



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK / BRONZ TALAŞ KOMPOZİTİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Hakan Burak KARADAĞ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart-2012

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ÇELİK / BRONZ TALAŞ KOMPOZİTİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Hakan Burak KARADAĞ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

2012, 158 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU

Prof. Dr. İbrahim USLAN

Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Bu çalışmada, endüstride geri dönüşümü genellikle ergitilerek yapılan çelik ve bronz metal talaşların, oda sıcaklığında yüksek basınç altında sıkıştırılıp, sıvı faz sinterleme yöntemi ile metal matris kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim amacı, darbe emici, sürtünme elemanı, filtre elemanı gibi farklı uygulama alanlarına yönelik olan bu kompozit malzemenin, hali hazırda kullanılan malzemelere alternatif teşkil edebilecek ekonomik, ucuz bir biçimde üretilebilirliği incelenmiştir. Çalışmada kullanılan çelik talaşı EN10025 standardında S355JR (DIN17100-St52-3) ismiyle anılmaktadır. Kompozit yapısındaki diğer bileşen ise CuSn10 adlı kalay bronzudur. Şerit testerede kesilen metal talaşlar, 800µm gözenek boyutuna (20 mesh) sahip elekte elenmiş ardından elenen bronz ve çelik talaşlar kompozit yapıya ağırlıkça %70bronz-%30çelik, %60bronz-%40çelik ve %50bronz-%50çelik oranlarında katılarak üç farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Ağırlıkça oranlama yapılan talaşlar oda sıcaklığında preslenmiştir. Bu işlemde presleme basınçları üretim sonunda tüm kompozit malzemelerin nihai gözenek miktarları sabit hacmen %25 olacak

belirlenmiştir. Kompozit malzemelerin gözenek miktarları ve yoğunlukları TS 2305 standardına göre tespit edilmiştir. Sinterleme işlemi içerisinde argon gazı bulunan fırın içerisinde 925°C'de gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde ağırlıkça üç farklı oranda seçilen çelik-bronz talaş miktarının malzemelerin mekanik ve aşınma özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ASTM standartlarında belirtilen şartlarda yapılan basma ve üç noktadan eğme testleri ile belirlenmiş, aynı şartlarda test edilen hadde CuSn10 bronzunun sahip olduğu özelliklerle mukayese edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, çelik-bronz talaşlarından hacimce %25 oranında gözenek ihtiva edecek şekilde üretilen kompozit malzemelerin sahip oldukları mekanik özelliklerin, bronz bileşen oranının artışı ile iyileştiği ve hadde CuSn10'a kıyasla daha tok ve sünek, basma dayanımları açısından oldukça yakın değerlere eriştiği gözlenmiştir. Ayrıca kuru ortamda 0,5 m/s sabit hızda dört farklı yük ve kayma mesafesinde yapılan aşınma testleri sonunda, kompozit içerisindeki çelik bileşen miktarındaki artış ile aşınmanın azaldığı, sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metalik talaşlar, sinterleme, metalik kompozitler, geri dönüşüm, aşınma.

ABSTRACT

Ph. D THESIS

PRODUCTION AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL/BRONZE CHIPS COMPOSITE

Hakan Burak KARADAĞ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR

2012, 158 Pages

Jury
Advisor: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Prof. Dr. İbrahim USLAN
Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

The aim of this study is to investigate the producibility of an economic and green alternative for applications such as friction part, filter, bumper etc. The composite materials consisting of steel and bronze chips were produced by cold pressing, and liquid phase sintering. The constituents are selected as S355JR (DIN 10100-St52-3 steel and CuSn10 bronze. Three different mixtures were prepared by using following percentages by weight %70bronze-%30steel, %60bronze-%40steel and %50bronze-%50steel and then cold pressed. The pressure was selected so that the final porosity of the composite could reach 25% by volume. The porosity of the final product was

determined in accordance with TS 2305. The products then sintered at 925°C under argon environment for 1h.

The effects of composition upon mechanical behavior were obtained through three points bending tests and compression tests and obtained results were compared with properties of plain CuSn10 bronze. The results showed that, the mechanical properties of produced composite materials enhance with increasing bronze content. It is also observed that the produced composites are tougher and more ductile than plain Cusn10 bronze. It is also observed that compression strength of the composites is close to strength of plain CuSn10 bronze. The wear test showed that a decrease in wear rate and increase in friction coefficient is obtained with increasing steel content.

Key words: Metalic chips, sintering, MMCs, recycling, wear.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, endüstriyel atık metal talaşlarının geri dönüşümü, toz metalürjisine benzer bir metot ile gerçekleştirilmiştir. Ülkemizde, tüm Dünya'da olduğu gibi, atık talaşlar çoğunlukla, döküm metodu ile yani ergitilerek, tekrar kullanıma sunulmaktadır. Ancak alışıla gelen, oldukça düşük verime sahip bu metodun uygulanması, beraberinde, fazladan enerji tüketimi, uzun zaman kayıpları ve dolayısıyla yüksek maliyete, ayrıca çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Tüm bu gerçekler, tez konusu olan atık çelik ve bronz talaşların geri dönüşümünde, az önce bahsedilen olumsuzluklardan uzak, yeni bir metodun araştırılması ihtiyacını doğurmuştur.

Araştırma genel olarak iki kısımdan ibarettir. Atık talaşlarla metal matrisli kompozit malzeme üretimi birinci kısmı, bu üretilen malzemeye tatbik edilen deneyler ve malzemenin mekanik-aşınma özelliklerinin tespiti ikinci kısmı oluşturmaktadır. Tezin içeriğinde sırasıyla, kompozit malzemenin üretimini doğrudan ilgilendiren ve üretim esnasında kullanılan bazı teorik bilgilere yer verilmiştir. Bunlara "Kompozit Malzemeler", "Talaş Oluşumu ve Şekilleri", "Toz Metalurjisi", "Triboloji" ana başlıkları altında kısaca değinilmiştir. Tezin sonraki kısımlarında, "Deneysel Çalışma" ana başlığı altında, malzeme üretimi ve mekanik testler detaylı bir biçimde anlatılmıştır. "Deneysel Sonuçlar ve Tartışma" ana başlığı altında da, yapılan mekanik testlere ait sonuçlar ve sebepleri yorumlanmıştır. Çalışmanın son kısmında bulunan "Sonuç ve Öneriler" ana başlığı altında ise, kazanılan sonuçların özeti ve çalışma kapsamında gelecekte düşünülen, yapılabilecek iyileştirme işlemlerine değinilmiştir.

Atık çelik ve bronz talaşların geri dönüşümünün, yeni metotla gerçekleştirmesi fikrini veren ve bu çalışmada emeklerini ve maddi-manevi desteklerini esirgemeyen Tez Danışmanım Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR'e, çalışmaya hem kıymetli fikir ve tecrübeleri ile desteğ veren Tez İzleme Komitesi Üyeleri Prof. Dr. Ahmet AVCI ve Prof. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU'na, kompozit malzemelerin mekanik test sonuçlarının irdelenmesi hususunda destek olan Doç.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e, malzemelerin aşınma davranışlarının tespiti hususundaki yardımları münasebeti ile Karabük Üniversitesi öğretim üyelerinden Doç. Dr. Mustafa BOZ'a, deneylerin yapım aşamasında bilfiil yardımcı olan Arş. Gör. Mahmut ÜNALDI'ya, malzeme üretimi esnasında, tecrübelerinden istifade ettiğim bölümümüz teknisyeni Halit Tutar'a şükranlarımı arz ederim.

