazla malzemenin, kendilerinden daha iyi özelliklere sahip olacak yeni bir malzeme oluşturmak amacıyla birleştirilerek üretilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Kompozit malzeme, fiziksel olarak birbirinden farklı ve mekanik olarak birbirinden ayrılabilen iki veya daha fazla bileşenden meydana gelir. Birbirinden farklı bu iki bileşen matriks malzeme ve matriks içinde dağıtılmış olan takviye malzemesidir. Bu bileşenler birbiri içinde çözünmezler. Birleşme genellikle fizikseldir. Yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip elyafla, kimyasal dirençli plastik matriks malzemeden üretilen kompozitin mukavemet ve rijitliği elyafa, kimyasal direnci ise plastiğe yakın olur.

Kompozit sistemlerin özelliklerini belirleme sorunu, Maxwell ve Einstein gibi büyük bilim insanlarının da ilgisini çekmiş, bilimde ve mühendislikte klasik hale gelmiş bir sorundur (Torquato 2000). Bu ilgi, geleneksel malzemelerin sunduğu özelliklerle yetinmeyecek noktaya ulaşan teknolojinin yeni talepleriyle birleşince, modern kompozitler üzerine 20. Yüzyıl'ın ilk yarısında başlayan çalışmalar, bugüne değin artarak devam etmiştir ve günümüzde de, teknolojinin yeni taleplerini karşılamak amacıyla büyük bir hızla devam etmektedir.

Kompozit malzemelerin özellikleri, içerisindeki katkı maddeleri aracılığı ile geliştirilirler. Bu özellikler şunlardır;

-Mukavemet

-Rijitlik

-Korozyon direnci

-Yırtılma direnci

-Estetik

-Hafiflik

-Termal izolasyon

-Akustik izolasyon

Bütün bu olumlu özelliklerin dışında kompozit malzemelerin uygun olmayan yanları da şu şekilde sıralanabilir:

-Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

-Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.

-Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.

-Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Kompozit malzemelerde yukarıda sayılan olumlu özelliklerin hepsi aynı anda iyileşmez ve zaten buna gerek de yoktur. Ancak; hangi özelliklerin iyileştirilmesi isteniyorsa kompozit malzeme o sahaya uygun şekilde imal edilir. Bileşenlerinin özellikleri bilinen bir kompozit malzemenin bazı özellikleri hesaplanarak bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb.). Bazı özellikleri için ise hesaplama tamamen mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.). Kompozit malzemeler, mukavemet, katılık ve hafiflikleri nedeniyle ağır metallerin yerini almaktadır. Bugün, uçaklar, uzay araçları, denizaltı araçları ve malzeme özellikleri kritik olan bir çok makine elemanı kompozit malzemelerden üretilmektedir.

## 3.2 Kompozit Teknolojisinin Gelişimi

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindendir. Bugün taş, kum, kireç, demir, ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Kompozit malzemeye en güncel örneklerden biri de kağıttır. Selüloz ve reçineden oluşan kağıt, günümüzde yaşamımızın her alanında eşsiz bir kullanım aracı olarak insanlığın hizmetine sunulmuştur. Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok geniş boyutlara

ulaşmıştır. Kompozit malzemeler, üreticinin çok sayıda standart ürünü kısa zamanda imal edebilmesi, montajdan tasarruf ve ucuz maliyet imkanları, kullanıcıya da yüksek izolasyon kapasitesi, hafiflik ve yüksek mekanik dayanım avantajlarından dolayı şehircilikte, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlarından dolayı ev aletlerinde, başta elektriksel izolasyon olmak üzere her tür elektrik ve elektronik malzemenin yapımında, daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlaması sebebiyle havacılık sanayinde, otomotiv sanayinde, iş makinelerinde, tasarımın esnek ve kolay olması, nakliye ve montajda büyük avantajlar sağlaması, izolasyon probleminin çözülmesi ve bakım giderlerinin azalması sebebiyle inşaat sektöründe ve tarım sektöründe geniş kullanım alanına sahiptir.

## 3.3 Kompozit Türleri ve Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşenlerinin

şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Yapı bileşenlerinin şekillerine göre partikül esaslı kompozitler, lamel esaslı, fiber esaslı kompozitler, dolgulu (kafes) kompozitler, tabaka yapılı kompozitler v.b bir gruplandırma yapılabildiği gibi, matris malzemesinin türüne göre de plastik kompozitler, metalik kompozitler, seramik kompozitler şeklinde sınıflandırılır.

### 3.3.1 Yapı Bileşenlerinin Şekillerine Göre Kompozitler

#### 3.3.1.1 Partikül Esaslı Kompozitler

Rijitlik ve mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesi ile şekillendirilirler. Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri fiber ve pul kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rastgele dağılması ve

bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyidir.

#### 3.3.1.2 Lamel Esaslı Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk /çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.

#### 3.3.1.3 Fiber Esaslı Kompozitler

Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedirler. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten elli kat, rijitliği ise 3 kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesi ile fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzdeki düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır. Fiberler, yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler. Fiber matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler; fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber-matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi nadiren dikdörtgen, hekzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet v.s) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlenme göstermelerine karşılık, süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir.

### 3.3.1.4 Dolgu Kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile

doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir.

### 3.3.1.5 Tabaka Yapılı Kompozitler

Farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak malzemelerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönlenmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmuştur.

## 3.3.2 Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler

### 3.3.2.1 Plastik-Plastik Kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik, yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik, esneklik verici, darbe emici yada istenen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastik türleri de iki sınıfta incelenebilir:

**a) Termoplastikler:** Bu tür plastikler, ısıtıldıklarında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında herhangi bir değişiklik söz konusu değildir. Genellikle 5-50 ºC arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bu gruba giren plastik olarak; naylon, polietilen, karbon florür, akrilikler, selülozikler, viniller sayılabilir.

**b) Termoset Plastikler:** Bu tip plastiklerde ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu gruba giren belli başlı plastikler ise; polyesterler, epoksiler, alkitler, aminler olarak verilebilir.

### 3.3.2.2 Plastik-Metal Kompozitler

Endüstride en çok kullanılan bir tür metal olan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça mukavemetli ve hafif bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberlerin (bakır, bronz, alüminyum, çelik) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirilmesi amacıyla elde edilmesinde kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirilme yaygın olarak kulanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır.

### 3.3.2.3 Plastik-Cam Elyaflı Kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya termoset plastikten oluşan matris ve cam liflerinin uygun kompozisyonlarında üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere tercih edilebilirler. Ancak cam elyaflı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılgan olmasından dolayı çok küçük dirençlidirler. Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek, arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de daha önce belirtildiği gibi
termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerin de düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, poliesterlerdir.

### 3.3.2.4 Plastik-Köpük Kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta, köpük ise matris konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük bir kısmı sentetik olarak imal edilmiş hafif maddelerdir. Köpük hücre yapısına göre sert, kırılgan, yumuşak ya da elastik olabilmektedir.

#### 3.3.2.5 Metal Matrisli Kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılgan olmaktadırlar. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Bakır ve Alüminyum matrisli Wolfram veya Molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti, bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşmasını sağlamaktadır. Bu metallerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi, gelişigüzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedirler. (Bölüm 4'te daha ayrıntılı ele alınmıştır.)

#### 3.3.2.6 Seramik Kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin birleşimlerinden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği de gösterirler.

# 4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

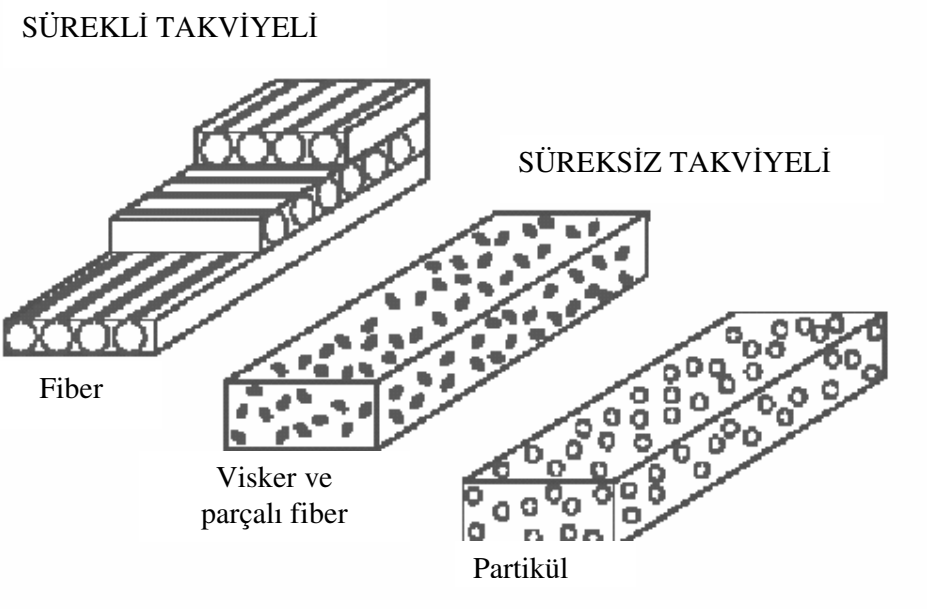
## 4.1 Giriş

Metal Matrisli Kompozit (MMK) ler, en geniş anlamıyla, istenen özellikleri sağlamak amacıyla, en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir. Genel anlamda, dökme demir ve bazı alüminyum-silisyum alaşımları gibi fazların şekil ve hacminin denge diyagramları ile yönlendirildiği döküm kompozitler, çok uzun süreden beri bilinmekte ve kullanılmaktadır. Ancak, modern kompozitler, takviyenin cinsi, şekli ve boyut miktarı bakımından farklıdır (Cöcen ve Önel 1996). MMK'ler, monolitik metallere kıyasla, yüksek mukavemete, yüksek mukavemet/yoğunluk oranına, yüksek yorulma dayanımına, yüksek sıcaklıklarda daha iyi özelliklere, düşük sürünme oranına, düşük ısıl genleşme katsayısına ve yüksek aşınma dayanımına sahiptir. MMK'ler yapısal olarak, tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere metal alaşımlı matris içinde sürekli veya süreksiz (kısa) fiber, visker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir (Şekil 4.1). Takviye fazına göre MMK'ler başlıca üç grupta incelenmektedir:

i) Rijitliğin ve çoğunlukla da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bir bağlayıcı matris içine tane şeklindeki takviyelerin ilavesi ile elde edilen partikül esaslı kompozitler,

ii) Yüksek uzunluk/çap oranı nedeniyle daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, dolayısıyla yüksek dayanımlı visker, kısa fiber veya lamel esaslı kompozitler,

iii) Fiberlerin yüksek yeterlikli tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı kompozitler.




Şekil 4.1 Metal matrisli kompozitlerde tipik takviye geometrileri (Froyen ve Verlinden, 1994).

Yukarıda verilen MMK sistemlerinin, birbirlerine göre bazı üstünlükleri ve eksiklikleri bulunmaktadır. Örneğin, partikül takviyeli MMK'ler, diğerlerine göre düşük maliyet, yüksek rijitlik ve hemen hemen izotropik özellikler gösterirken, mukavemetteki gelişmenin az olduğu ve kopmadaki şekil değişimi ile kırılma tokluğunun düşük olduğu görülmektedir. Visker veya kısa fiber takviyeli MMK'ler ise, partikül takviyelilere göre daha yüksek maliyetli iken daha mukavim olduğu görülmektedir. Sürekli fiber katkılı MMK'ler ise, katılık ve mukavemetin en iyi bileşimini verirken , özelliklerinin anizotropik olması ve daha da önemlisi kullanılan fiberlerin ve üretim prosesinin maliyetlerinin yüksek olması bu malzemelerin dezavantajları olarak öne çıkmaktadır (Göcen ve Önel 1996).

Metal matrisli kompozitlerin polimer matrisli kompozitlere göre avantajları çok daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi, alev almaması, ve organik akışkanlara karşı korozyon ve erozyon dayanımının daha yüksek olması sayılabilir. Aluminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve süper alaşımlar sıkça kullanılan matris yapılardır. Takviye çeşitli parçacık veya fiber (sürekli, süreksiz) şeklinde uygulanmaktadır. Sürekli fiber olarak kullanılanlar SiC, alumina ve

karbon şeklindedir. Metal matrisli kompozitlerin başlıca uygulama alanları, otomotiv sanayisidir. Havacılık sanayide metal matrisli kompozitlerden yararlanmaktadır.

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılgan olmaktadırlar. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Bakır ve Alüminyum matrisli Wolfram veya Molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti, bize bu kompozisyonu veren en iyi örneklerdir. Bu tip kompozitler, matrisin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik olarak ulaşmasını sağlamaktadır. Bu metallerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabildiği gibi, gelişigüzel olarak dağıtılmış küçük parçalar halinde de olabilmektedirler.

Fiberler, yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler. Fiber matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler; fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber-matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi nadiren dikdörtgen, hekzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet v.s) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlenme göstermelerine karşılık, süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir.

### 4.2 Metal Matrisli Kompozitlerde Takviye Elemanları

Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanları beş kategoride incelenebilir. Bunlar; sürekli fiberler, süreksiz fiberler, viskerler, partiküller ve teller. Tel dışındaki takviye elemanları, genellikle seramiklerdir.

Fiberlerin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri çeşitlilik göstermektedir. Grafit fiberlerin üretiminden önce poliakrilonitril (PAN) ve petrol sakızı elde edilir. Çok çeşitli dayanıma sahip grafit fiberlere rastlanmaktadır.

Alümina ve alümina-silika süreksiz fiber takviyelerinin en önde gelenleridir. Bu iki malzemede aslında yalıtım malzemesi olarak geliştirilmiştir.

### 4.3 Matris Malzemeleri ve Önemli Kompozitler

Çeşitli metaller matris malzemesi olarak kullanılabilir. Bunların en önemlisi alüminyum, titanyum, magnezyum ve bakır alaşımlarıdır.

En önemli metal matris sistemleri;

- **Alüminyum matris**

Sürekli fiberler: bor, silikon karpit, alümina, grafit, çelik

Süreksiz fiberler: alümina-silika

Visker: silikon karpit

Partikül: silikon karpit, bor karpit

- **Titanyum matris**

Sürekli fiber: silikon karpit, kaplanmış bor

Partikül: titanyum karpit

- **Magnezyum matris**

Sürekli fiber: grafit, alümina

Visker: silikon karpit

Partikül: silikon karpit, bor karpit

- **Bakır matris**

Sürekli fiber: grafit, silikon karpit

Tel: niobyum-titanyum

Partikül: silikon karpit, bor karpit, titanyum karpit

### 4.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Farklı matris ve takviye fazlarının kullanılıyor olması MMK'lerin üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesine sebep olmuştur. Üretim sırasında matrisin sıvı, katı veya buhar fazında olmasına göre MMK'lerin üretim yöntemlerini aşağıdaki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Bu yöntemler:

1- Katı-faz üretim yöntemleri
- Difüzyonla bağlama
- Toz metalurjisi (TM)

2- Sıvı-faz üretim yöntemleri
- Sıvı-metal infiltrasyonu
- Püskürtme
- Karıştırmalı döküm
- Kompo-döküm
- Reaktif (In-situ) yöntemi
- Basınçlı döküm

3- Buhar-faz üretim yöntemleri
- Fiziksel buhar çökeltme (PVD)

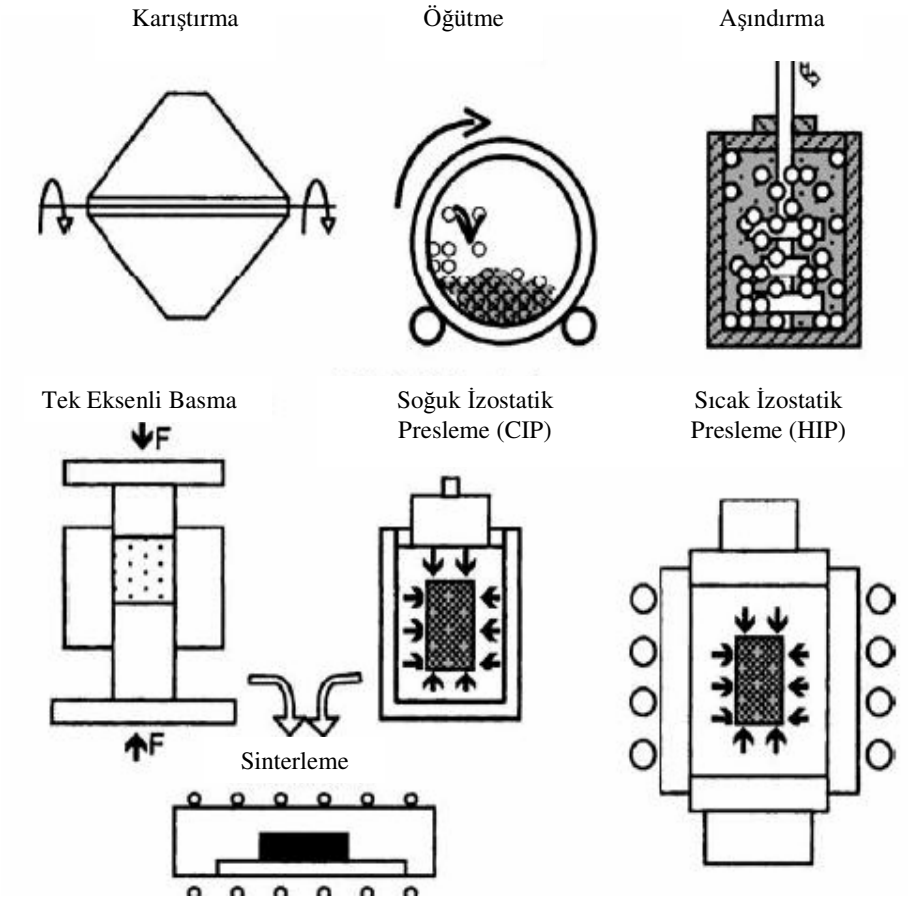
### 4.4.1 Difüzyonla Bağlama

Bu yöntem ile genelde ince sac veya yaprak formunda metal matrisli fiber takviyeli MMK'ler üretilmektedir. Difüzyonla bağlanma için matris ve takviye fazı kimyasal yüzey işlemleri ile aktif hale getirilir. Fiberler metal sac üzerine yerleştirilir ve pres uygulanarak bağlanma sağlanır. Bağlanmanın daha kuvvetli olması açısından fiberler bazen plazma sprey veya iyon kaplama yöntemleri ile kaplanır. Bu yöntemin atmosferik ortam yerine vakum ortamında yapılması ile daha iyi sonuçlar alınmaktadır. Uygulanan basınç, sıcaklık ve bekleme süresi kompozit sistemine göre değişiklik göstermektedir. Bu yöntem ile genelde, takviye fazı olarak paslanmaz çelik, bor ve silisyum karbür ve matris fazı olarak alüminyum ve titanyum alaşımları kullanılmaktadır. Yöntemin en büyük sakıncası ara yüzeyde çok sayıda kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesidir. Al, Mo veya V ilavesi ile bu reaksiyonların kinetiğini yavaşlatmak mümkündür. Ayrıca, karmaşık şekilli parçaların üretiminde bu yöntemi

kullanmak oldukça zordur. Difüzyonla bağlama yöntemi, MMK'lerin üretiminde kullanılan en pahalı yöntemdir (Clyne 2001, Huda, Baradie ve Hashmi 1993).

### 4.4.2 Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi (TM), süreksiz takviyeli MMK'lerin üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir (Delijie 2002). Yöntemin uygulanmasına ilişkin şematik gösterim Şekil 4.2'de verilmiştir. Buna göre, matris ve takviye fazı tozları karıştırılarak istenilen şekildeki kalıba dökülür. Daha sonra tozların bağlanması için pres uygulanır. Tozların bağlanmasını kolaylaştırmak amacıyla, sıkıştırılmış tozlara ergime sıcaklığının altında ancak katı-faz difüzyonunun gerçekleşmesi için yeterli yüksek sıcaklıkta ısıl işlem uygulanır. Diğer bir seçenek, tozların karıştırılmasından sonra doğrudan sıcak pres uygulanmasıdır (HIP). Matris fazı olarak, bakır, nikel, aluminyum, kobalt, titanyum ve molibden alaşımları ile çelik yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Takviye fazı olarak ise SiC, grafit, Ni, Ti ve Mo partikül veya kısa fiber şeklinde kullanılmaktadır. Ergitme ve döküm işlemleri olmadığından diğer üretim yöntemlerine göre daha ucuz bir yöntemdir.