Ayrıca, çalışmalarım süresince, bana moral ve motivasyon kaynağı olan aileme ve eşime teşekkür ederim.

Hakan Burak KARADAĞ

KONYA-2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vi**

ÖNSÖZ ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**

3. KOMPOZİT MALZEMELER **9**

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 11
3.2. Metal Matris Kompozitler 12

4. TALAŞ OLUŞUMU ve ŞEKİLLERİ **16**

4.1. Talaş oluşumu ve talaş tipleri 16
4.2. Metal Matris Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Talaşlar 19

5. TOZ METALURJİSİ **21**

5.1. Metalik Partiküllerin Üretim Yöntemleri 21
5.2. Partiküllerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri 22
5.3. Toz Metalurjisi Tekniği İle Parça Üretimi 26
5.3.1. Karıştırma 28
5.3.2. Sıkıştırma 29
5.3.2.1. Sabit kalıp içerisinde sıkıştırma 31
5.3.2.2. Sıkıştırma hataları 32
5.3.3. Sinterleme 33
5.3.3.1. Sıvı fazlı sinterleme 35

6. TRİBOLOJİ **37**

6.1. Sürtünme 37
6.1.1. Sürtünme mekanizmaları 38
6.1.1.1. Kuru sürtünme 38
6.1.1.2. Sınır sürtünmesi 40
6.1.1.3. Sıvı sürtünme 40
6.2. Aşınma 41
6.2.1. Aşınma türleri 44
6.2.1.1. Adhezif aşınma 45
6.2.1.2. Abrazif aşınma 47
6.2.1.4. Diğer aşınma çeşitleri 49

6.2.2. Aşınma deneyi yöntemleri....50
6.2.3. Aşınma miktarının ölçülmesi....51
6.3. Kaymalı Yataklar....52
6.3.1. Kaymalı yatak malzemeleri....52
6.4. Sürtünme Elemanları....54

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR....56

7.1. Çelik/Bronz Kompozit Malzemenin Üretimi....56
7.1.1. Çelik ve bronz talaşların fiziksel - kimyasal özellikleri....57
7.1.2. Toz grafitin özellikleri ve yapıya etkisi....60
7.1.3. Bileşenlerin hazırlanması....61
7.1.3. Talaşların kalıplanması ve sıkıştırma işlemleri....64
7.1.4. Ham numunenin sinterlenmesi....68
7.1.4.1. Kompozit numunelerin hacim-kuru yoğunluk-açık gözenek miktarlarının tespiti....70
7.2. Mekanik Deneyler....75
7.2.1. Basma deneyi....75
7.2.2. Üç noktadan eğme deneyi....77
7.2.3. Aşınma deneyi....81
7.2.4.1. Aşınma numuneleri ve deney parametreleri....81
7.3. Mikroyapı incelemeleri....84
7.4. Sertlik deneyleri....90
7.4.1. Brinell sertlik deneyi....91
7.4.2. Vickers mikro sertlik deneyi....93

8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA....94

8.1. Basma Deneyi Sonuçları....94
8.2. Üç Noktadan Eğme Deneyi Sonuçları....106
8.2.1. Talaşların sıkıştırıldığı doğrultuda tatbik edilen eğme deneyi sonuçları....106
8.2.2. Yan yüzeyden tatbik edilen eğme deneyi sonuçları....112
8.4. Yüzey Sertlik Ölçümü Sonuçları....117
8.4.1. Brinell sertlik ölçümü sonuçları....117
8.4.2. Vickers sertlik ölçümü sonuçları....118
8.5. Aşınma Deneyi Sonuçları....120
8.5.1. Aşınan yüzeylerin mikro yapısı....136

9. MALİYET ANALİZİ....146

10. SONUÇ VE ÖNERİLER....150

10.1. Sonuçlar....150
10.2. Öneriler....152

11. KAYNAKLAR....154

12. EKLER....158

ÖZGEÇMİŞ....159

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

F_n : Normal kuvvet (N)
F_S : Sürtünme kuvveti (N)
μ : Sürtünme katsayısı
m_1 : Deney numunesinin kuru kütlesi (g)
m_3 : Deney numunesinin tam yağ emdirilmesi sonrasındaki kütlesi (g)
m_a : Tam emdirilmiş numunenin artı numuneyi bağlayan telin havadaki kütlesi (g)
m_b : Tam emdirilmiş numunenin artı numuneyi bağlayan telin sudaki kütlesi (g)
S : Aşınma yolu (m)
d : Malzeme yoğunlu (g/cm^3)
W_r : Aşınma direnci (Nm/mm^3)
ΔH : Aşınma miktarı (µm)
V : Cismin hacmi (cm^3)
R_a : Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (µm)
d_0 : Basma numunesinin ilk çapı (mm)
h_0 : Basma numunesinin ilk boyu (mm)
d' : Basma numunesinin anlık çapı (mm)
h' : Basma numunesinin anlık boyu (mm)
ε : Birim şekil değiştirme değeri
σ_{Ak} : Akma gerilmesi (Pa)
E : Young modülü (GPa)
C : Eğme test düzeneğinde destekler arası mesafe (mm)
r : Destekler arası mesafe (mm)
b : Eğme numunesinin yüksekliği (mm)
P : Brinell sertlik deneyinde test yükü (N)
t : Eğme numunesinin kalınlığı (mm)

Kısaltmalar

MMK : Metal Matris Kompozit

ASTM : American Society for Testing and Materials

TM : Toz Metalurjisi

BSD : Brinell sertlik değeri

VSD : Vickers sertlik değeri

1. GİRİŞ

Günümüzde geleneksel malzemeler kullanılarak, gereksinimlerin tümünü karşılamak oldukça zordur. Artan dünya nüfusu ve ihtiyaçlar karşısında, hızla azalan doğal kaynaklar, seçilen malzemenin dayanım, süneklik, aşınma, korozyon gibi temel özeliklerinin yanı sıra, maliyet hususunun da giderek önem kazanmasına sebep olmuştur. İstenilen özelliklere sahip yeni malzemeler aranırken aynı zamanda malzemenin üretim ve geri dönüşüm süreçlerinin verimi, çevreye verilen zararlar hususu, dünyada gittikçe önem kazanan konular arasında yerini almıştır. Aşırı derecede artan tüketim miktarına karşılık hızla azalan kaynaklar dikkatlerin bu nokta üzerine yoğunlaşmasına, çevre bilinci ile birlikte, geri dönüşüm konusunun günden güne itibar kazanmasına vesile olmuştur. Bu konuyla ilgili verilebilecek çarpıcı bir örnek, Avrupa Birliği ülkelerinde ve Japonya'da alınan resmi kararlarda, 2015 yılına kadar, otomobil üretiminde %95 oranında atık malzemelerin geri dönüşümüyle elde edilen malzemelerin kullanılması zorunlu olacaktır.

İstenilen mekanik özelliklere sahip ve ekonomik malzemelerin üretiminde, kompozit malzemeler önemli bir yer teşkil etmektedirler. Bu bağlamda, çalışmamızda, talaşlı üretim sonrası oluşan ve geri dönüşümü büyük oranda yüksek enerji sarfiyatı gerektiren döküm metodu ile yapılan metal talaşlarının, ergitmeksizin verimli bir şekilde değerlendirilip, yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme üretimi amaçlanmıştır. Üretimin ardından, kompozit malzemenin mekanik ve aşınma karakteristikleri standartlara uygun bir biçimde yapılan testlerle tespit edilmiş ve yorumlanmıştır.

Talaşların ergitme potalarında ergitilerek dökülmesi olan klasik metot ile araştırma konusu olan yeni metot arasında, verimlilik ve çevre kirliliğinin önlenmesi bakımından büyük fark vardır (Gronostajski ve Matuszak 1999). Ergitme esnasında talaş ve talaş yüzeyinde bulunan yağların yanması sonucu oluşan gazlar havaya karışmaktadır. Öte yandan konu ekonomik açıdan ele alındığında da ergitme işlemi için gerekli olan enerjinin oldukça fazla olduğu bilinen bir gerçektir. Tüm bu hususlara ek olarak, ergitme sürecinde, ortalama olarak talaşların %10'u cürufa, %8'i döküm artıklarına, %18'i ekstrüzyon kayıplarına ve %10'u ergitme kayıplarına dönüştüğü için ancak %54 oranına sahip nihai ürün kullanılabilmektedir.

Talaşların oda sıcaklığında sıkıştırılıp, sinterlenmesi neticesinde elde edilen nihai ürün miktarı %95 gibi yüksek oranlara ulaşabilmektedir. Bu işlem sırasında

malzemenin yaklaşık olarak %5'i ekstrüzyon ve ufalanma işlemi ile kayıplara dönüşmektedir. (Gronostajski ve ark.1997). Bu verimli metotta metal talaşları tamamen ergitilmediğinden enerji sarfiyatı diğer metotlara nazaran çok daha düşük seviyelerdedir. Bu metot ile endüstride yatak eleman olarak yaygın bir kullanıma sahip CuSn10 bronzunun mekanik özelliklerine yakın, toz metalürjisinde kullanılan pahalı metal tozlara ihtiyaç duymadan çok kısa sürede ekonomik malzeme üretimi mümkün olmuştur. Ayrıca metal talaşların tekrar değerlendirilmesi, bu sektörde büyük ölçüde dışa bağımlı olmamız münasebetiyle, ülkemiz açısından önemlidir. Zira metal fiyatları ile atık metal talaşları arasındaki fark oldukça büyüktür.

Bu tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde, sırasıyla, çalışma esnasında kullanılan aygıtlar, tatbik edilen yol ve yöntem anlatılmış bu meyanda konu ile ilgili bazı teorik bilgilere yer verilmiştir. Daha sonra çalışma konusunun özgün yönü olan, atık metal talaşları ile üç farklı oranda kompozit malzeme üretimi anlatılmış ve hemen ardından bu kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etki eden parametreler ifade edilmiştir. Mekanik özelliklerin tespiti için, ASTM (American Society for Testing and Materials), standartlarına uygun olarak basma ve üç noktadan eğme deneyi tatbik edilmiştir. Kompozit malzemelerin aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi için pim-disk test cihazıyla aşınma deneyi yapılmıştır. Bütün bu deneyler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilip, kendi aralarında ve hali hazırda kullanımda olan endüstriyel malzeme ile mukayese edilmiş, kompozit malzemeye ait performans belirlenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

A. Upadhyaya ve G. Sethi (2006), yaptıkları çalışmada, CuSn12 alaşımının sinterlenmesi esnasında karışımın homojenizasyonunun ve yoğunlaştırma işleminde uygulanan farklı ısıtma işlemlerinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. İki faklı fırında (geleneksel radyasyonla ısıtma ve mikro dalga fırında) ve iki farklı sıcaklıkta sinterleme yapmışlar, elde ettikleri faklı yoğunluktaki kompozit malzemeleri mukayese etmişlerdir. Mikro dalga fırında sinterlenen malzemede, diğerine oranla daha yüksek yoğunlaşma ve mikro düzeyde daha az homojenizasyon sağlanmıştır. Bu sonucun, kalayın bakır içerisinde ısıtma moduna göre farklı şekilde difüze olması ile ilgili olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu çalışmada kullanılan bronz alaşımın sinterleme parametreleri metal talaşlarından üretilen ham numunelerin sinterlenmesi sırasında seçilen ısıtma ortamının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Chmura ve ark. (2000), yaptıkları çalışmada, alüminyum esaslı metal talaşlarının geri dönüşümü ile üretilen yatak malzemesinin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Alüminyum ve alüminyum bronzunu soğuk presledikten sonra sıcak ekstrüzyon ile ürettikleri kompozit malzemelerin içerisindeki takviye amacıyla katılan alüminyum bronzunun, yapının mekanik ve tribolojik özelliklerine etkisini incelemişlerdir.

Chmura ve Gronostajski (2006), yaptıkları çalışmada, geleneksel metalürjik proseslere ihtiyaç duymadan ekstrüzyon ile Al-Al bronz talaşlarını kullanarak, iyi yataklama özelliğine sahip malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir. Al-Al bronz talaşları arasında sağlam kaynama olabilmesi için uygun sinterleme parametrelerinin seçilebilmesi hususunda deneysel çalışmalar yürütmüşler, bu çalışmalarda difüzyon hızının ve miktarının malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi üzerinde durmuşlardır. Ayrıca, sıcak ekstrüzyon ve ardından yapılan ısıl işlemler sonucundan kompozit içerisinde sert fazların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Sıcak ekstrüzyon ve ısıl işlemlerle oluşan, yeni sert fazların kompozit malzemenin tribolojik özelliklerini ve sertliğini artırdığını görmüşlerdir. Sıkıştırma işleminde, yüzey tabakası oksitlenmiş partiküllerin sinterlenebilmesi için yüksek kayma gerilmeleri ve yüksek basınçlara ihtiyaç olduğunu tespit etmişlerdir.

E. Feyzullahoğlu ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada, pirinç ile iki farklı kalay esaslı yatak malzemesinin aşınma özelliklerini yağlı ortamlarda incelemişlerdir. İncelenen alaşımlardan, SAE 12 olarak bilinen düşük Sb içeren (%7), alaşım otomotiv sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer alaşım ise yüksek Sb içeren Sn-Sb-Cu alaşımı CW619 pirincidir. Aşınma ve sürtünme karakteristikleri "Tecquipment HFN type 5" test cihazında, kayma mesafesi, kayma hızı ve yatak yükü göz önüne alınarak elde edilmiştir. Sertlik ölçümü tribolojik özellikleri belirlemek için yapılmıştır. Işık mikroskobu kullanarak bu üç farklı yatak malzemesine ait tribolojik sonuçları analiz etmişlerdir.