Şekil 4.2 Toz metalurjisi uygulama yöntemleri

Yöntemin başlıca avantajları:

1. Düşük işlem sıcaklığı nedeniyle istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının minimize edilmesi ve dolayısıyla daha üstün mekanik özelliklere sahip MMK'lerin üretilebilmesi.

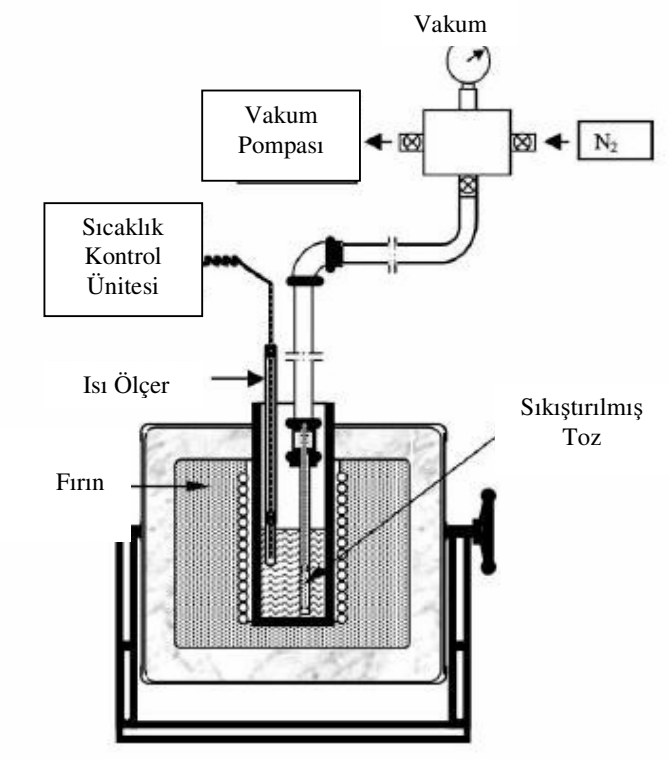
2. Takviye fazının matris alaşımı ile etkileşerek bozunması bu yöntemde en aza indirgendiğinden diğer yöntemler ile üretilemeyen MMK'lerin bu yöntem ile üretilebilmesi.

3. Geleneksel döküm yöntemlerine göre TM yöntemi ile MMK'lerin üretiminin daha kolay olması.

Birçok üstünlüğe sahip olmasına karşın toz karıştırma işleminin uzun sürmesi, pahalı ve tehlikeli olması TM yönteminin başlıca sakıncalarıdır. Ayrıca, homojen takviye fazı dağılımı ve üretim sırasında tozların çok temiz olmasını gerektirmesi, aksi halde inklüzyonların kompozit özelliklerini olumsuz etkilemesi karşılaşılan problemlerdir.

### 4.4.3 Sıvı-Metal İnfiltrasyonu

Bu yöntem, sıvı metalin "preform" denilen düzenli bir şekilde dizilmiş kısa fiberlerin arasındaki boşluklardan enjekte edilmesi ile gerçekleştirilir (Pech-Canul ve Makhlouf 2000). Preform genelde, döküm sonrası nihai parçanın şeklini alacak formda tasarlanır. Preformlar sıvı süspansiyondan kısa fiberlerin çökelmesi ile üretilir. Bu işlem aynı zamanda partikül takviyeli MMK'lerin üretimi için de adapte edilebilir. Preformların bütünlüğünü ve şeklini koruyabilmeleri için genelde bağlayıcı kullanılır. Çeşitli silika ve alümina bazlı karışımlar yüksek sıcaklık bağlayıcıları olarak kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanabilirliği, takviye fazlarının bütün ergimiş metaller tarafından ıslatılamaması ve yüksek sıcaklıklarda fiberlerin bozunması nedeniyle sınırlanmaktadır. İnfiltrasyon işlemi atmosferik, inert gaz veya vakum altında yapılabilir. Bunlar arasında, MMK'lerin vakum altında üretimi (Şekil 4.3) en uygun olanıdır, çünkü vakum altında fiberlerin yüzey aktiviteleri daha yüksek olduğundan ıslanabilirlik daha iyidir.

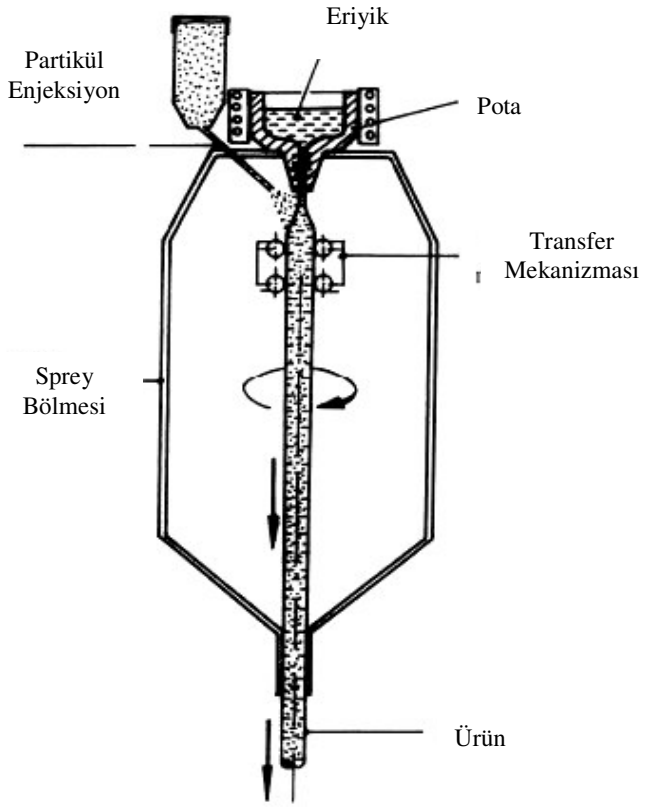



Şekil 4.3 Vakum infiltrasyon düzeneği

### 4.4.4 Püskürtme

Bu yöntemde, sıvı metal takviye fazı ile birlikte bir altlık üzerine püskürtülür ve metalin katılaşması sağlanır. Şekil 4.4'de sprey çökeltme yöntemi için dizayn edilmiş düzenek görülmektedir. Püskürtme yöntemi damla akısının, eriyik havuzundan veya metalin enjeksiyon bölgesine sürekli beslenmesine göre ikiye ayrılmaktadır. Ticari açıdan çok başarılı olunmasa da seramik tozların sprey içerisine enjekte edilmesiyle partikül takviyeli MMK'lerin üretiminde bu yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen MMK'lerde seramik takviye fazlarının homojen olarak dağılmadığı gözlenmiştir. Ayrıca, sprey çökeltme sonrası yapıdaki porozite oranının yaklaşık olarak %5-10 arasında olduğu belirlenmiştir (Clyne 2001). Yöntemin en büyük avantajı, ince taneli bir yapının elde edilmesidir. Dezavantajları ise, yöntemin sadece süreksiz takviye fazları için

uygulanabilir olması, maliyetinin yüksek olması ve sadece basit şekilli parçaların üretiminde kullanılabiliyor olmasıdır.

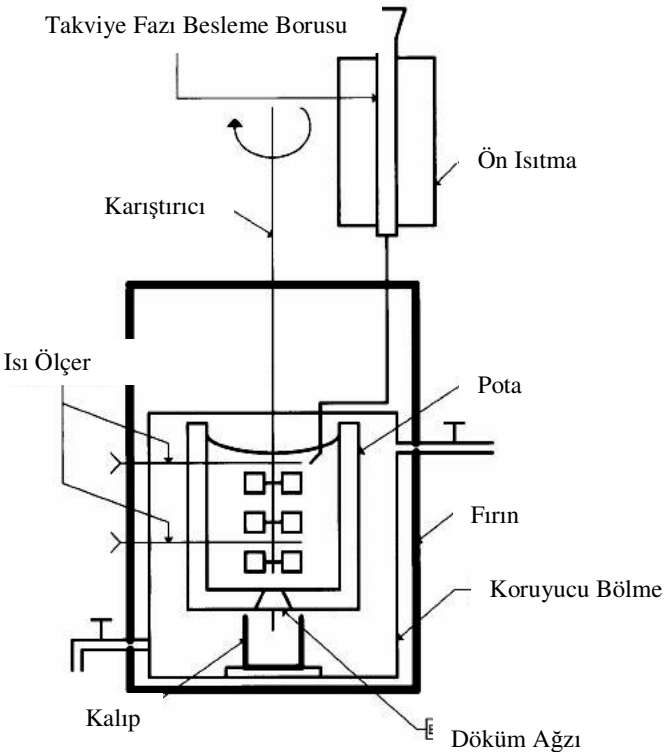



Şekil 4.4 Sprey çökeltme düzeneği

### 4.4.5 Karıştırmalı Döküm

Toz metalurjisi, püskürtme, difüzyonla bağlama ve basınçlı döküm yöntemleri ile karşılaştırıldığında süreksiz fiber, visker veya partikül takviyeli MMK'lerin üretiminde kullanılan en ekonomik yöntemdir (Hashim, Looney ve Hashmi 1999). Bu yöntem, seramik partiküllerinin sıvı metal içerisinde karıştırılması ve sonrasında katılaşmaya bırakılması ile gerçekleşmektedir (Şekil 4.5). Bu yöntemin başarılı olabilmesi için ıslanabilirliğin iyi olması gerekmektedir. Artan viskozite nedeniyle partikül veya fiberlerin eriyik içerisine

ilavesinde bazı zorluklar ortaya çıkabilir. Partikül topaklanması veya dağılımının homojen olmaması gibi bazı mikro yapısal homojensizlikler oluşabilir.




Şekil 4.5 Karıştırmalı döküm düzeneği

Bu yöntemde, matris ve takviye fazı uzun bir süre etkileşimde kaldığından ara yüzey reaksiyonları daha da önem kazanmaktadır. Çok iyi bilindiği üzere, $Al_4C_3$ oluşumu ve katkı fazının bozunması kompozit özelliklerini olumsuz etkilemekte ve kompozitin dökümünde zorluklara neden olmaktadır. Takviye fazının kaplanması, alaşım elementi ilavesi veya üretim parametrelerinin kontrol altında tutulması ile bu reaksiyonlar engellenebilmekte ve ıslanabilirlik artırılabilmektedir. Ayrıca, Hashim, Looney ve Hashmi (1999) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, karıştırma hızı, karıştırıcı şekli, boyutu ve eriyik içerisindeki pozisyonu gibi parametrelerin MMK'lerin mekanik özelliklerine etkisi olduğu belirtilmiştir.

### 4.4.6 Fiziksel Buhar Çökeltme (PVD)

PVD yöntemleri göreceli olarak yavaştır ancak bunlar arasında en hızlısı buharlaştırma metodudur. Mono filaman takviyeli titanyum kompozitlerin üretiminde kullanılan bu yöntemde, fiber çökeltilecek metalin yüksek buhar basıncında olan bir bölgeden geçirilir ve bu esnada yoğunlaşma ile kalın bir kaplama üretilir. Yüksek güçte (~10kW) bir elektron demeti ile buhar elde edilir. Yöntemin başlıca avantajı düşük işlem sıcaklığıdır. Dezavantajı ise maliyetinin yüksek olmasıdır.

### 4.4.7 Kompo-döküm

Bu yöntem karıştırmalı döküm yönteminin geliştirilmiş şeklidir. Bu yöntemde kullanılan düzenek, indüksiyon güç sağlayıcısı, su soğutmalı vakum bölümü, mekanik ve difüzyon pompaları, pota ve karıştırma düzeneklerinden meydana gelmektedir. Metal alaşımın potaya konmasından sonra ortamdaki hava boşaltılır ve ergime sıcaklığının üzerine ısıtılır. Karıştırma işlemi ile alaşımın ve sıcaklığın homojen olması sağlanır. Daha sonra, matris alaşımı yarı katı-yarı sıvı fazda olacak şekilde sıcaklık düşürülür ve takviye fazı ilave edilir. Takviye fazı ile matris arasındaki ıslanabilirliği artırmak amacıyla karıştırma işlemine devam edilir. Eriyik daha sonra liküdüs sıcaklığının üzerine çıkarılır, eriyik kalıba dökülür ve basınç altında katılaşması sağlanır.

Yöntemin başlıca avantajları; (i) geleneksel döküm uygulamalarına göre daha

düşük sıcaklıklarda uygulanabilmekte ve dolayısıyla takviye fazı yüzeyinin termokimyasal bozunması önlenmektedir, (ii) karıştırmalı döküm alaşımlarında olduğu gibi malzeme tiksotrop davranış gösterdiğinden yarı katı fazında ve düşük basınç altında son şekil alabilirliği yüksektir ki bu da ürünün hatasız olmasını sağlamaktadır. Yöntemin dezavantajı ise takviye fazları arasındaki artık porozitelerin tamamıyla giderilememesidir.

### 4.4.8 Basınçlı Döküm

Alaşımların özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok katılaşma yöntemi geliştirilmiştir. Bunların arasında basınçlı döküm yöntemi, yüksek verimlilik, ekonomiklik, iyileştirilmiş mekanik özellikler, ikincil bir yüzey işlemi gerektirmemesi ve porozitelerin tamamıyla giderilmesi gibi avantajlara sahip olmasından dolayı en başarılı yöntemdir. Bu yöntem, alaşımın belirli bir basınç altında katılaşması esasına dayanır (Qu, Geng, Cao ve Lei 2004). (Bölüm 5'te daha ayrıntılı ele alınmıştır.)

### 4.4.9 Reaktif (In-situ) Yöntemi

Bu yöntemde, sıvı-gaz, sıvı-katı, sıvı-sıvı ve karıştırılmış tuz reaksiyonları gibi farklı metotlar mevcuttur. Yöntem, takviye fazının aluminyum matriks alaşımında oluşturulması esasına dayanır. Patentli "Dimox™" metodu aluminyumun doğrudan oksitlenmesi ile gerçekleştirilir. Diğer metotlarda ise, farklı tozların karıştırılıp, sıvı faz sıcaklığına ısıtılıp reaksiyona girmeleri ile gerçekleştirilir. "XD™" metodu ile Al, Ti ve B tozlarının karıştırılarak Al-$TiB_2$ kompozit malzeme üretimi bu yönteme örnek olarak verilebilir. Sıvı-gaz reaksiyon metodu ile TiC takviyeli alüminyum bazlı kompozit malzemeler üretilmektedir. Örneğin Al-Ti eriyik içerisine metanol gibi karbon bazlı gaz gönderip yüksek sıcaklıklarda Al-TiCp kompozit malzeme üretilmektedir.

Reaktif proses yöntemindeki en önemli sınırlama, verilen bir sistemde oluşabilecek takviye fazının yapısı ve bileşimi ile ilgili termodinamiksel sınırlamalardır. Ayrıca, üretim şartlarına bağlı olarak kimyasal reaksiyonlar neticesinde elde edilen takviye fazının şekli, boyutu ve hacimsel oranı ile ilgili kinetik sınırlamalardır.

# 5. BASINÇLI DÖKÜM

## 5.1 Tanımı

Döküm, işlenmemiş malzemelerin kullanılabilir parçalara dönüştürülmesinin en kolay yoludur. Bununla birlikte, geleneksel döküm teknikleri veya yüksek basınçlı kalıp dökümü gibi daha gelişmiş döküm tekniklerinin başlıca sakıncası, gözeneklilik gibi kusurların oluşumudur. Daha da önemlisi, sıcak yırtılmalar, segregasyon kusurları ve bant oluşumu dökülmüş parçaların çalışması esnasında potansiyel çatlak başlangıçları olabilirler. Bu nedenle, bu kusurları gidermek için yeni döküm teknikleri geliştirilmiştir. Çok sayıda kullanılabilir döküm tekniğinden biri olan basınçlı döküm, daha az kusurlu döküm parçaları yaratmak için daha büyük bir potansiyele sahiptir.

Basınçlı döküm, katılaşmanın tekrar kullanılabilir bir kalıp içinde yüksek basınç altında tamamlandığı bir üretim tekniğidir. Temelde, erimiş metalin uygulanan hidrostatik basınç altında katılaştığı, kalıp dövme ile kalıcı kalıp dökümü birleştiren bir metal şekillendirme işlemidir. Bu yüksek basınç, geleneksel döküm uygulamalarında erişilen eriyik basınçlarından daha yüksek büyüklüklerdedir. Sonuç olarak, yeni başlamış büzülme gözeneklerinin içine sıcak noktalardan eriyik beslemesi çok kolay bir şekilde sağlanır. Uygulanan yüksek basınç, aynı zamanda eriyik içine gazların girmesini engeller ve hızlı ısı akışı ve ince mikro yapı için döküm ile kalıp arasındaki teması arttırır. Basınçlı döküm terimi, “basınç kristalleşmesi”, “sıvı preslenmesi”, “ekstrüzyon dökümü”, “sıvı metal dövme işlemi” ve “sıkıştırma şekillendirmesi” gibi bir çok eşanlam kazanmıştır.

Basınçlı döküm, temel olarak hafif ve düşük erime noktalı alüminyum ve magnezyum alaşımlarına uygulanırken, bir çok durumda bakır alaşımlarına, çinko alaşımlarına, dökme demirlere ve çeliklere de uygulanmaktadır. Basınçlı döküm işlemi, özellikle kompozitler alanında gelişmiş malzemelerin üretimi için yeni fırsatlar sağlamıştır. Basınçlı döküm ile üretilmiş metal matris kompozitlerine ilişkin çok sayıda yayın bulunmaktadır.

Ayrıca basınçlı dökümde geri çekilebilir kenar maçaları kullanılarak boylu boyunca boşluklar yapmak da olasıdır.

### 5.2 İşlem Sırası

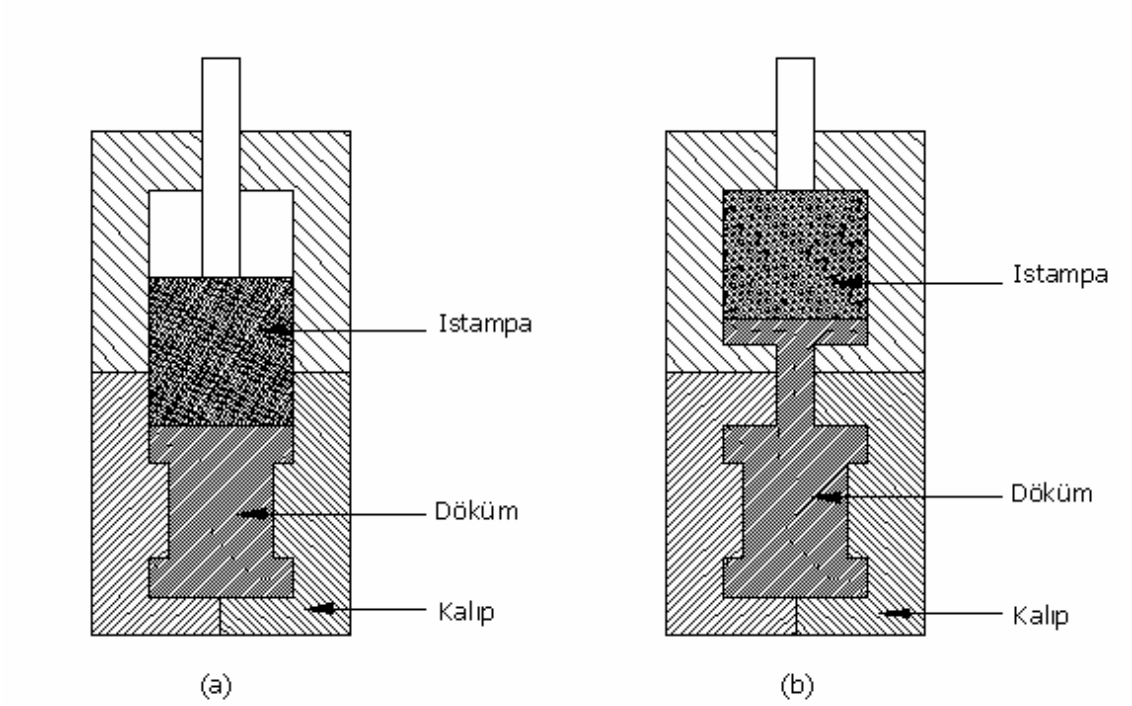
Basınçlı döküm için temel olarak işlem sırası şu şekildedir.