Fogagnolo ve ark. (2003), yaptıkları çalışmada, alüminyum talaşlarının oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta preslendikten sonra sıcak ekstrüzyon işlemi ile alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir. Sıcak presleme ile üretilen kompozitin daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu; ancak işlem maliyeti ve süresinin bu malzemenin, soğuk presleme ile üretilen kompozite göre dezavantaj olduğunu tespit etmişlerdir.

Gronostajski ve ark. (1997), yaptıkları çalışmada alüminyum ve alüminyum alaşımlarına ait talaşların doğrudan nihai ürüne dönüştürülmesi ile ilgili yeni bir metot tanımlamışlardır. Talaşların kırpılıp istenen boyutlara indirgenmesi, yüksek basınç altında ön sıkıştırma işlemi ve ardından sıcak ekstrüzyon işlemi ile malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu metotta ergitme ve tekrar kalıplara dökme gibi geleneksel üretim yöntemlerindeki büyük orandaki malzeme kayıplarının önüne geçilmiştir. Geleneksel yöntemlerle bir metalin sadece %54'lük kısmı tekrar nihai ürün olarak geri kazanılırken, Gronostajski ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada, sıcak ekstrüzyon sayesinde alüminyum talaşlarının %95'lik kısmı nihai ürüne dönüştürülebilmektedir.

J. Gronostajski ve arkadaşları (2000), yaptıkları çalışmada, Al ve alaşımlarının kısa sürede ve kısa proseslerle oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda dayanımı yüksek kullanışlı ürünlere dönüştürmeye yönelik yeni bir proses üzerinde durmuşlardır. Bu metodun kullanımı esnasında yeni sinterleme parametreleri belirlemişlerdir.

Gronostajski ve arkadaşları (2002), yaptıkları bir diğer çalışmada, talaşların geri dönüşüm prosesinde, klasik metalurjik işlemlerden uzak bir metot kullanmışlar ve yatak malzemesi üretimi için kullanılan bu metot içerisinde sinterleme parametrelerinin yapıya etkisini tartışmışlardır.

Gronostajski ve Matuszak (1999), yaptıkları çalışmada, yarı mamüllerin talaşlı işlemleri sırasında oluşan ve geri dönüşümü geleneksel metotlarla oldukça zor olan alüminyum ve alüminyum alaşım talaşlarının toz metalurjisine tekniklerini kullanarak yeni ve daha verimli bir metotla geri kazanımını sağlamışlar, bu metodun daha az enerji tüketimi ve işçilik maliyetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Gronostajski ve arkadaşları (2001), alüminyum ve alüminyum alaşımlarına ait talaşlarını kullandıkları yeni bir metot ile kompozit malzeme üretmişler, bu malzeme içerisine takviye eleman olarak kattıkları ferro-krom (FeCr) partiküllerini farklı oranlarda yapıya ilave ederek ve metal talaşlarını farklı sıcaklıklarda presleyerek, bu farklı üretim parametrelerinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir.

Hashim ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada, yüksek korozyon direncine ve aynı zamanda tatminkâr mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme üretmeyi hedeflemişlerdir. Bu amaçla, nispeten daha ucuz maliyetli karıştırmalı döküm metodunu, silikon karbür/alüminyum alaşımı metal matrisli kompozit malzeme üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada ayrıca takviye elemanın üniform dağılımı, bileşenler arasındaki ıslatma kabiliyeti ve düşük gözenekli malzeme elde edilebilmesi hususlarında karşılaşılan teknik zorlukları tartışmışlardır.

Hirotaka ve ark. (2003), yaptıkları çalışmada, yatak malzemesi olarak, toz metalurjisi metodu ile ürettikleri bakır esaslı kompozit malzeme içerisine yağlayıcı olarak yüzeyi bakır kaplı molibdendisülfit (MoS_2) ve grafit partiküller ilave etmişlerdir. Bakır kaplama sayesinde, sinterlemede bu yağlayıcıların bakır partiküllere daha iyi bir biçimde bağlandığını tespit etmişlerdir. Çalışmanın sonraki aşamalarında da toz metalurjisi ile üretilen bu kompozit malzemenin sertliğini, mikro yapısını ve eğmedeki dayanımını test etmişlerdir. Ayrıca silindir-plaka test cihazında kuru ortamda, oda sıcaklığında gerçekleştirdikleri deneylerle, malzemenin sürtünme ve aşınma

özelliklerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, kompozit yapıya yağlayıcı olarak kattıkları grafit ve MoS_2'nin kompozit malzemenin eğme dayanımını oldukça düşürdüğünü; ancak bu yağlayıcıların Cu kaplanarak yapıya ilave edilmesi halinde ise eğme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir.

Hu ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada, AZ91D isimli magnezyum alaşımına ait metal talaşların doğrudan (ergitmeksizin) geri dönüşümü ile ilgili incelemeler yapmışlar. Kullandıkları talaş boyutunun değişiminin mikro yapıya ve dolayısıyla mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Ayrıca çalışmada, partikül yüzey alanı artışı ile oksitlenme miktarının doğrusal olarak arttığını tespit etmişlerdir.

Kurt, (1992), yaptığı çalışmada, bronz yatakların üretim parametreleri ve aşınma özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada toz metal bronz yataklar ile tam yoğun bronz yatakların, aşınma ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Toz metal bronz yatakların aşınma özelliklerinin tam yoğun bronz yataklara göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Küçükömeroğlu ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada, endüstride yatak eleman olarak kullanılan CuSn10 bronzunun aşınma ve sürtünme özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, CuSn10'un tribolojik özellikleri, atmosfer basıncı altında ve vakum ortamda pin-on-disk aşınma test cihazında incelenmiştir. Vakum ortamında oluşan sürtünme katsayısının atmosferik ortamdakine oranla oldukça yüksek olduğunu, ancak yüksek aşınma direnci ve düşük aşınma hızı gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Çalışmada tarama elektron mikroskobundan alınan görüntülerde CuSn10'un maruz kaldığı aşınma tipini yorumlamışlardır.

M. Kestursatya ve ark. (2003) yaptıkları çalışmada, yeni geliştirdikleri kurşun ihtiva etmeyen metal matris kompozit (CG-santrifüj döküm tekniği ile üretilen grafit içeren bakır alaşım) ile yaygın olarak kullanılan kurşun-bakır alaşımını (LC-18-22%Pb) aşınma davranışları açısından mukayese etmişlerdir. Pim-disk cihazı kullanılarak tribolojik testler yapmışlar, CG'nin farklı aralıklarda uygulanan yüklerde LC'den daha yüksek aşınma dayanımına sahip olduğunu gözlemişlerdir. Düşük yüklerde her iki malzemenin birbirlerine çok yakın sürtünme katsayısına sahip olduklarını ancak CG'nin 118N'da LC'den birazcık daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğunu

gözlemişlerdir. Pim-diskte SAE 1045 çelik disk kullanmışlardır. Aşınma özelliklerini anlamada aşınan partiküllerin miktarından, yüzey kompozisyonu ve şeklinden yararlanmışlardır.

Öveçoğlu, (1997), toz metalurjisi tekniği ile üretim metodunun tarihi gelişimi ve bu alandaki son gelişmeler hakkında detaylı bir araştırma yapmıştır. Özellikle de, üretim aşamalarındaki güncel gelişmeler üzerinde durmuştur.

Şahin, (2001), yaptığı çalışmada, talaşların şekli, talaş tipleri ve talaş kaldırma prensipleri hakkında bilgi vermiş, özellikle talaş üretim tekniklerini detaylı şekilde incelemiştir.

Ünlü ve ark (2005), yaptıkları çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, Cu-Fe-Grafit, Fe-Cu-Grafit ve CuSn-Fe-Grafit yatakların tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Tamamı kendinden yağlamalı olan bu yatakların mukayesesi sonucunda, bronz TM yatakların, demir esaslı yataklara göre daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğunu, en düşük sürtünme katsayısının CuSn10 bronzunda olduğunu ve en düşük ağırlık kaybının Fe-grafit yatakta meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Ünlü ve ark (2005), yaptıkları çalışmada, CuSn10 bronzundan üretilen kaymalı yatakların farklı yük ve hızlarda kuru ve yağlı ortamlardaki sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişler, mukayese etmişlerdir. Karşı aşındırıcı olarak SAE 1050 çelik milin kullanıldığı aşınma testleri radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında yapılmıştır. Her biri 2.5 saat süren bir dizi deney sonunda, kuru ortamda yapılan deneylerde elde edilen sürtünme katsayılarının yağlı ortamlara göre oldukça yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca aşınma kaybının kuru ortamlarda oldukça yüksek olduğunu görmüşlerdir.

Ünlü ve ark (2003), yaptıkları çalışmada, CuSn10 bronzu ile CuZn30 pirincinden üretilen kaymalı yatakların, sürtünme ve aşınma özelliklerini inceleyip, birbirleri ile kıyaslamışlardır. Aşındırıcı olarak SAE 1050 çelik milin kullanıldığı aşınma testleri radyal kaymalı yatak aşınma test cihazında, 20N yük, 1500 d/dak ve 2.5

saatte yapılmıştır. Sonuç olarak, kuru ortamda yapılan deneylerde yüksek sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı, yağlı ortamda ise çok daha düşük elde edilmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin arzu edilen özellikleri sağlaması maksadıyla, belirli oranlarda makro boyutlarda ve fiziksel olarak bir araya getirilerek üretilen malzemelerdir. Kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin, büyüteç yardımı ile ya da çıplak gözle görülebilir olması, yapı bileşenlerinin kolayca ayırt edilmesini mümkün kılmaktadır. Kompozit malzemeler bu yönleri ile yapılarında birden fazla faz içerdiği ancak mikroskobik inceleme ile anlaşılabilen alaşımlardan, ayrılmaktadırlar. Kompozit malzemeler, metalik, organik, ya da inorganik bileşen ihtiva edebilir ve kendini meydana getiren malzemelerin her birinin taşıdığı özelliklerinden, daha iyi özelliklere sahiptirler. Kompozit malzemelerde, takviye elemanı bulunmakta ve bu elemanın çevresini hacimsel olarak, genellikle hacimce veya ağırlıkça, çoğunluğu oluşturan bir matris yani bağlayıcı eleman sarmaktadır. Matrisin en önemli görevi; takviye elemanını bir arada tutmak, malzemeye gelen darbeleri veya yükleri takviye elemanlarına aktarmak, kırılma tokluğunu iyileştirmek, takviye elemanı ile uyum sağlamak, takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı korumaktır. Bu iki ana unsuru oluşturan malzemelerden çok daha iyi özelliklere sahip ara yüzey ve ara fazlar elde edilebilmektedir. Kompozit malzeme bileşenleri birbirleri içerisinde genellikle çözünmezler, ancak özellikle metalik sistemlerde, düşük oranlarda bir miktar çözünme, kompozitin özelliklerine doğrudan etki edebilen ara fazlar görülebilmektedir (Donald 1988., Doğanay ve Ulcay, 2007).

Takviye kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin diğer bir amacı ise, takviye elemanlarını yük altında bir arada tutabilmek ve yükü takviye elemanları arasında homojen olarak dağıtmaktır (Hashim ve ark.,1999)..

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, matris ile takviye elemanı arasındaki uyuma ve dolayısıyla çok iyi bir bağ oluşturmaya bağlıdır. Ara yüzey ve ara fazlar, kompozitten istenen özelliklerin elde edilebilmesi için büyük önem arz etmektedir. Ara fazlar kuvvetin matristen takviye elemanlarına aktarıldığı bölgelerdir. Dolayısıyla, bu bölgenin mekanik özellikleri, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede büyük etkiye sahiptir. Ara yüzeyde güçlü bir birleşme kompozit malzemenin katı ancak gevrek olmasına sebebiyet verir. Zayıf ara yüzey ise,

malzemenin esnek, aynı zamanda tok olmasını sağlar. Ara yüzey, matris yapıdan daha zayıf olursa, kırılma ve tabaka ayrılması meydana gelir. Çünkü taşınan yük doğrudan ara yüzey üzerinden ara faza aktarılır, dolayısıyla takviye elemanı matristen ayrılmış olur. Genel olarak ara yüzeyin sert ve zayıf sınırlar arasında bulunması istenir. Kompozit malzemelerde geliştirilmesi istenen özellikler, içerisindeki takviye elemanı aracılığı ile geliştirilirler. Takviye elemanın yapıya kattığı özellikler şunlardır;

- Mukavemet
- Rijitlik
- Korozyon direnci
- Yorulma direnci
- Estetik
- Hafiflik
- Termal yalıtım
- Akustik yalıtım

Kompozit malzemelerin, klasik metal malzemelere göre üstün yanları, malzeme bileşiminin sonsuz sayıda olabilmesidir. Kompozitlerin bu avantajları onlara, malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkânı tanımaktadır. Kompozit malzemeler, metal, seramik ve plastiklerin zayıf yönlerini iyileştirmek maksadıyla endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Kuş. 2007).

Kompozit malzemeler, yukarıda zikredilen avantajlarının yanında bir takım dezavantajlara da sahiptirler (Muller ve ark., 2002).

- Üretimin güçlüğü
- İşlenmesinin güçlüğü yanında maliyetinin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Diğer malzemeler gibi geriye dönüşünün çok kısıtlı oluşu
- Kırılma uzamasının az oluşu gibi dezavantajlar da mevcuttur.

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak, partikül, tabaka ve elyaflar yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan kompozit türlerinden biri olan polimer matris kompozitlerin endüstrideki uygulamaları, metal matrisli kompozitlerden

daha çoktur, bunun nedeni, kompozit malzemelerin üretimi esnasında yaşanılan zorluklar ve özellikle ara faz mukavemetinin zayıflığıdır (Taha ve ark., 1993). Ayrıca MMK malzemelerin üretim güçlüğünün yanında, işlenme güçlüğü, yüksek maliyet ve diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün, istenilen düzeyde olmamasıdır (Hashim ve ark.,2002).