1. Önceden belirlenmiş miktarda iş malzemesinin ergitilmesi, düzeneğin bütün temas yüzeylerinin yağlanması ve düzeneğin ön ısıtılması.
2. Doğrudan veya besleme yolundan geçerek kalıp boşluğu içine sıvı metalin boşaltılması.
3. Kalıbın kapatılması ve katılaşma tamamlanana kadar basınç uygulanması. Bu işlem hem ısı akış hızını arttırır hem de makro/mikro büzülme gözenekliliğini azaltır. Çünkü gaz gözenekliliğinin çekirdeklenmesi basınç bağımlıdır ve gözenek oluşumu erimiş metal içinde tutulan erimiş gazlara bağlıdır.
4. Dökümün çıkarılması, düzeneğin temizlenmesi ve ocağın yeniden şarj edilmesi.

### 5.3 Basınçlı Dökümün Sınıflandırılması

Basınçlı döküm işlemi, basıncın doğrudan erkek kalıptan (ıstampa) geçerek, katılaşan döküm ürünü üzerine uygulanması veya uygulanan basıncın orta seviyedeki bir besleme sistemi üzerinden katılaşan döküm uygulanmasına bağlı olarak başlıca iki temel gruba ayrılabilir. Doğrudan basınçlı döküm ve dolaylı basınçlı döküm olarak adlandırılan bu iki durum Şekil 5.1'de şematik olarak gösterilmiştir.

İlk olarak geliştirilen doğrudan basınçlı döküm, pistonlar, mastarlar ve ana silindirler gibi basit ve simetrik dökümleri üretmek için kullanılır. Doğrudan basınçlı dökümün kullanımı işlemin ve kalıp tasarımının özelliklerine bağlı olarak çok sınırlıdır: maksimum döküm ağırlığı genellikle 10 kg'dan fazla olamamaktadır. Metal hareketi ile doğrudan basınçlı döküm, otomobil endüstrisi için alaşım jantları gibi karışık olarak şekillendirilmiş dökümlerin üretimini kolaylaştırdığından endüstriyel gereksinimler için daha uygundur.




Şekil 5.1 (a) Doğrudan basınçlı döküm (b) Dolaylı basınçlı döküm

Doğrudan basınçlı döküm düzenekleri basit ve açıktır. Dolaylı basınçlı döküm düzenekleri genellikle şu kategorilere ayrılır. (i) düşey kalıp kapanması ve sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması, (ii) yatay kalıp kapanması ve sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması, (iii) yatay kalıp kapanması ve düşey olarak sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması, (iv) düşey kalıp kapanması ve yatay olarak sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması.

Dolaylı basınçlı döküm makinelerinin gelişimi temel olarak basınçlı döküm işleminin uygulanmasını da geliştirmiştir. Pratik olarak iç hataların olmadığı alaşım jantları gibi karmaşık dökümlerin üretimine olanak sağlamaktadır. Kalıp kaplaması gerekli değildir ve 100 MPa'ın üzerinde bir metal basıncı katılaşma boyunca uygulanır. Maksimum döküm boyutu makine kapasitesi tarafından sınırlanır. Bununla birlikte, dolaylı basınçlı döküm işleminin sakıncası 4 mm'den daha az duvar kalınlığı ile ince kesitlerin dökümü için yeterli olmamaktadır. Bunun nedeni düşük doldurma hızları ve erimiş metalin hızla katılaşmasıdır. Bundan başka, dökümün dışarı çıkarılmasının zor olduğu döküm ürünlerinin şekil karmaşıklığı üzerinde bazı sınırlamalar vardır. Geleneksel kalıp

döküme göre dolayı basınçlı dökümün daha düşük kalıp sıcaklığı, ince tane yapılı daha fazla soğuma hızı sağlar. Dolaylı basınçlı döküm ürünleri, tane yönlenmesi ile karakterize edilen dövme işleminden daha homojen yapıdadır.

Basınçlı döküm erimiş alaşımın preslenmesi olarak kabul edilse bile, aynı zamanda yarı katıların şekillendirilmesi için de kullanılabilir. Buna göre yeni bir sınıflandırma şu şekilde yapılabilir: (i) kristalizasyonun başlamasından önce, (ii) yarı katı presleme olarak da tanımlanabilen kristalizasyonun başlamasından sonra yapılan basınçlı döküm.

### 5.4 Basınçlı Dökümün Üstünlükleri ve Sakıncaları

Basınçlı döküm tekniği geleneksel döküm yöntemleri ve deformasyon işlemleri üzerine başlıca şu üstünlüklere sahiptir:

1. Daha yüksek mekanik özellikler. Akma dayanımları %10-15 ve yüzde uzamaları ile yorulma dayanımları %50-80'e kadar arttırılır.
2. Yüksek sıcaklıklarda ısısal kararlılık.
3. Daha ince mikro yapı.
4. Geleneksel döküm işlemlerine göre segregasyonun en aza indirilmesi, porozitenin engellenmesi.
5. Net veya net şekle yakın üretim sağlaması ile karmaşık şekillerin ve ince detayların üretilmesi (net şekil kapasitesi). 100 mm'de 0.25 mm-500 mm'de 0.6 mm ölçüsel doğruluk sağlaması.
6. Isıl işlem görebilme.
7. Kaynaklanabilme kabiliyeti.
8. Kusursuz yüzey bitirme.
9. Yüksek verimlilik. Dövmenin tersine daha az enerji gereksinimi, basit hareket işlemiyle üretim sağlaması ve geri dönüş için hemen hemen hiç hurda olmaması. Ayrıca döküm işlemine göre daha yüksek üretim hızı sağlaması.
10. Sıcak veya soğuk dövme işlemlerinden daha az basınç gereksinimi ile ekipman ve kalıp malzemesi ihtiyacının azaltılması. Herhangi bir besleme

sistemi, yolluk, girişler, büzülme giderici birimler, besleyiciler olmadan dökümün tamamlanabilmesi.

11. Kompozit üretimine uygulanabilmesi ve özel alaşımların dökülebilmesi. Demir dışı ve demir alaşım kompozisyonlarının birçok çeşidinin (hem döküm hem de dövme) kullanılmasına imkân vermesi.

Basınçlı dökümün sakıncaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Yüksek maliyet (başlıca hidrolik pres ve kalıbın ön ısıtılması için gerekli ısıtıcı sistem).
2. Kalıp ömrünün kısalması.
3. Karmaşık şekilli parçaların üretiminin sınırlanması.
4. İnce kesitlerin üretim zorluğu.
5. Sınırlanmış maksimum boyut ve ağırlık. Çubuk, boru ve plaka üretimi için uygun değildir.
6. Kalıp boşluğu içinde türbülanslı akışa bağlı olarak ortaya çıkan kusurlar.
7. Katılaşma sırasında oluşan dendritik yapıya bağlı olarak homojen olmayan mekanik özellikler.

## 5.5 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretiminde Basınçlı Dökümün Önemi

Metal matrisli kompozitler, matris alaşımlarına göre çok daha iyi fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahiptir. Yüksek dayanımları ve elastiklikleri, yüksek aşınma ve yorulma dirençleri, ölçüsel kararlılıkları ve yüksek sıcaklıklardaki kararlılıkları ile türbin ve otomobil motorlarında, otomobil pistonları ve valflerinde ve özellikle havacılık alanında uygulama bulmaktadır. Bununla beraber, metal matris kompozitlerinin özellikleri matris alaşımının ve takviye edilen malzemenin özelliklerine tek başına bağlı değildir, aynı zamanda üretim yöntemine, matrisin mikro yapısına, matris içinde takviye edilen malzemenin dağılımına, takviye edilen faz ve matris arasındaki ara yüzey bağlanma şartına da bağlıdır. Bu sebeple, ekonomik olarak çekici ve yüksek kalitede metal matris kompozitleri elde etmek için üretim yönteminin seçimi çok önemlidir. Kullanılan çok sayıda üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; basınçlı döküm işlemi, vakum-yüksek basınç sızma işlemi ve karıştırmalı döküm işlemidir.

Oksidasyon problemi, matris içindeki mikro boşluklar, eksik nüfuz etme veya ara yüzeylerde bağlanmama hataları gibi kusurların üzerinden gelebilen ve çekici işlem ekonomisi ile iyi mikro yapı kontrolünün bir kombinasyonunu sunabilen basınçlı döküm, viskersle kısmen takviye edilen karışık parçaların, kısa fiberlerin veya partiküllerin üretimi için özellikle uygundur ve önemli ticari kullanıma sahiptir.

Alüminyum, magnezyum, titanyum ve alaşımları gibi düşük yoğunluktaki metaller ve alaşımlar, metal matris kompozitleri için yaygın matrisler oluşturmaktadır. Geniş bir çeşitlilik gösteren seramik, bor ve karbon takviyelerin arasına sıvı metalin sızması, bu şekildeki metal matris kompozitlerinin üretimi için yaygın bir yol olmuştur. Böylece, basınçlı döküm basınçla sızma işlemini geliştirmek için kullanılmıştır. Bu işlem ile fiber, viskers veya partikül ön şekilleri pahalı olmayan atılabilir kapların içine yerleştirilerek, ergimiş matris malzemesine gaz basıncı ile kuvvet uygulanır. Ön şekil kap üzerindeki gaz basıncı yarı hidrostatiktir ve dayanım gereksinimi en alt seviyededir. Netice olarak karmaşık şekilli olsalar bile ön şekil kapları kolaylıkla hazırlanır. İşlem özellikle araştırma ve sınırlı üretim için uygundur.

Net şekle yakın üretim için en kusursuz üretim metodu olan basınçlı döküm tekniğinde ergimiş metali fiberlerin çevresine kuvvet sızması olacaktır. Tüm absorplanan ve tutulan gazların uzaklaştırılması sağlanacaktır. Aynı zamanda fiber-matris temas zamanı, ergimiş metalin yüksek basınç altında büyük bir soğuma göstermesinden ve ısı çıkışının yüksek bir hız göstermesinden dolayı oluşan hızlı katılaşma ile önemli miktarda azaltılacaktır.

Başlangıçta ısıtılmış olan ön şekillerin doğrudan ve dolaylı basınçlı dökümü yapılır. Doğrudan basınçlı döküm basit şekilli kompozit parçaların üretimi için uygulanır, kalıpları basit ve uygun maliyettedir. Dolaylı basınçlı dökümün uygulanması daha karmaşık kompozit parçaların üretimini olanaklı hale getirir, ancak daha pahalı döküm kalıplarını gerektirmektedir.

## 6. Zn-Al ALAŞIMLARI

### 6.1 Zn-Al Alaşımlarının Gelişimi

Bileşiminde alüminyum, magnezyum kimi zamanda bakır bulunan ve mekanik konstrüksiyonlarda yaygın olarak kullanılan Zn-Al alaşımlarının, ticari adı zamak olarak bilinir.

The New Jersey Zinc Company tarafından 1920'lerde bulunan Zamak, Almanca çinko (**Z**ink), aluminyum (**A**luminium), magnezyum (**MA**gnesium) ve bakırın (**K**upfer) baş harflerinden oluşturulmuş bir isimdir.

İlk Zn bazlı basınçlı döküm alaşımları ticari olarak 1920'li yılların sonuna doğru ortaya çıkmıştır. Bunlar 2, 3, 5 ve 7 alaşımları olarak bilinmektedir. Dekoratif ve yapısal amaçlar için kullanılan bu alaşımlar yüksek kaliteye, uygun mekanik ve fiziksel özelliklere, düşük maliyete sahip olduklarından yaygın olarak kullanılmaktaydılar.

Zn-Al alaşımları hızlı ve ekonomik bir döküme imkan sağlayan özellikte bir bileşime sahiptir. Diğer basınçlı döküm alaşımlarına göre birçok avantajlara sahiptirler. Bu yüzden ticari popülerlikleri gittikçe artmaktadır. Bu avantajlar; daha düşük döküm sıcaklığı, daha az enerji gereksinimi ve daha uzun ömürlü kalıp kullanımıdır.

Zn alaşımlarının iyi dökülebilirlik özelliği de ince duvarlı Zn dökümüyle ekonomik üretime izin vermektedir. Zn döküm alaşımlarının diğer bir çekici özelliği de daha kolay elektrolitik kaplama ve yüzey temizlemeye izin veren döküm sonrası yüzey kalitesidir.

1960'lı yılların başında plastik malzemelerin piyasaya çıkmasıyla Zamak alaşımlarının kullanım alanı daraltılmıştır. Bunun sebebi de Zamak alaşımlarının yüksek sıcaklık özelliklerinin bekleneni verememesidir. Kaybedilen piyasayı tekrar ele geçirmek ve istenen özellikleri tekrar sağlamak amacıyla çinko endüstrisi özellikle bu endüstrinin araştırma kolu olan ILZRO (International Lead Zinc Research Organization) önderliğinde araştırma programları başlatılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda 1960'lı yılların sonunda yüksek performansa sahip yeni bir çinko-alüminyum (ZA) döküm alaşımları ailesi geliştirilmiştir. İlk olarak

ILZRO 14 ve 16 geliştirilmiştir. Bunlar bileşimlerindeki Ti, Cr gibi elementler sebebiyle yüksek sürünme direnci göstermelerine rağmen, düşük Al içeriğinden dolayı mukavemetleri oldukça düşüktür. Bunların sürünme direncinin yüksek olmasının sebebi Ti ve Cr'un Zn ile intermetalik bileşikler oluşturması ve bunların taneler arasında çökelmesidir. Ancak bu alaşımlar düşük mukavemetleri ve sıcak kamaralı döküm yöntemi ile dökülmemeleri sebebiyle konvansiyonel malzemeler karşısında yetersiz kalmıştır.

1970'li yıllarda ILZRO tarafından gravite döküm için %12 Al içeren bir ZA alaşımı geliştirilmiştir ve ILZRO 12 olarak adlandırılmıştır. Sonraları ZA-12 olarak tekrar isimlendirilmiştir. İleriki yıllarda Norando Research Center iki yeni gravite döküm alaşımı olan ZA-8 ve ZA-27'yi geliştirmiştir. Bu alaşımlar iyi döküm özellikleri sebebiyle gravite döküm için üretilmelerine rağmen basınçlı döküm ile de üretilmiştir. ZA alaşımları kuma döküm, santrifüj döküm ve kokil kalıba döküm ile dökülebilmektedir. Ayrıca ekstrüzyon ve dövme gibi yöntemler ile sürekli üretimleri de yapılabilmektedir.

ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımları sahip oldukları son derece iyi mekanik ve döküm özellikleri yanı sıra ekonomik olarak da üretilebilir olmaları nedeni ile birçok endüstriyel alanda kullanılmakta ve kullanımları hızla artmaktadır. Bu alaşımları birçok uygulamalarda beyaz metal, bazı alüminyum alaşımları, dökme demir, pirinç ve bronz gibi konvansiyonel döküm alaşımlarının yerini almıştır.

Ticari döküm alaşımları ile karşılaştırıldıklarında çok iyi fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduklarından dolayı ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımları yapısal ve dekoratif uygulamalar için yüksek performansa sahiptirler. Bu alaşımlar yaygın Zn ve Al döküm alaşımlarına kıyasla sahip oldukları yüksek mukavemet ve sertlik, arttırılmış sürünme direnci, iyi yatak ve aşınma özellikleri ile düşük yoğunluk gibi üstün özelliklerinden dolayı Zn ve Al'un kullanıldığı yerlerde başarıyla kullanılmaktadır.

ZA alaşımları günümüzde bir çok alanda bazı Al alaşımları, dökme demir, pirinç ve bronz gibi diğer konvansiyonel döküm alaşımlarının yerine kullanılmaktadır. Bunun sebebi olarak ZA alaşımlarının iyi dökülebilirliğe, yüksek mukavemete ve iyi aşınma özelliklerine sahip olması ve mukavemet/ağırlık oranının yüksek olması gösterilebilir. Bu alaşımların üstün

mekanik özelliklerinin yanında sundukları en önemli avantajları hemen hemen bilinen bütün döküm yöntemleri ile başarılı bir şekilde dökülebilmeleridir. Bu yöntemler içinde çok miktarda parça üretimi için tercih edilen basınçlı döküm yöntemidir.

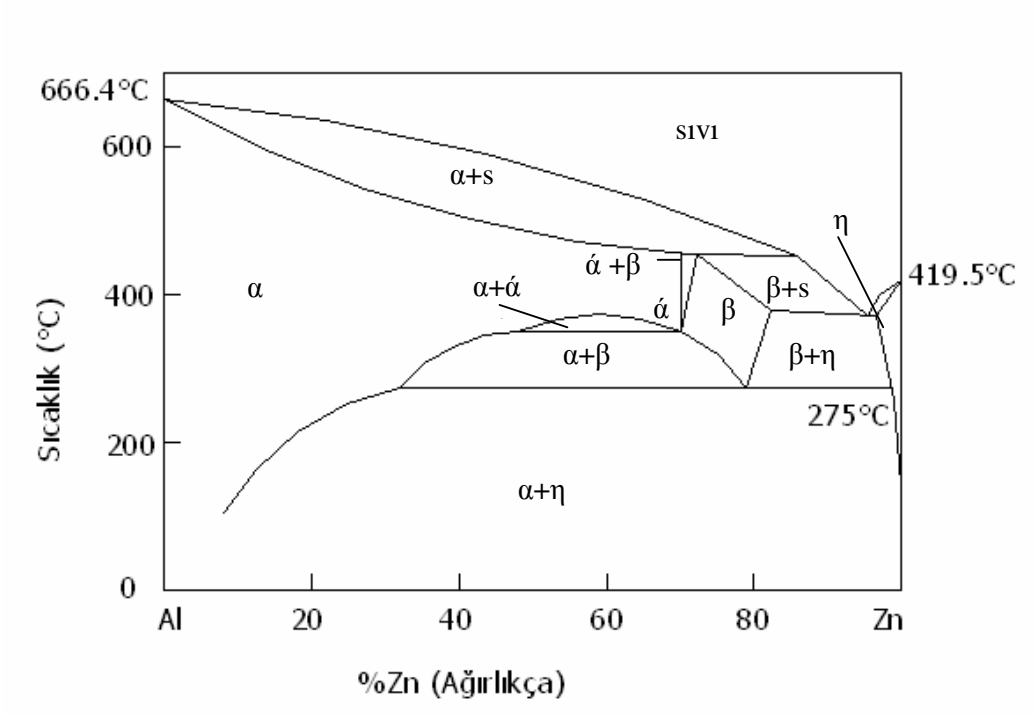
## 6.2 Zn-Al Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri

### 6.2.1 Zn-Al İkili Denge Diyagramı

Zn-Al denge diyagramı 80 yıldan fazla süredir araştırılmaktadır. Bu süre içinde birçok denge diyagramı yayınlanmıştır. İlk çalışmalar Presnyakov ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuş ve daha sonra Goldak ve Parr tarafından bazı değişiklikler yapılmıştır. Günümüzde bu diyagram kullanılmaktadır.

Zn-Al diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir. Bu diyagramdan görüldüğü gibi Zn, Al içerisinde %80'e kadar çözünerek α, ά ve β olarak adlandırılan üç değişik faz bölgesi oluşturmaktadır. Al'ca zengin eriyiğe α, monotektoidin Zn tarafında kalan +kısmına ά, yüzey merkezli ve daha fazla Zn içeren ötektoid faza β ve Zn'ca zengin katı eriyiğe de η denilmektedir. 443ºC'de peritektik, 380°C'de ötektik, 340°C'de monotektik ve 275°C'de ötektoid dönüşümler meydana gelmektedir.