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, bileşenleri açısından çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Bileşenlerin türü ve yapısal açıdan başlıca üç gruba ayrılabilirler. Kompozit malzeme içerisinde bulunabilecek olan destekleyici yapılar, elyaf, parçacık, pulcuk, lamine, ya da dolgu olarak bulunabilir. Bunların temel görevi gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktadır. Takviye şekline göre kompozit malzemeler başlıca üç gruba ayrılabilir (Kuş. 2007).

Elyaf takviyeli kompozitler

ASTM'ye göre bir malzemenin fiber olabilmesi için bu malzemenin çubuk şeklinde ve boyutlarının, uzunluk/çap oranının 10/1 olması gerekmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde, elyaf çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki ayrı gruptan, elyaf malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini iyileştirme, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da, elyaf malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü elyaflar arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece elyaf malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.

Bir kompozitin mekanik özellikleri kompoziti meydana getiren malzemelerin özelliklerine bağlı olmakla beraber, elyaf takviyeli kompozitlerde elyafın uzunluğu, yönlenme, geometrisi, dağılımı ve kompozitin üretim yöntemlerine de bağlıdır. Yönlenme, mukavemetin hangi yönde daha yüksek olacağını belirler. Üç tip elyaf takviyesi vardır; bunlar tek yönde, düzlemsel ve üç boyutlu takviyedir. Bunlardan tek

yönlü takviye, yönlenme doğrultusunda en yüksek mukavemet ve elastisiteye sahiptir (Kuş. 2007).

Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozitler denir. Ayrıca, tabakalar halinde bulunması her tabakanın bir kompozit olmasına imkân vermektedir. Tabakalı kompozitlerde, tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrol diğer kompozitlerden daha kolay olmaktadır. Bu kompozitlerde özel ihtiyaçları karşılamak maksadıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlara, sandviç malzemeler de denir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, ısıl yalıtım özellikleri iyileştirilebilir. Bu tür iyileştirilmiş özellikler bimetallerde, haddelenmiş metallerde, tabakalanmış camlarda, plastik kaplı tabakalanmış kompozitlerde çok sık görülebilir (Kuş. 2007)..

Parçacık katkılı kompozitler

Parçacık katkılı kompozitler, parçacıkların bir başka matris malzeme içerisine yerleştirilmesi ile elde edilir. Parçacıklar ve matrisler metal veya metal olmayan malzemelerden olabilir. Parçacık katkılı kompozit malzemeler bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matris malzeme ile birleştirilmesinden meydana gelir (Chmura ve ark. 2000). Parçacık kompozitlere örnek olarak toz metalurjisi metodu ile elde edilen ürünler ya da beton verilebilir.

3.2. Metal Matris Kompozitler

Metal matris kompozit (MMK) malzemelerde, takviye elemanı olarak sürekli elyaflar, süreksiz (kısa) elyaflar, partiküller kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler takviye elemanının ismiyle anılırlar. Örnek olarak sürekli elyaf ile güçlendirilmiş ise; sürekli elyaf takviyeli MMK veya partikül ile güçlendirilmiş ise partikül takviyeli MMK malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Kompoziti oluşturan diğer önemli elaman matristir. Matris kompozitin birçok özelliğini üzerinde taşır. Kompoziti oluşturan en önemli malzeme olan matrisin takviye elemanlarını bir arada tutmanın dışında daha

birçok kritik görevi vardır. Birçok takviye elemanı gevrek veya kırılgandır. Matris, bunların yüzeylerini kazıma aşınması gibi dış ve çevresel etkilere (ki bu etkiler ilerde çatlaklara neden olmaktadır) karşı koruyup dirençlerini arttırmakta, kompozit üzerine gelen yükü takviye elemanı homojen olarak dağıtmakta ve kompozit içerisindeki hata ihtimalini azaltmaktadır (Hiçyılmaz vd., 1999).

MMK malzemeler genelde iki bileşenden meydana gelmektedir. Bunlardan biri metal matris (genelde bir metal alaşımıdır) diğeri ise takviye malzemesidir (genel olarak metaller arası bileşik, oksit, karbür veya nitrür). Kompozitin üretilmesinde matris ve takviye malzemesi beraber olarak karıştırılırlar. Matris olarak saf metalin kullanılmasına çok nadir rastlanır. Genelde matris metal alaşımıdır. MMK malzemeler yüksek elastik modülüne, yüksek çekme-basma ve kayma mukavemetine, yüksek servis sıcaklığına sahip olmaları ayrıca, metallerin süneklik ve tokluğunu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modülüne sahip olma özelliklerini birleştirmelerinden dolayı, son derece önemli mühendislik malzemeleri arasında yerlerini almışlardır. Bu üstünlüklerinin yanında tekrar üretilebilir mikro yapıya sahip olmaları ve düşük yoğunluk değerleri vermeleri açısından daha da önem kazanmışlardır.

MMK malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer bazı malzemelere göre küçümsenmeyecek üstünlükleri mevcuttur. MMK malzemeler (Kuş. 2007);

- Yüksek elastik modülüne sahiptirler,
- Yüksek dayanıma (çekme, basma, aşınma, sürünme dayanımı) sahiptirler,
- Daha yüksek sıcaklıklarda çalışırlar,
- Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek modül özelliklerini birleştirirler,
- Tekrar üretilebilir özelliklere sahiptirler,
- Düşük yoğunluk değerleri verirler,
- Sıcaklık değişiklikleri veya ısıl şoklara karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- Yüksek yüzey dayanıklılığı ve yüzeydeki dalgalanmalara karşı düşük hassasiyete sahiptirler,
- Yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik özellikleri mevcuttur.

MMK malzemelerde, sıkça karşılaşılan problemlerden biri de, matris ile takviye arasındaki etkileşimdir. Bazen takviyeler yüksek sıcaklığa maruz kaldıkları taktirde; matris ile takviyeler arasında, takviyelerin özelliklerini bozacak şekilde bir etkileşim meydana gelebilmektedir (Lienert, 1993).

İstenmeyen fazların oluşmaması ve takviye malzemesi ile matris arasında iyi bir bağ oluşması için; düşük sıcaklıkta üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve birbiriyle termodinamik olarak, dengede bulunan kararlı fazların seçiminin yapılması gerekmektedir. Kompozit üretimi için uygulamada istenilen teknik özelliklere göre takviye elemanı ve matris seçiminin yanı sıra üretim tekniği de çok önemlidir. MMK malzemelerin üretiminde birçok teknik kullanılmaktadır, toz metalurjisi tekniği yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir, bu çalışmada da toz metalurjisine çok benzeyen bir metot kullanılmıştır (Lienert, 1993).

Toz metalurjisi; ergime derecesi ve sertliği çok yüksek olup, klasik yöntemlerle biçimlendirilmesi zor veya ekonomik olmayan malzemelerin şekillendirilmeleri için kullanılan bir yöntemdir. Toz metalurjisi ile üretim yöntemleri diğer metal şekillendirme yöntemlerinden tamamen farklı olup seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir (Hansner, 1982). Döküm yöntemleri ile üretilemeyen ve şekillendirilemeyen malzemeler ve parçalar bu yöntemle, homojen, istenilen yoğunlukta, ince taneli, segregasyonsuz ve yüksek mekanik özelliklere sahip bir biçimde üretilebilmektedir (Ünlü ve ark., 1992). Toz metalurjisinde, malzeme önce toz zerrecikleri haline getirilir. Daha sonra bu tozlar sinterleme denilen, ısıtma ve dövme kalıplarında yüksek güçte presleme işlemi ile belirli bir şekle getirilmektedir. Toz metalurjisi genellikle demir, bakır, kalay, kurşun, nikel, kobalt, titanyum, ve volfram gibi malzemeler uygulanmaktadır.