351°C ve 340°C sıcaklıkları arasında Al'ca zengin katı eriyikler farklı miktarlarda Zn içerdiklerinden ve kafes parametreleri değişik oluklarından α ve ά'nün karışabilme aralığı 340°C'de %49 Zn'dan %69.5 Zn'ya kadar uzatılmaktadır ve 351°C'de tek bir noktaya ulaşmaktadır. α+β bölgesi ise 69.5 Zn içeren ötektoid noktadan 413°C'deki peritektik noktaya kadar dar bir alanı kapsamaktadır. Zn içerisinde Al çözünürlüğü ötektik sıcaklıkta yaklaşık olarak %1.1, ötektoid sıcaklıkta azalarak %0.65 ve 22°C'de %0.42 olmaktadır.




Şekil 6.1 Zn-Al denge diyagramı

### 6.3 Zn-Al Alaşımlarının Katılaşması ve Mikro Yapıları

Zn-Al esaslı alaşımların genel yapısı, α+η'den oluşan ötektik bir matris içerisinde alüminyumca veya çinkoca zengin primer dendiritlerden meydana gelmektedir.

Bu alaşımlarda Zn-Al ikili denge diyagramına (Şekil 6.1) bağlı olarak oluşabilecek fazlar şu şekilde sıralanabilir.

- çinkoca zengin katı eriyik η
- alüminyumca zengin katı eriyik α
- monotektoidin çinkoca zengin tarafındaki faz ά
- çinkoca zengin yüksek sıcaklık fazı β

### 6.3.1 Zn-Al Alaşımlarının Mikro Yapısı

Çinko-alüminyum esaslı alaşımlardan günümüzde en yaygın kullanıma sahip olan alaşımlar ZA-3 ve ZA-5 alaşımlarıdır. Bu alaşımlar çinko-alüminyum denge diyagramında ötektik altı bileşime sahip olduklarından, katılaşmaları sıvı içerisinde çinkoca zengin primer η dendiritlerinin oluşumu ile başlar. Bu dendiritlerin büyümesi ötektik sıcaklığa (382°C) kadar devam eder ve katılaşma ötektik sıcaklığa ulaşıldığında bu dendiritlerin etrafında β+η ötektik dönüşümü ile tamamlanır. β fazı 275°C'nin altında karalı olmayıp, ötektoid dönüşüm ile α+η fazlarına dönüşür. Bu nedenle Zamak alaşımlarının oda sıcaklığı mikro yapıları, α+η ötektik matriksi içerisinde primer η dendiritlerinden oluşmaktadır. Primer dendiritlerin bileşiminde %1.6 Al ve %1.7 Cu bulunduğu tespit edilmiştir.

## 6.4 Zn-Al Alaşımlarının Özellikleri

### 6.4.1 Zn-Al Alaşımlarının Kimyasal Özellikleri

Zn-Al alaşımlarından ZA-3 ve ZA-5'in ASTM B86 standardına göre, ZA-8, ZA-12 ve ZA-27'nin ise ASTM B791 (döküm) standardına göre kimyasal özellikleri Tablo 6.1'de belirtilmiştir.

Tablo 6.1 Zn-Al alaşımlarının kimyasal bileşimleri

| Elementler (% ağr) | ZA- 3 | ZA-5 | ZA-8 | ZA-12 | ZA-27 |
|---|---|---|---|---|---|
| Al | 3.5-4.5 | 3.5-4.3 | 8.0-8.8 | 10.5-11.5 | 25-28 |
| Cu | 0.25 max | 0.75-1.25 | 0.8-1.3 | 0.5-1.2 | 2-2.5 |
| Mg | 0.02-0.05 | 0.03-0.08 | 0.015-0.03 | 0.015-0.03 | 0.01-0.02 |
| Fe (max) | 0.1 | 0.1 | 0.075 | 0.075 | 0.075 |
| Pb (max) | 0.005 | 0.005 | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| Cd (max) | 0.004 | 0.004 | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| Sn (max) | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| *Zn* | Kalan | Kalan | Kalan | Kalan | Kalan |

### 6.4.2 Zn-Al Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri

Tablo 6.2'de Zn-Al alaşımlarından bazılarının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.2 Zn-Al alaşımlarının fiziksel özellikleri

| | ZA-3 | ZA-5 | ZA-8 | ZA-12 | ZA-27 |
|---|---|---|---|---|---|
| Yoğunluk (gr/cm$^3$) | 6.6 | 6.7 | 6.3 | 6.03 | 5 |
| Likidüs Sıcaklığı (°C) | 387 | 386 | 404 | 432 | 484 |
| Solidüs Sıcaklığı (°C) | 381 | 380 | 375 | 377 | 375 |
| 20-100°C arasında Düzlemsel Termal Genleşme Katsayısı (µm/mK) | 27.4 | 27.4 | 23.2 | 24.1 | 26 |
| 20-100°C arasında Özgül Isı (kJ/kg) | 0.419 | 0.419 | 0.435 | 0.450 | 0.525 |
| Termal İletkenlik (W/mK) | 113 | 109 | 115 | 116 | 125.5 |
| 20°C'de IACS % Elektriksel İletkenlik | 27 | 26 | 27.7 | 28.3 | 29.7 |
| 20°C'de Elektriksel Direnç (µΩ.cm) | 6.4 | 6.5 | 6.2 | 6.1 | 5.8 |

### 6.4.3 Zn-Al Alaşımlarının Mekanik Özellikleri

Zn-Al alaşımlarından ZA-3, ZA-5, ZA-8, ZA-12, ZA-27'nin mekanik özellikleri Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3 Zn-Al alaşımlarının mekanik özellikleri

| | ZA-3 | ZA-5 | ZA-8 | ZA-12 | ZA-27 |
|---|---|---|---|---|---|
| Çekme Mukavemeti (MPa) | 283 | 328 | 374 | 400 | 421 |
| Akma Mukavemeti (MPa) | 221 | 269 | 290 | 317 | 379 |
| % Uzama | 10 | 7 | 6-10 | 4-7 | 1-3 |
| Kayma Mukavemeti (MPa) | 214 | 262 | 275 | 296 | 325 |
| Sertlik (HB) | 82 | 91 | 103 | 100 | 119 |
| Darbe Mukavemeti (J) | 58 | 65 | 42 | 29 | 5 |
| 20°C'de kırılma tokluğu (Mpa/m) | 12.3 | - | 12.6 | 14.4 | 20.2 |
| $5*10^8$ çevrimde yorulma Mukavemeti (MPa) | 48 | 56.5 | 103 | 117 | 117 |
| Elastisite Modülü (MPax$10^3$) | 85.5 | 85.5 | - | - | - |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Poisson Oranı | 0.27 | 0.27 | 0.29 | 0.30 | 0.32 |

### 6.5 Zn-Al Alaşımlarının Kullanıldığı Yerler

Zn-Al pres döküm alaşımları aşağıdaki alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

- **Otomotiv Endüstrisinde**

Zn-Al alaşımlarının en geniş kullanım alanı otomotiv endüstrisidir. Otomotiv endüstrisinde, karbüratör, yakıt pompası gövdesi, cam silecek parçaları, hız ölçer iskeleti, panjur, korna ve hidrolik fren parçaları gibi mekanik elemanlar, radyatör ve radyo panjurları, lamba ve alet muhafazaları, direksiyon göbekleri, korna bilezikleri iç ve dış madeni parçalar, alet panelleri ve gövde çerçeveleri gibi mekanik ve dekoratif elemanlar Zn-Al esaslı pres döküm alaşımlarından yapılmaktadır.

- **Elektrik Endüstrisinde**

Elektrik endüstrisinde, çamaşır makinelerinin pek çok parçaları, ateşleyiciler, motor gövdeleri, elektrik süpürgeleri, elektrik sayaçları ve mutfak aletleri yapımında çinko alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır.

- **İş Makineleri ve Hafif Makinelerde**

Pres döküm çinko alaşımlar bu makinelerin birçok parçalarında başarı ile kullanılmaktadır. Örneğin daktilolarda, kaydedicilerde, fotoğraf makinelerinde, kameralarda, yazarkasalarda, kesme makinelerinde, çöp öğütücülerde, benzin pompalarında, mikserler ve asansörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ayrıca takım ve aletlerin birçok parçası da pres döküm çinko alaşımlarından yapılmaktadır. Yine birçok oyuncak ve süs eşyası üretiminde bu alaşımlar büyük boyutlarda kullanılmaktadır.

### 6.6 Zn-Al Alaşımlarının Kullanım Avantajları

Çinko alaşımları çok yönlü bir mühendislik malzemesidir. Başka hiçbir alaşım sistemi; güç kombinasyonu, sertlik, sağlamlık, mukavemet performansı ve ekonomik döküme elverişlilik gibi özellikleri sağlayamaz. Sıralayabileceğimiz

diğer bir özellik ise parça maliyetini düşürmesidir. Çinko alaşımlarının genel özellikleri ve bundan kaynaklanan avantajları ise şunlardır:

1. Uzun yaşam süresi
2. Düşük enerji maliyeti
3. Makinede kolay işlenebilme
4. İnce kaplama özelliği
5. Kolay tamamlanma
6. Kıvılcım önleyicilik
7. Sağlamlık
8. Sertlik
9. Sağlamlık ve yumuşaklık
10. Hassaslık toleransı
11. İşleyiş esnekliği

### 6.7 Zn-Al Esaslı Metal Matrisli Kompozitler

Çinko'nun son kullanım pazarında Zn ve Zn-Al döküm alaşımları önemli bir yer tutmaktadır. Ancak diğer ürünlerin ve proseslerinin sayılarındaki artış Zn esaslı malzemelere uygulanabilirlik ve maliyet açısından alternatif teşkil etmektedir. Özellikle servis sıcaklığı 50-100°C'yi geçen uygulamalar Zn alaşımlarının düşük sürünme mukavemeti ile sınırlandırılır. Yüksek sıcaklıktaki sürünme performansının iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Zn-Al alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili alternatif bir metod MMK teknolojisinden yararlanılarak geliştirilmiştir. Zn-Al alaşımlarının avantajları;

- Daha düşük yoğunluk,
- Daha yüksek tokluk ve yüksek sıcaklıklarda mukavemet,
- İyileştirilmiş termal kararlılık ve sürünme direnci,
- Seçilen takviye tipine bağlı olarak daha iyi ısı iletimi.

Ancak, Zn-Al esaslı kompozit malzemeler oda sıcaklığındaki Zn-Al alaşımlarından daha yüksek ya da eşit seviyede mekanik özelliklere sahip

olmalıdır. Bu kompozit malzemeler, takviyesiz Zn-Al alaşımlarının fiziksel özelliklerini ve boyutsal kararlılıklarını da koruyabilmelidir.

Zn-Al alaşımlarının birçok uygulamalarında ergimiş metalin hızlı yol alması, bitmiş ürünün yüzeyinin düzgün olmasından dolayı basınçlı döküm ve toz metalurjisi yöntemleri kullanılmaktadır.

Zn-Al matrisli kompozit malzemelerin dökületeceği kalıplar iyi döküm karakteristiklerine sahip olmalı ve aynı zamanda bu kompozit malzemelerin üretimi ekonomik ve kolay olmalıdır. Ayrıca kompozit malzemelerin pota ve kalıp malzemeleri ile de reaksiyona girmemesi gerekir. Bu iyileştirilmiş özelliklerin yanı sıra Zn-Al esaslı kompozit malzemelerin, takviyesiz malzemelerin üretimine göre daha düşük maliyetle üretilmesi istenir.

Zn esaslı kompozit malzemelerin üretilmesi 1970'li yıllara dayanır. Son on yılda metal matrisli kompozit teknolojisine genel ilgi artmış ve Zn-Al alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki özelliklerinin iyileştirilmesi ile ilgili çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Son zamanlarda Zn-Al esaslı kompozitlerin üretilmesi için basınç infiltrasyonu, basınçlı döküm ve karıştırmalı döküm gibi üretim metotları geliştirilmiştir (Dionne 1999).

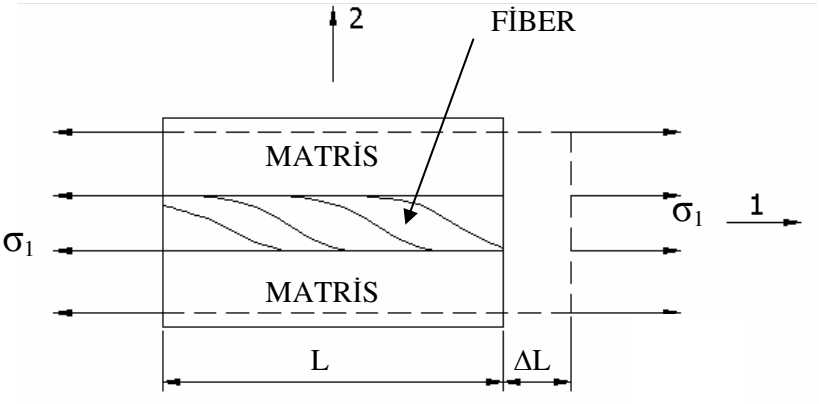
# 7. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİĞİ

## 7.1 Elastiklik Yaklaşımları

Malzeme mekaniğine yaklaşımın ana özelliği etkili bir çözüm elde etmek için kompozit malzemenin mekanik davranışı ile ilgili basitleştirici kabuller yapılmasıdır. Her yaklaşım uygun olmalıdır. Mekanikte, yaklaşımlar keyfi olamaz. En önemli yaklaşım tek eksenli fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber doğrultusundaki uzamalarının matristeki gibi fiberde de aynı olduğudur, Şekil 7.1. Eğer uzamalar aynı değil ise, fiberler ve matris arasında kırılma olduğu ifade edilebilir. Böylece yaklaşım kabul edilebilir bir sebebe sahiptir. Matris ve fiberlerdeki uzamaların aynı olması nedeniyle gerilim uygulamasından önce düzlem olan 1-eksenine normal kesitler, gerilim uygulanması sonrası da düzlem kalırlar. Bahsedilen kiriş, levha ve kabuk teorileri gibi olağan malzemelerin mekaniğinde önemli bir kabuldür. Bu temelde, tek eksenli fiber takviyeli kompozit malzemelerin ortotropik modülleri için malzemenin mekanik özelliklerini türeteceğiz, yani $E_1$, $E_2$, $\nu_{12}$ ve $G_{12}$. Her ifade için basitleştirilen yaklaşımlar kesindir (Güçlü, 2001).

### 7.1.1 Eı'in Belirlenmesi

Belirlenen ilk özellik, kompozit malzemenin 1-doğrultusundaki yani fiber doğrultusundaki elastisite modülüdür.




Şekil 7.1 1-doğrultusunda yüklenen eleman

Şekil 7.1'den;

$$\sigma_1 = \frac{\Delta L}{L} \qquad 7.1$$

burada, $\varepsilon_1$ temel yaklaşıma göre hem fiberlere hem de matrise uygulanır. Eğer kompoziti meydana getiren malzemelerin her ikisi de elastik olarak davranırsa fiber doğrultusundaki gerilimler;

$$\sigma = E_f * \varepsilon_1 \qquad \sigma_m = E_m * \varepsilon_1 \qquad 7.2$$

dir. $\sigma ı$ ortalama gerilimi numunenin A kesiti üzerinde, $\sigma_f$ fiberlerin $A_f$ kesiti üzerinde ve $\sigma m$ matrisin $A_m$ kesiti üzerinde etkilidir. Böylece, kompozit malzeme numunesi üzerinde sonuçlanan kuvvet,

$$P = \sigma_1 * A = \sigma_f * A_f + \sigma_m * A_m \qquad 7.3$$

dir. Denklem (7.2)'nin denklem (7.3)'te yerine konulmasıyla ve makromekanikten,

$$\sigma_1 = E_1 * \varepsilon_1 \qquad 7.4$$

kabulü ile açıkça

$$E_1 = E_f * \frac{A_f}{A} + E_m * \frac{A_m}{A} \qquad 7.5$$

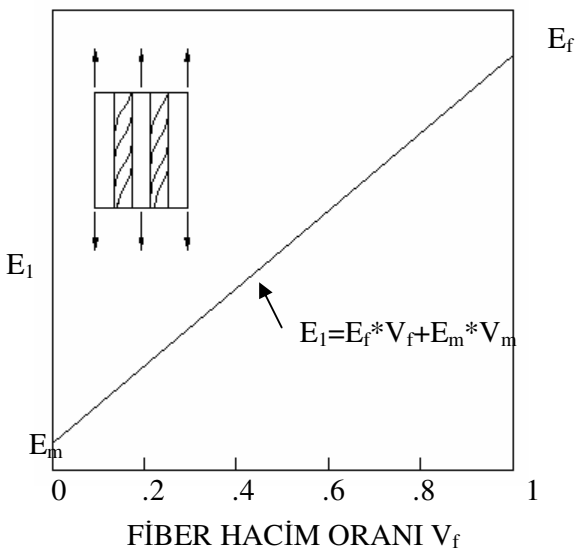
bulunur. Fiberlerin ve matrisin hacim oranları şu şekilde yazılabilir;

$$V_f = \frac{A_f}{A} \qquad V_f = \frac{A_f}{A} \qquad 7.6$$

Böylece

$$E_1 = E_f * V_f + E_m * V_m \qquad 7.7$$

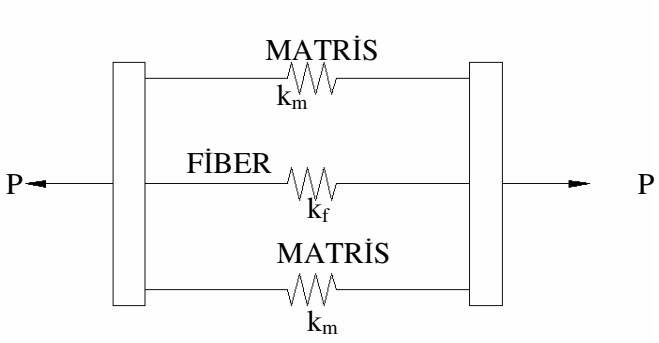
Fiber doğrultusundaki kompozit malzemenin elastisite modülü için karışımlar kuralı olarak bilinen denklem bulunur ve grafik olarak Şekil 7.2'de gösterilmektedir.




Şekil 7.2 Eı'in fiber hacim oranı ile değişimi

Karışımlar kuralı $V_f$ fiber hacim oranı 0'dan 1'e giderken Eı elastisite modülünün $E_m$'den $E_f$'e basit lineer değiştiğini göstermektedir. Fiber modülü tipik olarak çok kere matris modülüdür. Böylece 0.6 civarındaki alışılmış pratik fiber hacim oranlarında, fiber modülü Eı kompozit modülüne hâkimdir. $E_m$'deki geniş değişimler Eı üzerinde çok küçük etkiye sahiptir. Böylece Eı'in, fiberin özelliğine sahip olduğu söylenebilir (Güçlü 2001).

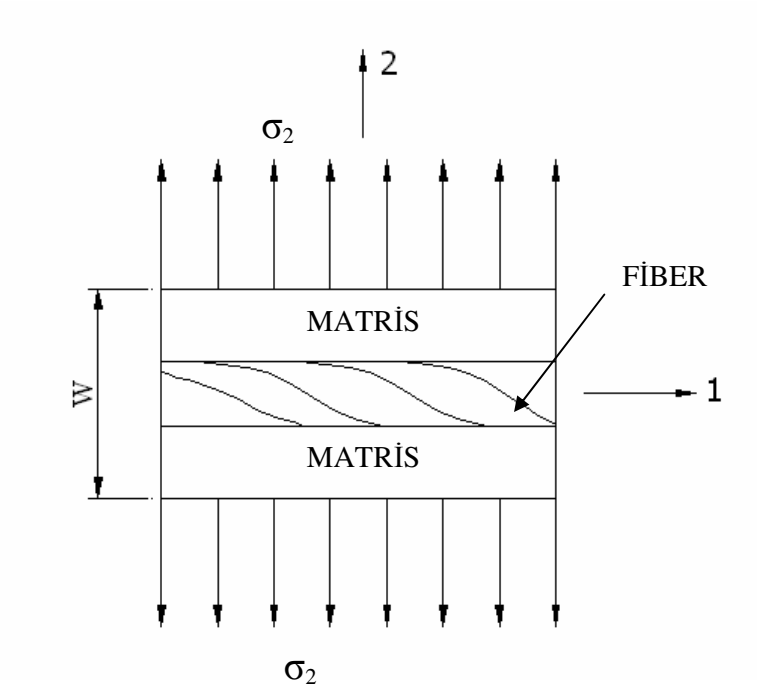
Fiber ve matris arasındaki yük paylaşımı, basit paralel yay modeli olarak Şekil 7.3'te gösterilebilir. Eğer bütün yaylar aynı miktarda deforme edilir (eşit uzama yaklaşımı) ve $k_f >> k_m$ olursa, fiber yayı uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır.




Şekil 7.3 Fiber takviyeli kompozitte yük paylaşımı

### 7.1.2 $E_2$'nin Bulunması

Fiberlere dik doğrultuda kompozit malzemenin elastisite modülü $E_2$ bir sonraki adım olarak ele alınır. Aynı dik doğrultudaki $\sigma_2$ malzemelere mekanik yaklaşımla Şekil 7.4'teki gibi fiber ve matrisin her ikisine birden uygulandığı kabul edilmektedir. Bunun anlamı kompozit malzeme içindeki komşu elementlerin (fiberler ve matris) dengeli olmalarıdır. Bununla birlikte 2-doğrultusunda fiber ve matriste uzamalar üzerine herhangi bir uygun yaklaşım ve öngörü yapılamamaktadır (Güçlü 2001).




Şekil 7.4 2-doğrultusunda yüklenen eleman

Böylece fiber ve matristeki uzamalar gerilmelerden bulunur:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \qquad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \tag{7.8}$$

Dik doğrultudaki uzunluk üzerine, ortalama olarak $\varepsilon_f$ yaklaşık olarak $V_f W$ oysa ki $\varepsilon_m$ yaklaşık $V_m W$ olarak etki etmektedir. Böylece dik doğrultudaki toplam deformasyon;

$$\Delta W = \varepsilon_2 * W = V_f * W * \varepsilon_f + V_m * W * \varepsilon_m \tag{7.9}$$

veya

$$\varepsilon_2 = V_f * \varepsilon_f + V_m * \varepsilon_m \tag{7.10}$$

denklem (7.8)'den uzamaların yerine konulmasıyla

$$\varepsilon_2 = V_f * \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m * \frac{\sigma_2}{E_m} \tag{7.11}$$

olur. Fakat, makroskobik gerilim-uzama ilişkisinden

$$\sigma_2 = E_2 * \varepsilon_2 = E_2 * \left[ V_f * \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m * \frac{\sigma_2}{E_m} \right] \tag{7.12}$$

bulunur. Bunun üzerine

$$E_2 = \frac{E_f * E_m}{V_m * E_f + V_f * E_m} \tag{7.13}$$

olarak fiberlere dik doğrultuda elastisite modülü için malzemelerin mekanik ifadesi bulunur. Denklem (7.13) şu şekilde boyutsuzlaştırılabilir;

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1}{V_m + V_f * \left( E_m / E_f \right)} \tag{7.14}$$

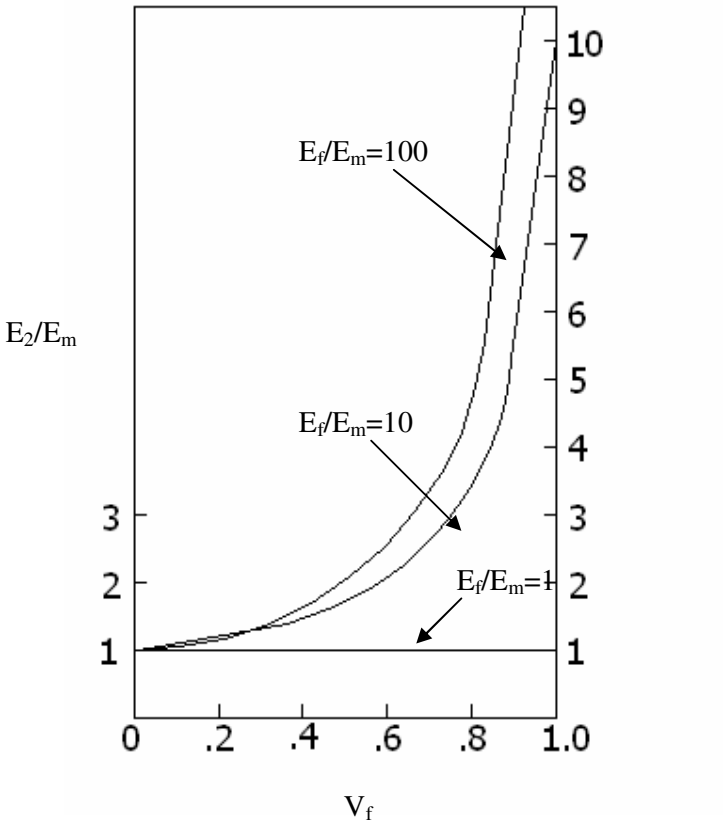
$E_2/E_m$'in değerleri Tablo 7.1'de fiber modülünün matrisinkine oranının üç değişik değeri için verilmiştir.

Tablo 7.1 Çeşitli $E_f/E_m$ ve $V_f$ değerleri için $E_2/E_m$ değerleri

| $\frac{E_2}{E_m}$ | $V_f$ | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 1 | 1.22 | 1.56 | 1.82 | 2.17 | 3.56 | 5.26 | 10 |
| 100 | 1 | 1.25 | 1.66 | 1.98 | 2.46 | 4.80 | 9.17 | 100 |

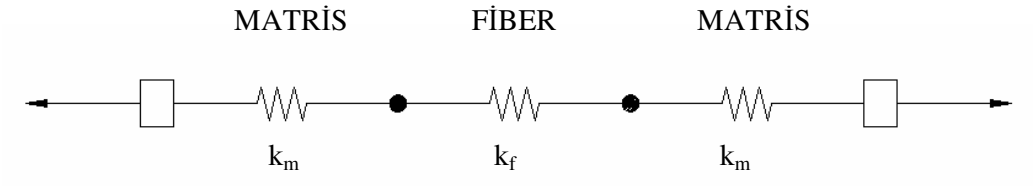
$E_2$ için ifade edilen sonuçlar fiber modülünün matrisin modülüne oranının üç farklı değeri için Şekil 7.5'de çizilmiştir. Eğer $V_f = 1$ ise ifade edilen modül fiberlerinkidir. Bununla birlikte, $\sigma_2$ çekme gerilmesi uygulanması durumunda fiberler arasında kuramsal olarak kusursuz bir bağlanma olduğu kabulü

yapılmaktadır. Eğer $\sigma_2$ bası gerilmesi şeklinde uygulanırsa böyle bir kabul yapılamamaktadır. $E_f = 10 * E_m$ olsa bile dik doğrultudaki $E_2$ modülünün matrisin elastisite modülünün iki katı kadar arttırabilmek için fiberlerin hacminin %50'sinden fazlasına gerekli olduğu görülür. Bunun anlamı, fiberlerin yüzdesi uygulanamaz şekilde yüksek olmadıkça, fiberlerin dik doğrultudaki modüle fazla bir katkıda bulunamayacağıdır. Böylece, $E_2$ kompozit malzeme özelliğinin matrisin özelliğine sahip olduğu söylenebilir (Güçlü 2001).




Şekil 7.5 Fiber hacim oranı ile $E_2$ 'nin değişimi

Basit seri yay modeli Şekil 7.6'da 1-doğrultusunda yüklenmiş numuneyi göstermektedir. Burada, matris esneklik zincirinde yumuşak bağlantılıdır. Böylece, matris için yay esnekliği oldukça düşük alınır. Bu temel üzerinde matris deformasyonunun kompozit malzemenin deformasyonunda hakim olduğu beklenilmelidir.




Şekil 7.6 Fiber takviyeli kompozitte deformasyon paylaşımı

Açıkça bahsedilen türetmelerle ilgili olarak yapılan öngörüler tamamıyla gerçekleşmez. Birbirine uygun olmayan enine uzamalar, Denklem (7.8)'den dolayı fiber ve matris arasındaki sınırda bulunur. Daha fazlası, fiberdeki ve matristeki enine gerilimler, $V_f$'in ve $V_m$'e eşit olmamasından dolayı muhtemelen aynı değildir. Karşılık olarak, fiber ve matris arasındaki sınırın ortasındaki deplasmanların tam bir eşleşmesi, dik doğrultudaki elastisite modülü için kesin bir çözüm oluşturmaktadır. Böyle bir çözüm yalnızca elastisite teorisi kullanılarak bulunabilir. Böyle tutarsızlıkların ciddiyeti yalnızca deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak belirlenebilir.

Bu çözüm üzerine diğer bir inceleme, fiberin ve matrisin Poisson oranları eşit değilse ki muhtemelen farklıdır, boyuna gerilmeler fiber-matris sınırında eşlik eden kayma gerilmesi ile birlikte etki eder. Böyle kayma gerilmeleri doğal olarak bir miktar gerilme seviyeleri altında ortaya çıkacaktır.

### 7.1.3 $\nu_{12}$'nin Bulunması

Poisson oranı olarak bilinen $\nu_{12}$, $E_1$'in analizine benzer bir yaklaşımla bulunur. İlk olarak, Poisson oranı,

$$\nu_{12} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \tag{7.15}$$

olarak $\sigma_1 = \sigma$ ve diğer tüm gerilmeleri sıfır olduğu durum için yazılır. Bu durumdaki deformasyonlar, Şekil 7.7'deki numunede gösterilmektedir. Burada, temel basitleştirme yaklaşımı, $E_1$'e yaklaşımdaki gibi fiber uzamalarının fiber

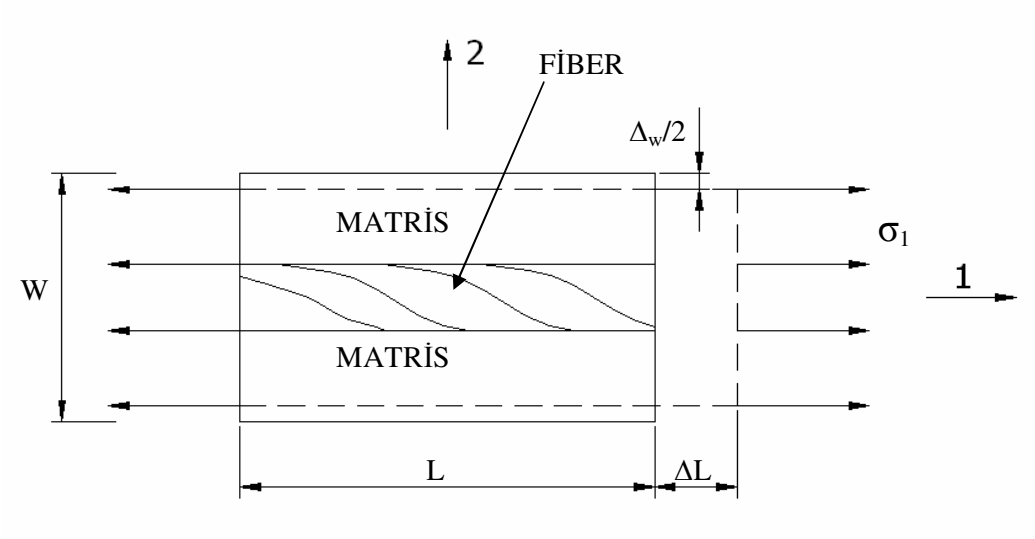
doğrultusundaki matris uzamaların özdeş olduğudur. Dik doğrultudaki deformasyon Δw makroskobik olarak,

$$\Delta W = -W * \varepsilon_2 = W * \nu_{12} * \varepsilon_1 \tag{7.16}$$

dir, fakat aynı zamanda mikroskobik olarak,

$$\Delta w = \Delta_m w + \Delta_f w \tag{7.17}$$

dir.




Şekil 7.7 1-Doğrultusunda yüklenen eleman

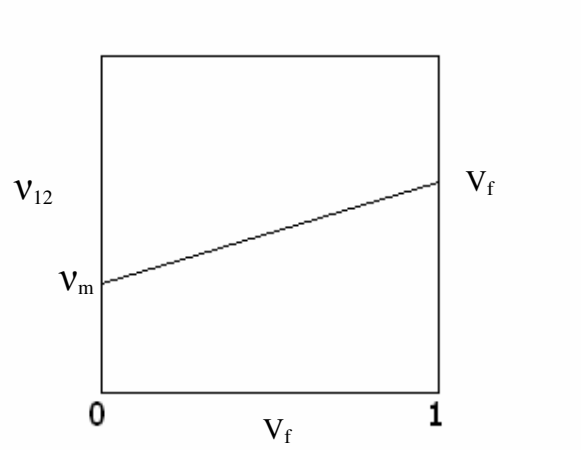
Dik doğrultudaki elastisite modülü $E_2$ için analizin hareket şekli, dik doğrultudaki deformasyonlar $\Delta_m w$ ve $\Delta_f w$ yaklaşık olarak, şunlara eşittir.

$$\Delta_m w = W * V_m * \nu_m * \varepsilon_1 \qquad \Delta_f w = W * V_f * \nu_f * \varepsilon_1 \tag{7.18}$$

denklemler (7.16)-(7.18)'in birleştirilmesi ve $\varepsilon_1 W$ 'ya bölünmesiyle

$$\nu_{12} = \nu_m * V_m + \nu_f * V_f \tag{7.19}$$

Poisson oranı için karışımlar kuralı bulunur ve Şekil 7.8'de $E_1$'e benzer tarzda çizilir. Çünkü Poisson oranları $\nu_m$ ve $\nu_f$ birbirlerinden önemli miktarda farklı değillerdir, kompozit malzemenin Poisson oranı $\nu_{12}$ tarafsızdır, yani ne matrisin hakim olduğu ne de fiberin hakim olduğu durum söz konusudur (Güçlü 2001).




Şekil 7.8 Fiber hacim oranı $V_f$ ile Poisson oranı $\nu_{12}$'nin değişimi

### 7.1.4 $G_{12}$'nin Belirlenmesi

Bir tabakanın düzlem içindeki kayma modülü $G_{12}$, fiber ve matris üzerindeki kayma gerilmelerinin aynı olduğu varsayımıyla malzemelerin mekaniğine yaklaşılır (açık olarak, kayma deformasyonları aynı olamaz). Yükleme Şekil 7.9'daki numune üzerinde gösterilmiştir. Temel varsayımdan dolayı,

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \qquad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \tag{7.20}$$

dir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin tipik doğrusal olmayan kayma gerilmesi-kayma uzaması davranışı önemsenmez, yani davranış doğrusal olarak kabul edilir.

Mikroskobik ölçekte, deformasyonlar Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Göz önünde bulundurulması gereken, matrisin daha düşük kayma modülüne sahip olmasından dolayı kayma sırasında matrisin fiberden daha fazla şekil değiştirmesidir. Toplam kayma deformasyonu şu şekildedir;

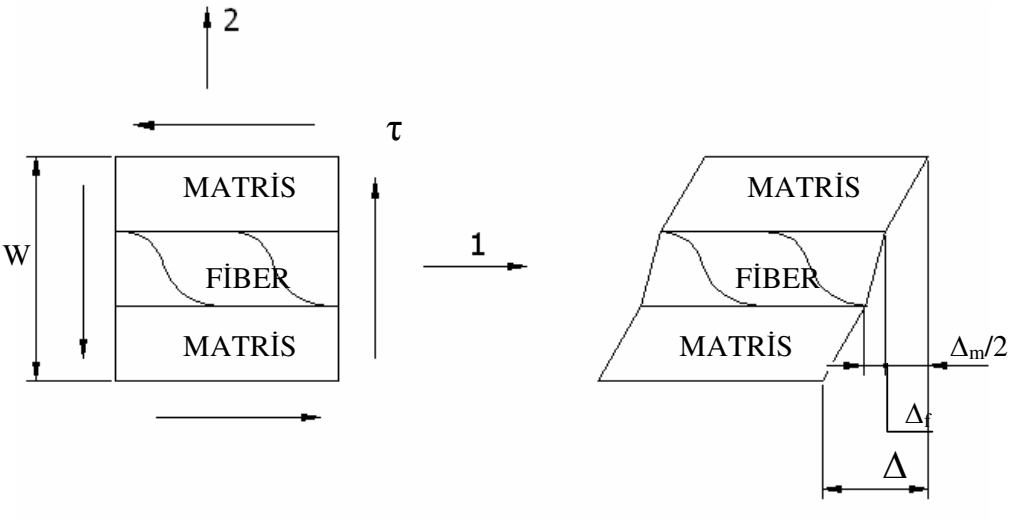
$$\Delta = \gamma * W \tag{7.21}$$

yaklaşık olarak, mikroskobik deformasyonlar,

$$\Delta_m = V_m * W * \gamma_m \qquad \Delta_f = V_f * W * \gamma_f \tag{7.22}$$

dir. Daha sonra $\Delta = \Delta_m + \Delta_f$ 'in W ile bölünmesi ile

$$\gamma = V_m * \gamma_m + V_f * \gamma_f \tag{7.23}$$




(a) kayma gerilmesi yüklemesi (b) kayma deformasyonu

Şekil 7.9 Kayma yüklemesi yapılan eleman

elde edilir ve denklem (7.20)'nin yukarıda konulması ve makroskobik olarak gerçekleştirilmesiyle

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{12}} \tag{7.24}$$

elde edilir. Denklem (7.23) şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{\tau}{G_{12}} = V_m * \frac{\tau}{G_m} + V_f * \frac{\tau}{G_f} \tag{7.25}$$

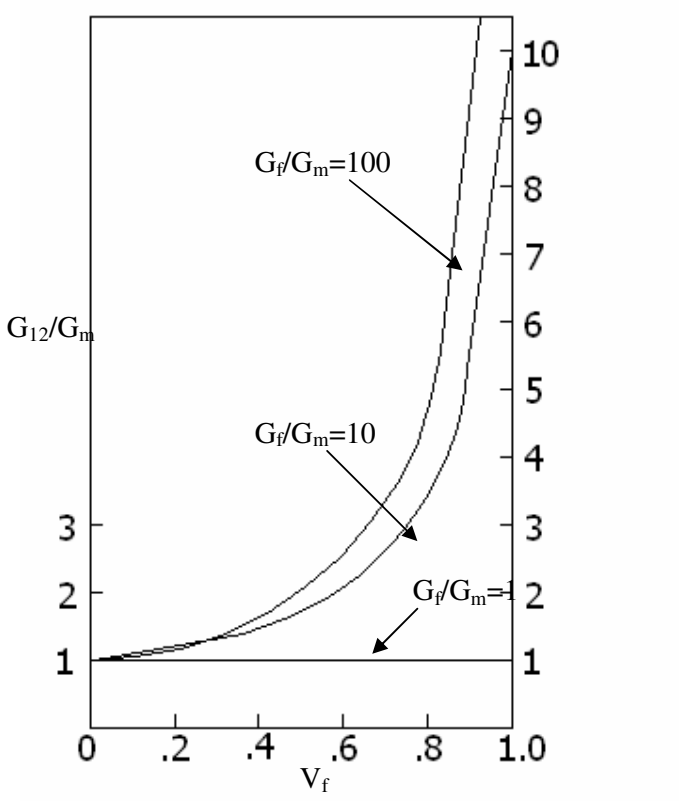
sonuç olarak

$$G_{12} = \frac{G_m * G_f}{V_m * G_f + V_f * G_m} \tag{7.26}$$

bulunur. Bu ifadenin aynısı dik doğrultudaki elastisite modülü $E_2$ için bulunmuştur. $E_2$'deki gibi, $G_{12}$ için olan ifade, modül matris ilişkisi kurularak normalize edilebilir, bu da,

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{1}{V_m + V_f * \left(G_m / G_f\right)} \tag{7.27}$$

dir. $G_f/G_m$'in çeşitli değerleri Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Yalnızca toplam hacmin %50'sinden daha fazla fiber hacmi için $G_f/G_m = 10$ olduğunda $G_{12}$'deki artış $G_m$'e göre iki kat daha fazladır. $E_2$'deki gibi kompozit malzemenin kayma modülü $G_{12}$ matrisin özelliğine sahip olduğu söylenebilir (Güçlü 2001).