MMK malzemelerin üretiminde kullanılan diğer metotlar ise şunlardır (Kuş. 2007);

- Sıvı metalin infiltrasyonu metodu
- Sıkıştırmalı veya sıvı dövme döküm metodu
- Sıvı metal karıştırma metodu
- Hızlı katılaştırma metodu
- Plazma püskürtme metodu
- Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme metodu
- Yarı karıştırma metodu

- Difüzyon bağlama ve vakumda presleme metodu

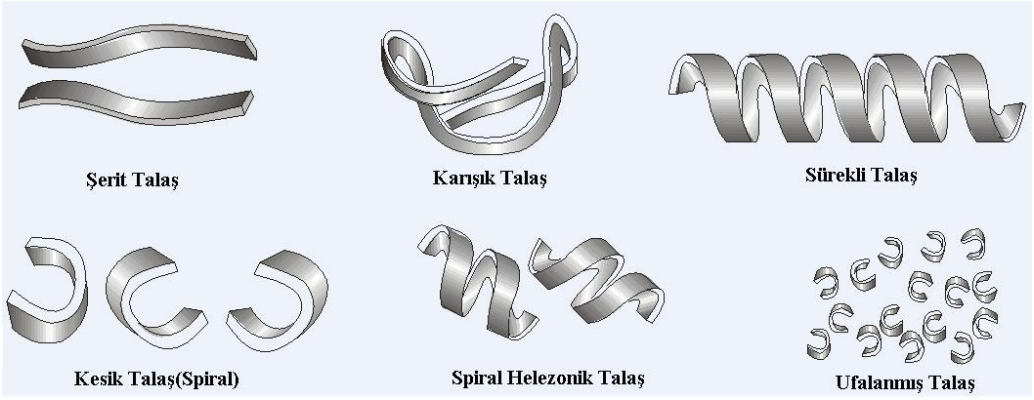
MMK malzemede kullanılacak matris ve takviye elemanı, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini belirlediği gibi üretim metodunun seçimine de doğrudan etki etmektedir (Kuş. 2007).

4. TALAŞ OLUŞUMU ve ŞEKİLLERİ

4.1. Talaş oluşumu ve talaş tipleri

Talaş kaldırma işleminde, önce elastik, akabinde plastik şekil değiştirme, sürtünme, ısı oluşumu, talaşın kıvrılması ve büzülmesi, işlenen parça yüzeyinin sertleşmesi, takım ucunun aşınması olayları gerçekleşir. Takımın parçaya belli bir kuvvetle basması ve kuvvet yönüne doğru hareket etmesiyle takım ucunun temas ettiği metal tabakası önce elastik, sonra plastik şekil değiştir ve metal tabakalarında akmalar başlar ve gerilmeler malzemenin kopma sınırını aştığı anda tabaka talaş şeklinde belirli bir yüzey boyunca parçadan ayrılır. Talaşın şekli, kesme koşullarına (kesme hızı, ilerleme hızı, talaş açısı, eğim açısı, kesme derinliği takım geometrisi ve malzemesi vb.) ve işlenen parçanın malzemesine bağlıdır (Şahin, 2001).

Torna, freze veya benzer diğer takım tezgâhlarında yapılan talaş kaldırma işlemlerinde farklı şekillerde talaş oluşmaktadır. Meydana gelen değişik talaş çeşitleri Şekil 4.1' de gösterilmiştir. Çoğunlukla karşılaşılan talaş tipler; süreksiz(kesintili) talaş, yığma talaş, segment tipi talaş, sürekli(akma) talaş ve dalgalı talaştır (Şahin, 2001).

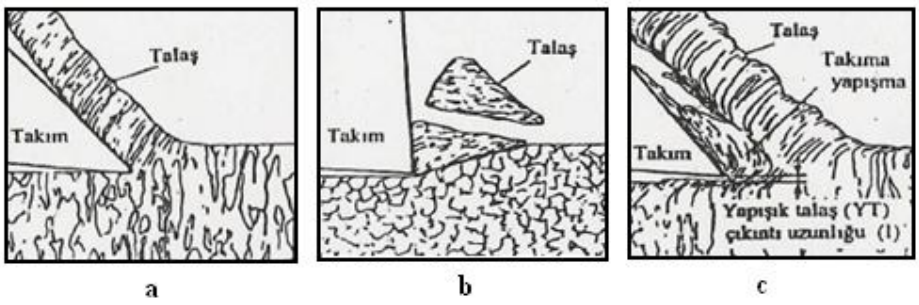


Şekil 4. 1 Talaş şekilleri (Şahin, 2001).

Süreksiz (kesintili) talaş

Süreksiz talaş dökme demir, pirinç sert bronz gibi gevrek malzemeleri işlerken görülür. Bu tip talaş, takım ağzından parça parça veya parçalar birbirine çok zayıf olarak yapışmış bir şekilde çıkar. Talaş, oluşumu esnasında malzeme şiddetli uzamalara

maruz kalır. Düşük kesme hızlarında ve yüksek ilerleme ile sünek malzeme işlenirken de olabilir ancak işlem sonucunda çoğunlukla kötü yüzey elde edilir. Sünek malzemelerin işlenmesi esnasında süreksiz talaş oluşumuna yol açan diğer bir etken de malzeme işlenirken oluşan tezgâh titreşimleri ve "takım otlaması" diye tabir edilen, kesintili kesme şartlarıdır (Akkurt, 2004). Şekil 4.2'de sürekli(a), kesintili(b) ve yığma(c) tipi talaş oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 4. 2 Sürekli Talaş (a), Kesintili Talaş (b), Sıvanmalı Talaş (c) (Akkurt, 2004).

Bunlara ilaveten, kesikli talaşlar; küçük talaş açılı kesici takım malzemeleri ile kesme yapıldığında da oluşabilir.

Süreksiz talaş oluşumu bazı alaşımlarda şu şekilde oluşur. Gerilim yükseltici ikinci fazlar yan yana sıkı paketlenmiş talaşın tamamen ayrılmasına neden olurlar. İkinci fazlar ve inklüzyonlar çoğunlukla birincil ve ikincil kayma bölgelerinde kayma mukavemetini azaltırlar. Bu yüzden kesme kuvvetleri düşüktür.Talaş kaldırma kabiliyeti arttığı için yüzey bitirme iyileşir ve titreşim oluşturma eğilimi azalır.

Düşük hızlarda veya otomat çeliklerinde manganez sülfit artıkları veya grafit lamelli dökme demirler gibi gerilim konsantrasyonu ihtiva eden malzemeler işlenirken, kesikli talaşlar oluşmaktadır (Akkurt, 2004).