Şekil 7.10 Fiber hacim oranı $V_f$ ile $G_{12}$'nin değişimi

### 7.1.5 Eğilme Elastisite Modülü ($E_e$) ve Eğilme Dayanımı ($\sigma_e$)

Eğilme dayanımı, üç noktadan eğme testine tabi tutulmuş bir numunede, eğme kuvveti cinsinden ifade edilecek olursa;

$$\sigma_e = \frac{3PS}{2BW^2} \qquad \text{ve} \qquad \varepsilon = \frac{6\delta W}{L^2} \tag{7.28}$$

Burada, P uygulanan maksimum kuvvet, S, mesnetler arası mesafe, B, malzeme kalınlığı, W, malzeme genişliği, ε ise eğilme miktarına bağlı olarak elde edilen birim şekil değiştirmedir.

Eğilme elastiste modülü ise denklem 7.28'den hareketle Hook kanunundan yararlanarak, yine üç noktadan eğme testine tabi tutulmuş dikdörtgen kesitli bir malzeme için şu şekilde bulunur;

$$E_e = \frac{PS^3}{4BW^3\delta} \tag{7.29}$$

Burada, δ, eğilme miktarını (sehim) ifade etmektedir (Kayalı, Ensari, Dikeç 1983).

Eğilme elastisite modülü, yük ve deplasmanın bir fonksiyonudur. Denklem 7.29'daki yük ve deplasmanın haricindeki değerler boyut ile ilgili olduğundan sabit olarak alınabilir ve k katsayısı ile ifade edilecek olursa;

$$k = \frac{S^3}{4BW^3} \tag{7.30}$$

$$E = k\frac{P}{\delta} \tag{7.31}$$

elde edilir. Burada $\frac{P}{\delta}$, yük-deplasman grafiğinin doğrusal kısmının eğimi, k ise tamamen numune boyutlarına bağlı geometrik bir faktördür.

## 7.2 Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniğinin en önemli yönü, gerilme altındaki malzemelerde çatlak ve gerilme konsantrasyonunu artırıcı faktörleri göz önüne alarak kırılma problemlerinin incelenmesidir. Makine ve konstrüksiyonlarda kullanılan

malzemelerin çoğunda imalat sırasında meydana gelen mekanik çatlaklar olabilir. Malzemelerin üretimi sırasında da çeşitli nedenlerden dolayı kılcal çatlaklar bulunabilir. Bu çatlaklar civarında gerilme konsantrasyonu oluşur ve kırılmaya sebep olur. Gerilme konsantrasyonu sebebiyle meydana gelen çatlaklar, kullanılan malzemenin akma gerilmesinden daha düşük gerilmelerde de olabilir. Yapısında kılcal çatlaklar ve plastik deformasyona uğrayan iri boşluk ihtiva eden malzemeler genellikle gevrek kırılma gösterirler (Kayalı 1983).

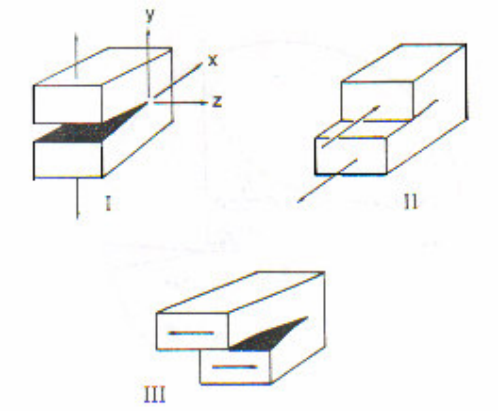
Metalik malzemelerin öncelikle gevrek kırılma karakterini inceleyen teoriler ve deneyler geliştirilmiştir. Bir konstrüksiyon mühendisi veya kırılma ile yakından ilgilenen araştırmacılar için bu deneyler yeterli olmamaktadır. Kırılma mekaniği analizi ile hem malzemenin hasar nedeni anlaşılabilir, hem de imalat ve kullanılma sırasında herhangi bir çatlağın teşekkülü önlenebilir.

Kırılma mekaniğinde kırılma ile ilgili parametreler kırılma tokluğu (Fracture toughness) veya gerilme şiddet faktörü (GŞF) dür. Gerilme şiddet faktörü, "K" sembolü ile ifade edilir. Gerilme şiddet faktörü K, çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır.

Bir malzemenin kırılma tokluğu malzemede çatlak mevcutken yük taşıyabilme kapasitesi veya plastik olarak deforme olabilmesi diye tanımlanabilir. Malzeme tokluğu, düzlem gerilme şartlarında ($K_C$), düzlem deformasyon şartlarında ($K_{IC}$) kritik gerilme şiddet faktörü ile ifade edilebilir. Bu davranışlar, Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinde (LEKM) geçerlidir.

### 7.2.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağlı hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 7.12'de üç tip davranış görülmektedir.




Şekil 7.12 Çatlak ilerleme modları I.açılma modu, II.kayma modu, III.yırtılma modu

Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar

İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur ( Irwin 1957). Çatlak ucundaki gerilme şiddet faktörleri her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

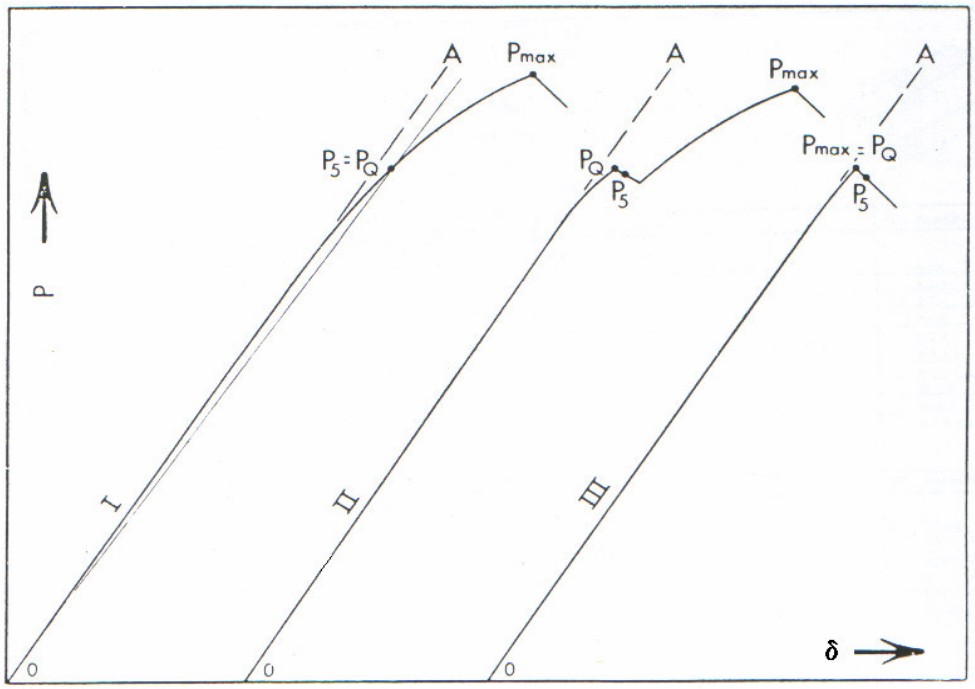
$$K_I = \sigma_i\sqrt{\pi a}\,, \qquad K_{II} = \tau_{ii}\sqrt{\pi a} \qquad K_{III} = \tau_{iii}\sqrt{\pi a} \qquad (7.32)$$

Burada, $K_I$, $K_{II}$ ve $K_{III}$ sırasıyla mod I, mod II ve mod III'e göre gerilme şiddet faktörleridir.

### 7.2.2 Başlangıç Çentik Derinliği Metodu

Lineer elastik kırılma mekaniğinde, malzeme çok gevrek olduğundan çatlak ilerleme miktarı net gözlenmektedir. Dolayısıyla böyle bir malzemenin kritik gerilme şiddet faktörünü tespiti ve farklı çentik derinliklerindeki kırılma

davranışının incelenebilmesi için bu metot kullanılmaktadır. ASTM E-399 tavsiyesine göre, geçerli bir $K_I$ değeri için kritik yük Şekil 7.13'te verilen yük deplasman eğrilerinden hangisine uygunsa ona göre seçilir.




Şekil 7.13 Tipik yük-deplasman grafiği

Bu çalışmada elde edilen grafikler genellikle Tip I' e benzemektedir. Dolayısıyla burada kritik yük olarak $P_5$ alınması gerekir ancak maksimum yük alındığı takdirde $K_{IC}$ değeri çok az yüksek çıkacağından, $P_{max}$ değeri kullanılabilmektedir (Vipulanandan ve Dharmarajan 1985). Mod I'e göre gerilme şiddet faktörü $K_I$, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$K_I = \sigma\sqrt{a}\, f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{7.33}$$

Burada σ, net gerilme, a başlangıç çentik derinliği, f(a/W) geometri faktörüdür ve denklem 7.34'te verilmiştir. σ ise üç noktadan eğme testi için, aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma = \frac{3PS}{2BW^2} \tag{7.34}$$

Burada, P kritik yük, S mesnetler arası mesafe (üç noktadan eğme testi için), B malzeme kalınlığı ve W malzeme genişliğidir. $K_{IC}$ değeri kiriş kalınlığı ve a/W değerinden bağımsızdır.

# 8. DENEYSEL ÇALIŞMA

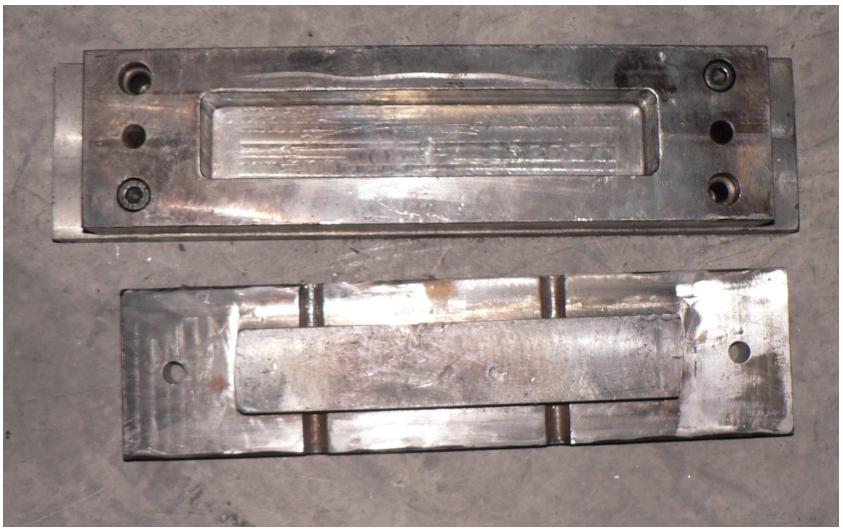
## 8.1 Malzemelerin Tanıtımı

Bu çalışmada galvaniz kaplı sürekli çelik tel takviyeli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Malzeme üretiminde 50 ton kapasiteli hidrolik pres ve kalıptan oluşan düzenek hazırlanıp basınçlı döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.1'de numune üretiminde kullanılan hidrolik presin ve Şekil 8.2'de ise kalıbın resmi görülmektedir.

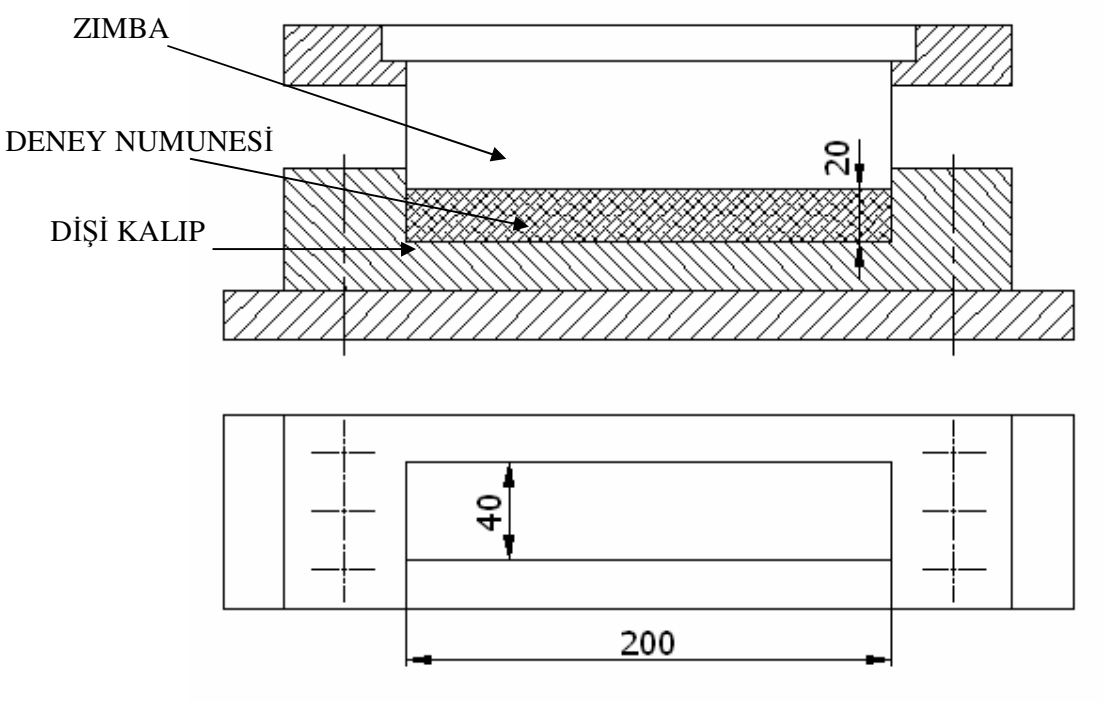
Şekil 8.3'te basınçlı döküm işlemini gerçekleştirmek için hazırlanmış olan döküm kalıbının şematik resmi görülmektedir. Kalıp üzerindeki zımba ve dişi kalıp için H13 sıcak iş kalıp çeliği kullanılmıştır.




Şekil 8.1 Numune üretiminde kullanılan hidrolik pres



Şekil 8.2 Döküm kalıbı




Şekil 8.3 Döküm kalıbının şematik resmi

Kompozit malzeme üretiminde fiber olarak 1.5 mm çapında çekme dayanımı 480 MPa, % uzaması 4.5 ve % kesit daralması 12 olan galvaniz kaplı sürekli çelik tel kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak bu galvaniz kaplı telin

seçilmesinin sebebi matris malzemesi ile iyi bir ara yüzey oluşturacağı ve iyi bir tutunma sağlayacağıdır. Şekil 8.4'te takviye malzemesi olarak kullanılan telin resmi görülmektedir. Matris malzemesi olarak da arttırılmış sürünme direnci, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, düşük yoğunluk, mukavemet/ağırlık oranının yüksek olması, iyi aşınma özelliklerine sahip olması, iyi dökülebilirlikleri ve düşük ergime sıcaklıkları sebebiyle Zn-Al alaşımlarından ZA-5 kullanılmıştır. Matris malzemesi Cem Metal Tic. Ve San. Ltd. Şti. İSTANBUL'dan alınmış olup, tedarikçi firmanın vermiş olduğu malzeme analiz raporunda belirtilen ZA-5'in kimyasal özellikleri Tablo 8.1'de verilmiştir.



Şekil 8.4 Galvaniz kaplı çelik telin resmi

Tablo 8.1 ZA-5'in kimyasal özellikleri

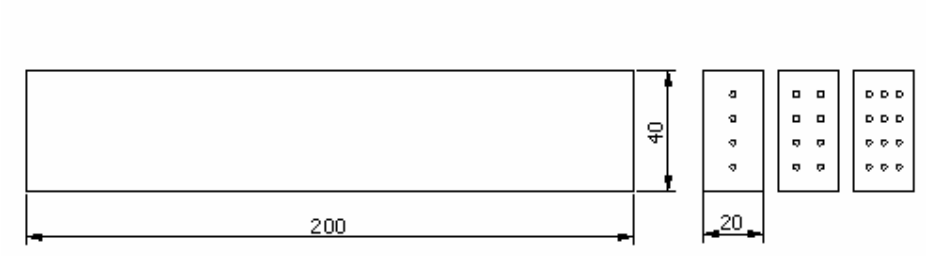
| Zn | Cu | Al | Mg | Fe | Pb | Sn | Mn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 95.03 | 0.98 | 3.91 | 0.054 | 0.017 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |

**8.2 Deney Numunelerinin Hazırlanışı**

Bu çalışmada ZA-5 matris malzemesi ile galvaniz kaplı sürekli çelik tel birleştirilerek kompozit bir malzeme üretilmiştir. Deney numuneleri ASTM E-399 standartlarına göre 20x40x200 mm ebatlarında üretilmiştir. Takviyesiz, 4, 8 ve 12 tel takviyeli olmak üzere dört deney parametresi belirlenmiştir. Numuneler basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiştir.

1.5 mm çapındaki galvaniz kaplı sürekli çelik teller hacimce %1, %2 ve %3 oranlarında matris malzemesi içerisine yerleştirilmiştir. Takviyeli numunelerdeki çelik tellerin dizilişi sırasıyla 4x1 (4 tel), 4x2 (8 tel) ve 4x3 (12 tel) oryantasyonundadır. Şekil 8.5'te çelik tel takviyeli numunelerin şematik resmi görülmektedir.

Öncelikle döküm kalıbı hazırlanmıştır. Üst kalıp ve alt kalıptan oluşan döküm kalıbı H13 sıcak iş kalıp çeliğinden hazırlanmış olup, döküm kalıbının hazırlanması ve numunelerin üretimleri ALTUN DÖKÜM AŞ'de yapılmıştır. Döküm işlemine başlamadan önce takviye malzemesi tellerin kalıp içerisine yerleştirilmesinde kullanılmak üzere 5 mm kalınlığında dekape sacdan 20x40 ebatlarında numune sayısı kadar kesildi. Bu kesilen saclara teller sırasıyla Şekil 8.5'de görüldüğü gibi yerleştirildi. Bu hazırlanan takviye malzemeleri kalıp boşluğuna yerleştirildi. Matris malzemesi pota içerisinde 500ºC kalıplama sıcaklığına kadar eritildi. Sıcaklığın takibi içinde termokupul ile sıcaklık kontrol edildi. Önce döküm kalıbının tüm yüzeyleri kompozit malzemenin kalıp içerisinden kolay çıkabilmesi için yağlandı. Daha sonra kalıbın kalıplama boşluğu 100ºC'ye kadar ısıtıldı. Kalıbın sıcaklığı da termokupul ile kontrol edildi. Sıcaklıklar sağlandıktan sonra döküm işlemine geçildi. Numune ebatlarına göre hacimdeki matris malzemesi tartılarak, parşömen ile kalıplama boşluğuna doğrudan boşaltıldı ve 30 sn süresince kalıba 50 tonluk basınç uygulandı. Bu işlemin yapılmasının sebebi uygulanan basıncın hem ısı akış hızını arttırması hem de makro/mikro büzülme gözenekliliğini azaltmasıdır. Basınç uygulama işlemi bittikten sonra numuneler 5 dk kalıp içerisinde soğuması için bekletildi ve kalıp içerisinden çıkartılan numuneler suda soğutuldu. Böylece Şekil 8.2'de boyutları verilen numuneler üretilmiş oldu.




Şekil 8.5 Çelik tel takviyeli numunelerin şematik resmi

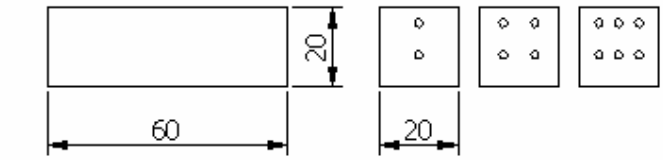
### 8.2.1 Üç Noktadan Eğme Deneyi Numuneleri

Üç noktadan eğme deneyi numuneleri Şekil 8.5'te gösterildiği gibi ASTM E-399 standardına uygun olarak 20x40x200 mm boyutlarında üretilmişlerdir. Kalıptan çıkan numunelere herhangi bir talaşlı işlem uygulanmamış olup kalıp boşluğu numune ölçülerine göre üretilmiştir.

Deneyin sıhhati için her bir numuneden üçer tane üretilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Malzeme parametresi olarak sırası ile takviyesiz, 4, 8 ve 12 adet çelik tel takviyeli olmak üzere 4 çeşit ve her bir numuneden 3'er adet olmak üzere 24 adet numune üretilmiştir.

### 8.2.2 Basma Deneyi Numuneleri

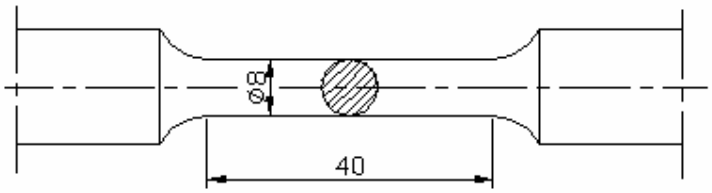
Basma dayanımını bulmak için basma testi yapılacak numuneler, Şekil 8.6'de görüldüğü gibi kalıptan çıkan numunelere talaşlı işlem uygulamak suretiyle 20x20x60 boyutlarında üretilmiştir. Takviyesiz, 4 tel takviyeli, 8 tel takviyeli ve 12 tel takviyeli numunelerden 3'er adet olmak üzere toplam 12 adet numune hazırlandı.




Şekil 8.6 Basma numunelerinin şematik resmi

### 8.2.3 Çekme Deneyi Numuneleri

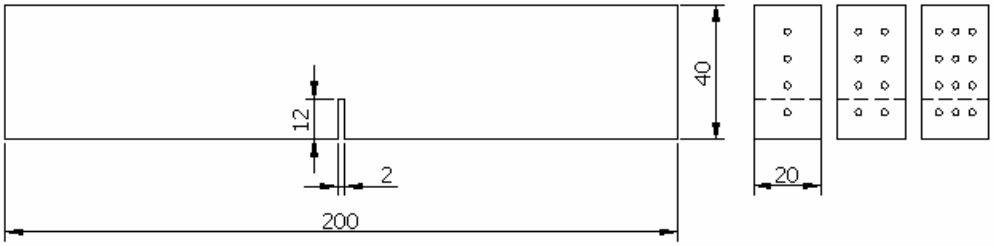
Çekme dayanımını bulmak için takviyesiz ve tek tel takviyeli numuneler Şekil 8.7'deki ölçülerde üretilmişlerdir. Takviyesiz numuneden 3 adet, bir tel takviyeli numuneden 3 adet olmak üzere, toplam 6 adet numuneye çekme testi uygulanmıştır.




Şekil 8.7 Çekme numunelerinin şematik resmi

### 8.2.4 Çentikli Üç Noktadan Eğme Deney Numuneleri

Çentikli eğme testi yapılacak numuneler ASTM E-399 standardına uygun olarak 20x40x200 mm boyutlarında takviyesiz, 4, 8 ve 12 tel takviyeli olmak üzere her birinden 3 adet olarak toplam 12 adet numune kalıpta üretilmiştir. Kalıptan çıkan numunelere 2 mm kalınlığındaki elmas testere kullanılarak tüm numunelere 12 mm derinliğinde çentikler açıldı ve Şekil 8.8'de çentikli




numunelerin şematik resmi gösterilmektedir.

Şekil 8.8 Çentikli numunelerin şematik resmi

### 8.3 Deney Cihazının Tanıtımı ve Deneyin Yapılışı

Hazırlanan numunelere üç noktadan eğme testi, basma testi ve çekme testi uygulandı. Üç noktadan eğme ve çekme deneyleri Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Ölçme Laboratuvarı'nda Şekil 8.9'da görülen LLOYD INSTRUMENTS T50 K model deney cihazında oda sıcaklığında 0.1 mm/dk sabit ilerleme hızında yapıldı.



Şekil 8.9 Deney cihazının fotoğrafı

Önce deney cihazında üç noktadan eğme testi yapıldı. Bu testi yapabilmek için cihaza eğme testi aparatı yerleştirildi. Üç noktadan eğme testi için numunelere mesnet arası mesafe 160 mm olacak şekilde ortadan kuvvet uygulandı. Takviye sayısına göre; takviyesiz, 4, 8 ve 12 adet tel takviyeli ve her birinden 3 adet numune olmak üzere toplam 12 adet numuneye eğme testi uygulandı.

Çekme testi, Şekil 8.10'da görüldüğü gibi eğme testinin yapıldığı cihazda yapıldı. Deney cihazına çekme testi aparatları takılarak çekme deneyi gerçekleştirildi. Numuneler takviyesiz ve bir tel takviyeli olarak olmak üzere her bir numuneden 3 adet olarak toplam 6 adet numuneye çekme testi uygulandı.




Şekil 8.10 Çekme deney cihazının fotoğrafı

Basma testi Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda PRÜFF UND MESS-MFL SYSTEME marka üniversal test cihazında yapıldı. Cihaza basma testini yapacak aparatlar takıldı ve numunelere basma kuvveti uygulandı. Basma kuvveti etkisindeki numunelerde kırılma olduğu andaki kuvvet değerleri tezgâh üzerinden okundu. Her bir deney numunesinden 3 adet olmak üzere 12 adet numune basma testine tabi tutuldu.

Ayrıca numunelerin $E_1$, $E_2$ ve $\nu_{12}$ değerlerinin tespiti için numunelere 0º-45º ve 90º açılarında strain gage yapıştırılarak elastik bölgedeki şekil değişimleri bulundu. Bu deney için de her bir numuneden 1 adet kullanıldı.

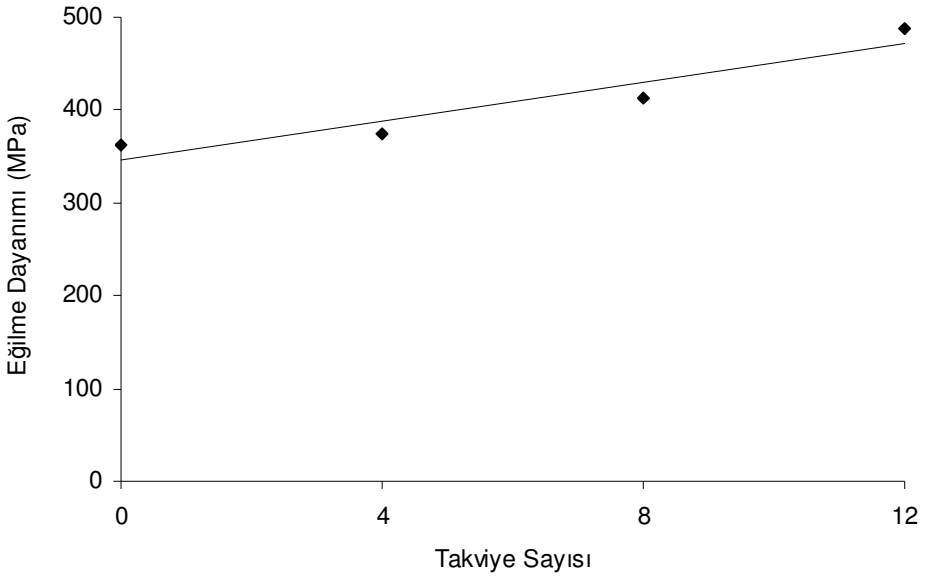
Çentikli eğme testi yapılacak numunelere, 2 mm kalınlığındaki elmas testere ile 12 mm derinliğinde çentikler açıldı.

# 9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

## 9.1 Takviye Oranı ile Eğilme Dayanımı ve Eğilme Elastisite Modülü Değişimi

Çelik tel takviyeli ZA–5 alaşımının mekanik özelliklerinin bulunması için 4, 8 ve 12 adet çelik tel takviyesi kullanıldı. Her tip numunenin mekanik özelliklerini belirlemek için, oda sıcaklığında, çentiksiz üç noktadan eğme testi uygulandı. Her bir deney üç kez tekrarlanarak, her üç test sonucunun ortalama değerleri kullanıldı.

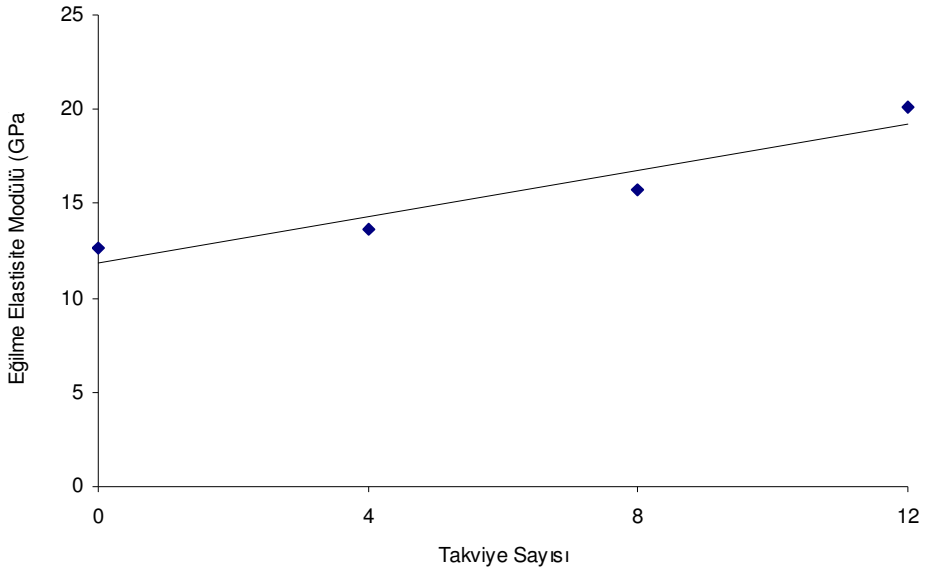
Numunelerin eğilme dayanımları ve eğilme elastisite modülleri, denklem 7.28 ve 7.29 kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 9.1'de görüldüğü gibi eğilme dayanımı, takviye oranının artışı ile lineer olarak artış göstermiştir. Maksimum eğilme dayanımı, 12 adet tel takviyeli numuneden elde edilmiştir.




Şekil 9.1 Çelik tel takviye sayısı ile eğilme dayanımının değişimi

Takviye oranının artışı ile eğilme dayanımı lineer olarak artış göstermektedir. Eğilme dayanımı maksimum değere, 12 tel takviyeli numunede ulaşmaktadır. Çelik tel takviye oranlarının 4, 8 ve 12 adet şeklinde artması,

eğilme dayanımı sırasıyla, takviyesiz malzemeye göre %3, %14 ve %35 artış sağlamıştır.




Şekil 9.2 Çelik tel takviye sayısı ile eğilme elastisite modülünün değişimi

Takviye oranının artışı ile eğilme elastisite modülü lineer olarak artış göstermektedir. Eğilme elastisite modülü maksimum değere, 12 tel takviyeli numunede ulaşmaktadır. Çelik tel takviye oranlarının 4, 8 ve 12 adet şeklinde artması, eğilme elastisite modülünde sırasıyla, takviyesiz malzemeye göre %9, %25 ve %60 artış sağlamıştır.

## 9.2 Takviye Oranı ile Eğilme Kuvvet-Deplasman Eğrilerinin Değişimi

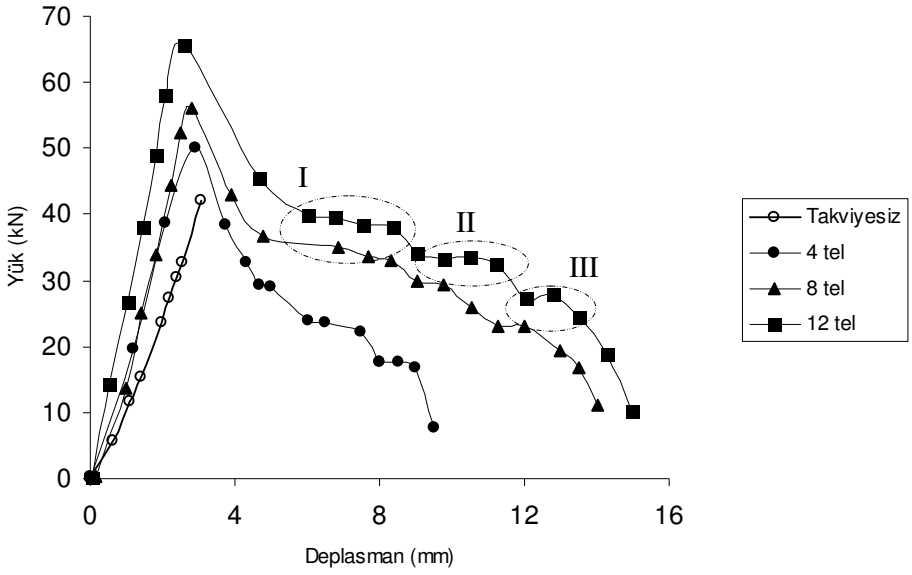
4, 8 ve 12 adet çelik tel takviyeli çentiksiz numunelerin, yük-deplasman eğrileri Şekil 9.3'de görülmektedir. Çelik tel takviye sayısı arttıkça, kompozit sistemin yük taşıma kapasitesi de artmaktadır.

Çentiksiz eğme testi, malzemenin eğilme dayanımı ve eğilme elastisite modülü gibi mekanik özeliklerinin tespiti için kullanılmaktadır. Şekil 9.3'te,

takviyesiz numunenin, yük maksimum değere ulaştığı anda aniden kırıldığı görülmektedir.

Şekil 9.3'te, 12 adet çelik tel takviye sayısında; yük maksimum değere ulaştıktan sonra matris çatlaması nedeniyle yük aniden düşmektedir. Matristeki çatlak kararsız bir şekilde ve doğrusal olarak başa kadar ilerlemektedir.

Şekil 9.3' te, kararsız çatlak ilerlemesinden kaynaklanan ani düşüşten sonraki I nolu bölgede, en alt sıradaki telin sıyrılması ve uzama göstermesi nedeniyle, kuvvet hemen hemen sabit kalarak deplasman artmıştır. II nolu bölgedeki düzlük, I nolu bölgeye nazaran daha küçük, III nolu bölgede ise en küçük düzlük oluşmuştur. Bunun sebebi, en alt sıradaki telde en fazla sıyrılma olduğundan uzama en büyük, orta sıradaki telde daha az ve en üst sıradaki telde en küçük uzama söz konusudur. 4 ve 8 sıra tel takviyeli malzemelerde de benzer karakteristik davranış görülmektedir.

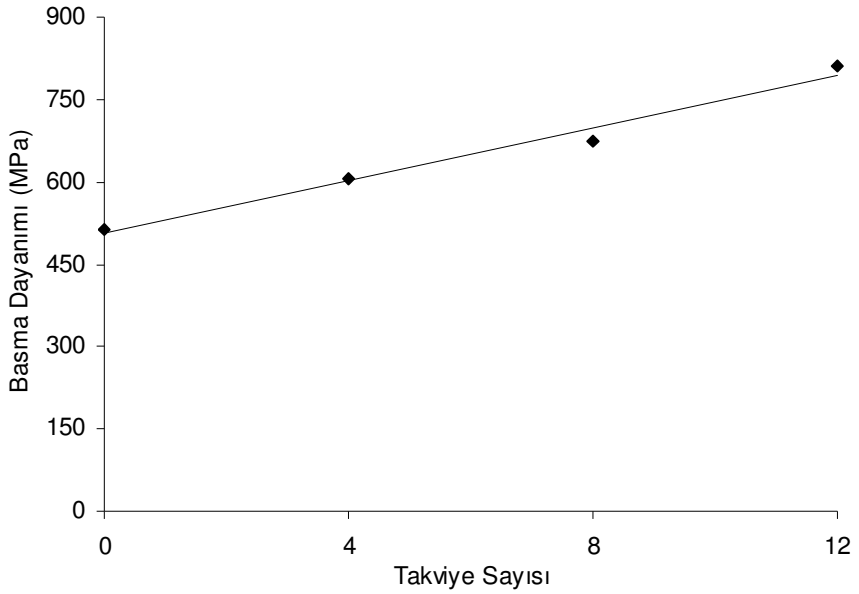



Şekil 9.3 Çentiksiz numunelerin yük-deplasman değişimi

**9.3 Takviye Sayısı ile Basma Dayanımının Değişimi**

Çelik tel takviyeli ZA-5 alaşımının basma dayanımının bulunması için 4, 8 ve 12 adet çelik tel takviyesi kullanıldı. Her tip numuneye oda sıcaklığında basma deneyi uygulandı. Numuneler kare kesitli olarak hazırlandı.

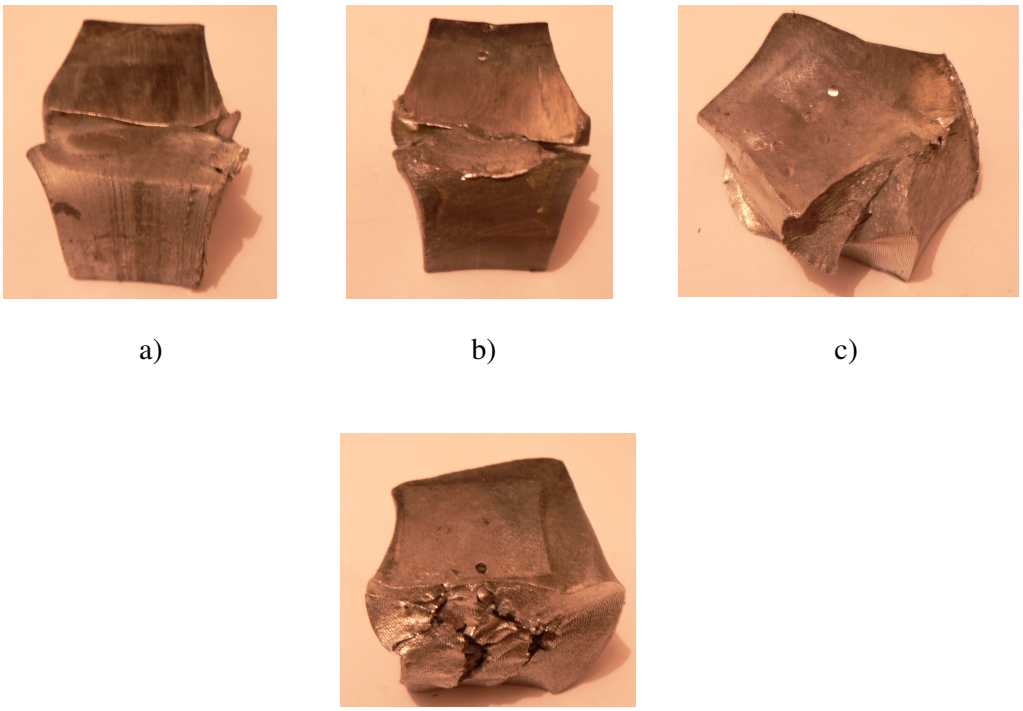
Numunelerin basma dayanımları hesaplandı. Şekil 9.4'te görüldüğü gibi basma dayanımı, takviye oranının artışı ile lineer olarak artmıştır. Maksimum basma dayanımı, 12 adet tel takviyeli numuneden elde edilmiştir.




Şekil 9.4 Takviye sayısı ile basma dayanımının değişimi

Takviye oranının artışı ile basma dayanımı lineer olarak artış göstermektedir. Basma dayanımı maksimum değere, 12 tel takviyeli numunede ulaşmaktadır. Çelik tel takviye oranlarının 4, 8 ve 12 adet şeklinde artması, basma mukavemeti sırasıyla, takviyesiz malzemeye göre %18, %32 ve %58 artış sağlamıştır.

Basma deneyi sonucunda parçalarda kırılma, kayma ile numunenin iki parçaya ayrılması şeklinde olmuştur. Numunelerde görülen deformasyon şekilleri Şekil 9.5'te gösterilmiştir.



a) b) c)

d)

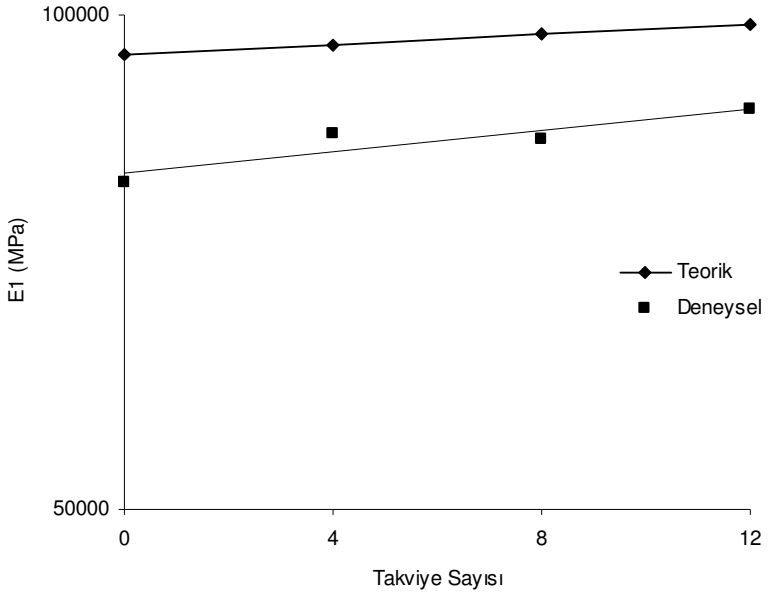
Şekil 9.5 Numunelerde görülen deformasyon şekilleri a) takviyesiz, b) 4 tel takviyeli, c) 8 tel takviyeli, d) 12 tel takviyeli numune

### 9.4 Takviye Sayısına Göre $E_1$, $E_2$ ve $\nu_{12}$'nin Bulunması

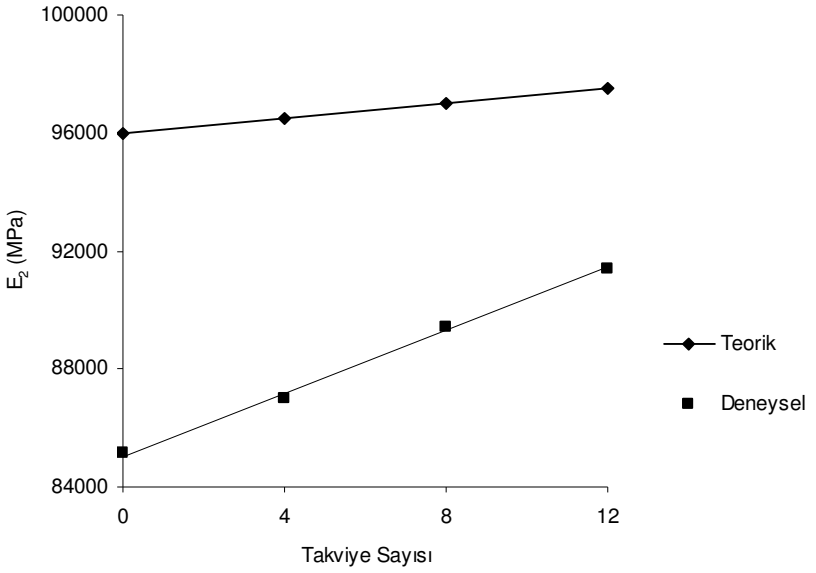
20x40x60 mm boyutlarındaki numunelere 0º-45º ve 90º aralıklarla strain gage yapıştırılarak, elastik bölgedeki elde edilen şekil değişimleri Tablo 9.1 'de verilmiştir. Bu değerlerden faydalanılarak, $E_1$, $E_2$, ve $\nu_{12}$ değerleri sırasıyla denklem 7.7, 7.14 ve 7.15 kullanılarak hesaplanmış ve $E_1$, $E_2$, ve $\nu_{12}$'nin takviye sayısına göre değişimleri Şekil 9.6, Şekil 9.7 ve Şekil 9.8'de belirtilmiştir.

Tablo 9.1 Elastik bölgedeki 1 ve 2-doğrultusundaki şekil değişimleri

| | Takviyesiz | 4 tel takviyeli | 8 tel takviyeli | 12 tel takviyeli |
|---|---|---|---|---|
| $\varepsilon_1$ (x$10^{-6}$) | 601.54 | 567.86 | 571.43 | 552.49 |
| $\varepsilon_2$ (x$10^{-6}$) | 171.44 | 160.14 | 143.43 | 129.83 |

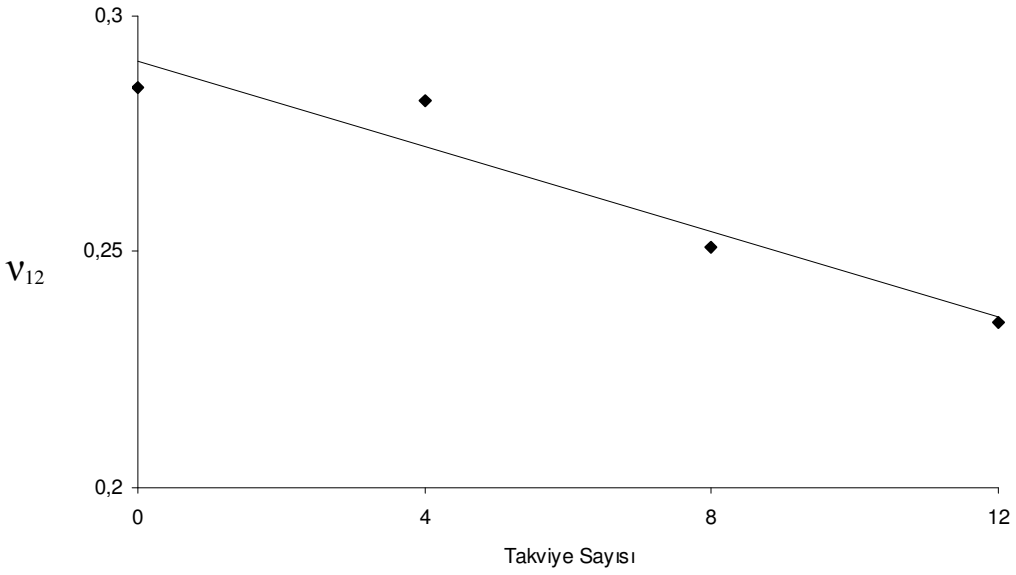



Şekil 9.6 Takviye sayısına göre $E_1$'in değişimi




Şekil 9.7 Takviye sayısına göre $E_2$'nin değişimi

Deneysel olarak bulunan değerler ile teorik olarak hesaplanan $E_{1,}$ ve $E_2$ değerleri paralellik arz etmektedir. Değerlerin teorik değerlerden düşük çıkmasının sebebinin ise döküm şartlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Şekil 9.8 Takviye sayısına göre $\nu_{12}$'nin değişimi

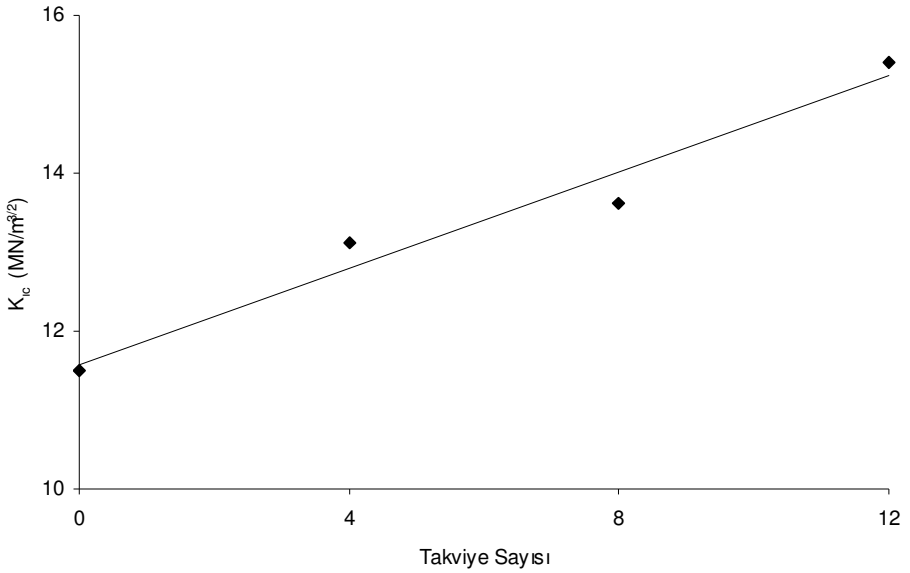
## 9.5 Kritik Gerilme Şiddet Faktörlerinin Bulunması

Kritik gerilme şiddet faktörlerini ($K_{IC}$), hesaplamak için başlangıç çentik derinliği, J-integral ve kompliyans gibi metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada lineer elastik kırılma parametreleri, ASTM E-399'a göre üç noktadan eğme testi yapılarak bulunmuştur.

### 9.5.1 Başlangıç Çentik Derinliği Metoduna Göre $K_{IC}$'nin Bulunması

Takviyesiz ZA-5 alaşımı tamamen lineer elastik davranış gösterdiğinden dolayı ilk yüklemede, yük maksimum değere ulaştığı anda aniden kırılma görülmektedir. Bu metoda göre $K_{IC}$ değerleri, denklem 7.35 kullanılarak bulunmuştur.

Şekil 9.9'da, başlangıç çentik derinliği metoduna göre hesaplanan $K_{IC}$ değerlerinin takviye sayısına göre değişimleri verilmiştir. $K_{IC}$'de, takviyesiz malzemeye göre; sırasıyla %14, %18.5 ve %34 'lük artış gözlenmiştir.




Şekil 9.9 Takviye sayısına göre kritik gerilme şiddet faktörünün değişimi

## 9.6 Çelik Tel Takviyeli Zamak–5 Alaşımının Mekanik Özellikleri

Yapılan deneyler sonucu bulunan takviyesiz, 4, 8 ve 12 tel takviyeli Zamak-5 alaşımının mekanik özellikleri Tablo 9.2'de verilmiştir.

Tablo 9.2 Takviyesiz ve Sürekli Çelik Tel Takviyeli Zamak–5 Alaşımının Mekanik Özellikleri

| | Takviyesiz | Bir tel takviyeli | 4 tel takviyeli | 8 tel takviyeli | 12 tel takviyeli |
|---|---|---|---|---|---|
| Eğilme Dayanımı (MPa) | 361.8 | - | 374.8 | 413.5 | 487.3 |
| Basma Dayanımı (MPa) | 512 | - | 605 | 676 | 810 |
| Çekme Dayanımı (MPa) | 315 | 362.5 | - | - | - |
| Eğilme Elastisite Modülü (MPa) | 12.61 | - | 13.69 | 15.70 | 20.15 |
| 1- doğr. Elastisite Modülü (MPa) | 83120 | - | 88050 | 87500 | 90500 |
| 2- doğr. Elastisite Modülü (MPa) | 85120 | - | 86996.5 | 89425 | 91420.5 |
| Poisson Oranı | 0.285 | - | 0.282 | 0.251 | 0.235 |
| Kayma Modülü (GPa) | 8.10 | - | 8.78 | 9.82 | 12.44 |
| Statik Tokluk (kNmm) | 56.36 | - | 245.5 | 421.5 | 550 |
| Gerilme Şiddet Faktörü ($MN/m^{3/2}$) | 11.5 | - | 13.11 | 13.62 | 15.41 |

## 10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürekli çelik tel takviyesinin Zamak–5 alaşımının mekanik özelliklerine ve kırılma davranışına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada; 4, 8 ve 12 adet tel takviyeli ve takviyesiz Zamak–5 alaşımı kullanılmıştır. Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi için ASTM E–399 standartlarına göre üretilen çentiksiz numunelere üç noktadan eğme testi uygulanmış ve eğilme elastisite modülü ve eğilme dayanımları bulunmuştur. Ayrıca malzemelere basma deneyi yapılarak, takviyeli malzemelerin takviyesiz malzemelere göre basma dayanımları ve çekme deneyi ile de takviyesiz ve tek tel takviyeli malzemeye göre çekme dayanımı karşılaştırılmıştır. Malzemelere strain gage yapıştırılarak, malzemelerin fiberlere dik ve fiberlere paralel doğrultudaki elastisite modülleri bulunmuştur. Yine malzemelerin kırılma parametresi olan kritik gerilme şiddet faktörünü ($K_{IC}$) tespit edebilmek için ASTM E-399 standartlarına göre tek kenar çentikli eğme testi yapılmış ve başlangıç çentik derinliği metodu kullanılarak $K_{IC}$ değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneylerden şu sonuçlar elde edilmiştir;

1. Takviyesiz malzemeye göre; eğilme dayanımı değerinde, 4, 8 ve 12 adet tel takviyeli malzemede sırasıyla % 3, % 14 ve % 35' lik artış elde edilmiştir.

2. Takviyesiz malzemeye göre; eğilme elastisite modülü değerinde, 4, 8 ve 12 adet tel takviyeli malzemede sırasıyla % 9, % 25 ve % 60' lık artış elde edilmiştir.

3. Basma deneyi uygulanan numunelerde takviyesiz malzemeye göre; basma dayanımı değerinde, 4, 8 ve 12 adet tel takviyeli malzemede sırasıyla % 18, % 32 ve % 58' lik artış elde edilmiştir.

4. Çekme deneyi uygulanan numunelerde takviyesiz malzemeye göre; çekme dayanımı değerinde, bir tel takviyeli malzemede % 15'lik artış elde edilmiştir.

5. Başlangıç çentik derinliği metodu uygulanan deney sonuçlarından; takviye sayısına göre 4, 8 ve 12 tel takviyeli malzemelerde, takviyesiz malzemeye göre; kırılma tokluğu değerinde, sırasıyla % 14, %18.5 ve %34' lük artış elde edilmiştir

6. 4, 8 ve 12 adet tel ile takviyelendirilen Zamak-5 alaşımında, eğilme dayanımı, eğilme elastisite modülü, basma dayanımı ve kritik gerilme şiddet faktörlerinin maksimum değerlerine 12 tel takviyeli kompozit malzemede ulaşılmıştır.

7. ZA-5 alaşımının 12 adet tel ile takviyelendirilmesi sonucunda, eğilme dayanımında % 35, eğilme elastisite modülünde % 60, basma dayanımında %58 ve kırılma tokluğu değerinde % 34'lük bir artış elde edilmiştir.

Diğer Zamak alaşımları (ZA-3, ZA-8, ZA-12, ZA-27) ile de aynı çalışmalar yapılabilir.

Matris yapı sabit kalmak koşuluyla, takviye malzemesinde değişikliğe gidilip değişik çalışmalar yapılarak, ZA-5 alaşımının dayanımı arttırılabilir.

Kırılma tokluğunun bulunmasında farklı metodlar (Kompliyans, J-İntegral ve CTOD gibi) kullanılabilir.

## 11. KAYNAKLAR


Aksoy, T., 1984, Kırılma Mekaniği, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, s. 20-24.

Arıkan, H., Kuş, R., Akdemir, A., 2003, Çelik Tel/Dökme Demir Kompozitlerde Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri İle İlgili Bir Araştırma, 6. Uluslar arası Kırılma Konferansı: 37-45, Selçuk Üniversitesi Konya/Türkiye, Eylül 10-12

Arıkan, H., 2002, Çelik Tel Takviyeli Polimer Kompozitlerin Kırılma Davranışı. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya

ASTM B86, 1988, Standard Specification for Zinc-Alloy Die Casting, p.29-32.

Avcı, A., Arıkan, H., Akdemir, A., 2003, Fracture Behaviour of Steel Fiber Reinforced Polymer Composite, Sayfa 53-60, 6. Uluslararası Kırılma Konferansı, Selçuk Üniversitesi Konya/Türkiye, Eylül 10-12

Blucher, J.T., Narusawa, U., Katsumata, M., Nemeth, A., 2001, Continuous Manufacturing of Fiber Reinforced Metal Matrix Composite Wires-Technology and Product Characteristics, Composites: Part A 32 : 1759-1766

Chiang, C.R., 2000, Prediction of The Fracture Toughness of Fibrous Composites, J.Materials Science, vol.35, p.3161-3166

Chou, T.W., Kelly, A., Okura A., 1985, Fibre-reinforced metal matrix composites. J Comp Mater vol.16, p.187-206

Çay, F., Kurnaz, S.C., 2005, Hot Tensile and Fatigue Behaviour of Zinc–Aluminum Alloys Produced by Gravity and Squeeze Casting, Materials & Design, vol.26, p.479-485

Çay, F., 2003, Kokil ve Basınçlı Döküm Yötemleriyle Üretilen Çinko-Alüminyum alaşımlarının özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adapazarı

Dionne, S. 1999, Influence of Titanium Diboride Reinforcement on the Microstructure, Mechanical Properties and Fracture Behavior of Cast Zinc-Aluminum Composites. Pholosophiae Doctor, Faculte des Science et de Genie, Iniversite Laval, Quebec.

Güçlü, Ö. 2001, Çelik Tel Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Hashim, J., Looney L. ve Hashmi, M. S. J. 2001, The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites. Journal of Materials Processing, p.329–335.

Hemant, J., 2001, Fabrication anf mechanical properties (strength and fracture toughness) of chilled aluminum alloy-glass particulate composite, Materials Science and Engineering A318: p.277-284

Huda, D., El Baradie, M. A. ve Hashmi, M. S. J. 1993, Metal-matrix composites: Manufacturing aspects. Part I. Journal of Materials Processing Technology, p.513-528.

Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., 1983, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Matbaası, Istanbul, s. 91-94.

Kurnaz, S.Can, 2003, Production of saffil fibre reinforced Zn-Al (ZA-12) based metal matrix composites using infiltration technique and study of their properties, Materials Science and Engineering, p.108-115

Potti, P.K.G., Rao, B.N., Srivastava, V.K., 2000, Notched tensile strength of various fibre reinforced metal laminates, Adv. Composite Materials, vol.9, p.187-191

Prasad, B.K., Patwardan, A.K., Yegneswaran, A.H., 1996, Wear 199-142

Qu, S. J., Geng, L., Cao, G. J. ve Lei, T. Q. 2004, Fabricating a 15 vol%-3.5 μm-SiCp/Al composite by a squeeze casting technique. Journal of Materials Science, p.2967 – 2969.

Sayman, O., Esendemir, Ü., 2002, An elastic-plastic stress analysis of simply supported metal matrix composites under a transverse uniformly distributed load, Composite Science and Technology, vol.62, p.265-273

Sharma, S.C., Girish, B.M., Somashekar, D.R., Kamath, R., Satish, B.M., 1999, Mechanical properties and fractography of zircon-particle-reinforced ZA-27 alloy composite materials, Composites Science and Technology, vol. 59, p.1805-1812

Smith, W., 1993, Structure and Properties of Engineering AlIoys, 2nd Edn, p. 561. McGraw-Hill, New York

Sun, S., Pugh, M., 2001, Fabrication and mechanical properties of steel-steel composites, Material Science and Engineering A 300: p.135-141

Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi kitabevi, Ankara.

Tao, L., Delannay, F., 1998, Influence of fibre interconnections on the thermomechanical behaviour of metal matrix composites consisting of a Zn-Al alloy reinforced witk steel fibres, Acta Metallurgica Inc., vol.46, p. 6497-6509

Xia, X., McQuen, H., Zhu, E., 2002, Fracture behaviour of particle reinforced metal matrix composites, Applied Composite Materials, vol.9, p.17-31

Yılmaz, M.İ., 2005, Kompozit Basınçlı Tüpte Gerilme Analizi. Araştırma Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir

Yin, J., Wu, Z.S., 2003, Structural performances of short steel fiber reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets, Consraction and Building Materials, vol.17, p.463-470