Sürekli (akma) talaş

Bu tip talaşta, sürekli bir deformasyonla çatlaksız olarak takım ağzından talaş yüzüne çıkar. Dövme demir, yumuşak çelik, bakır, alüminyum gibi sünek malzemelerin yüksek kesme hızı ile oluşur. Bu koşullarda kesme kararlıdır. Talaş takım yüzü boyunca kayar (Akkurt, 2004).

Sürekli talaş tipinde, metalin akması takım yüzeyine yakın olduğu, takım/talaş ara yüzeyindeki sürtünme veya talaş sıvanmasıyla daha fazla ertelenmediği zaman oluşur. Sürekli talaşla, çok iyi yüzey kalitesi sağlandığından verimli kesme işlemi için ideal olmaktadır. Kesikli talaşta olduğu gibi, metalin doğal sünekliği nedeniyle kırılmalar veya parçalanmalar meydana gelmez. Bu tip talaş şu şartlar altında ortaya çıkmaktadır (Akkurt, 2004):

- Sünek iş parçası,
- Talaş derinliği az olan parça ve nispeten düşük ilerleme miktarı,
- Keskin kesici uçlu takım,
- Büyük talaş açılı kesici uç,
- Yüksek kesme hızları,
- Kesme sıvısı kullanılarak kesici uç ve iş parçasının soğuk tutulması,
- Talaş akma direnci minimum olduğu vb. şartlar altında oluşur.

Ancak talaş akma direnci minimum olması hali de şunlara bağlıdır:

a) Kesici takım yüzeyi iyi parlatılmış olması,

b) Talaş sıvanmasını engellemek için kesme sıvıları kullanılması,

c) Sinterlenmiş karbür gibi düşük sürtünme katsayısına sahip kesici takımlar kullanılması,

d) Kurşun, fosfor ve sülfür gibi alaşım elementleri içeren yumuşak otomat çeliklerinin işlenmesi gibi şartlarla azaltılabilir.

Yığma talaş

Akma talaş tipine benzer. Bu tip talaşa kesme kenarının talaş yüzüne bir miktar talaş yapışarak kesme kenarının şeklini ve geometrisini bozar. Bu talaş oluşumunda talaş ve takım arasında sürtünme çok büyüktür. Talaş malzemesi takım yüzüne kaynar. Bu kaynaklı malzemenin varlığı sürtünmeyi arttırır. Bu sürtünme talaş malzeme tabakası üzerine yeni talaş yığılmasına sebep olur. Yığma ağız giderek büyür ve sonra kararsız olduğu zaman kırılır. Kırılan parçalar bir miktar takım malzemesini de yerinden koparark takım üzerinde mikro oyuklar oluştururlar(Adezyon aşınması) ve takımı zayıflatırlar. Kırılan partiküller talaşın alt yüzeyinde takım yüzeyine temas ederek taşınırlar ve takım yüzeyinde mekanik bir hareketle aşınma meydana getirirler (Abrezif aşınma). Kararlı yığma ağzın, takım geometrisini bozmasına rağmen takım ömrünü arttırıcı etkisi vardır. Bu tip talaşa yumuşak malzemelerin orta kesme hızlarında

işlenmesinde rastlanır. Yukarıda sözü edilen talaş türlerinin dışında, "segment tipi" talaş ve "dalgalı talaş" türlerine de rastlanır (Çakır 1999).

4.2. Metal Matris Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Talaşlar

Çalışmada, bronz (CuSn10) ve çelik (S355JR) malzemelerin, testere tezgâhında işlenmesi sonucu ortaya çıkan talaşlar kullanılarak, MMK malzemenin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bronza ait bazı özellikler

Yapıda matris eleman olarak kullanılan kalay bronzunun, endüstrideki kullanım alanları içerdiği kalay oranına göre farklılık arz etmektedir. Bunlardan bazıları,

- % 3–8 kalaylı bronzun kullanım alanı; Levhadan para ve madalya yapmak tercih edilir. Aşınmaya karşı dayanıklıdır, kolay şekillenir, renk ve parlaklığını muhafaza eder. Bu bronzdan yapılan çubuk, tel ve benzerleri; mücevherat ve süs eşyaları yapımında kullanılır.
- % 8–12 kalaylı bronz deniz suyu ile diğer bazı kimyasal maddelere karşı dayanıklılığı sebebiyle musluk, vana gibi malzemelerin ve makine parçalarının yapımında kullanılır. Ayrıca yapıdaki kalay aşınma direncini artırdığından yatak eleman olarak kullanılır.
- % 13–20 kalaylı bronz mekanik aşınmaya dayanıklıdır, metal yataklarda kullanılır.
- % 30–40 kalaylı alaşımı eski tip bronz, ayna yapımında kullanılırdı. Bu alaşımlar beyaz renkte, sert ve kırılgandır. (Bronzun rengi, kalay oranının artmasıyla, gül renginden yeşilimsi sarı ve beyaz griye doğru değişir). Çok iyi parladığından eskiden ayna olarak kullanılırdı (Smith, 2006).

Çalışmada % 10 kalay oranına sahip CuSn10 bronzu kullanılmıştır. Bu malzemenin, testere tezgahında işlenmesi ile kırık talaş elde edilmiştir.

Çeliğe ait bazı özellikler

Yapıda takviye elemanı olarak kullanılan ve MMK malzemenin ekonomik olmasını sağlayan çelik talaşları, her tür makine parçası imalatı, genel yapı, kara ve demir yolu araçları imalatında kullanılan yüksek mukavemetli yapı çelikleri sınıfına aittir. Üretimi çoğunlukla, profil, levha, tel, çubuk, kalın ve orta kalınlıkta sac halinde gerçekleştirilen yapı çelikleri, ülkemizde üretim hacmi bakımından en büyük paya sahip olmakla birlikte, buna bağlı olarak endüstride tüketimi diğer çeliklere nazaran en büyük olan çelik türüdür (Erdemir Ürün Kataloğu, 2007). Bu çalışmada kullanılan yapı çeliği S355JR talaşı şekil itibariyle, bronz talaşı gibi kırık (kesintili) talaş formundadır.

Bu talaşlara ait diğer özellikler “Toz Metalurjisi” ana başlığı altında verilmiştir.

5. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi (TM) ve parçacıklı malzeme işlemleri, dökümde olduğu gibi net şekilli parça üretimine imkân tanır. Fakat toz teknikleri, sadece düşük sıcaklıkta ergiyen metallere uygulanan dökümden farklı olarak, hemen hemen her malzemeye uygulanabilir. Bundan dolayı, toz metalurjisi yoluyla üretilen ürünlerin pek çoğu, örnek olarak, kompozitler, yüksek sıcaklık seramikleri, bazı polimerler, bakırlı çelikler, refrakter metaller, geniş bir dağılım gösteren intermetalikler, sermetler ve karışık fazlı bileşimler, döküm yoluyla üretilemezler (Hanyaloğlu, 1999).

Geniş uygulama bulan seçeneklerden bir tanesi, kompozit oluşturmak maksadıyla, birbiri içerisinde çözünmeyen tozları çeşitli oranlarda karıştırmaktır. Fazların boyut, şekil ve miktarları bakımından mikro yapıyı kontrol ederek, bu malzemelerde özelliklerin isteklere göre sağlanması başarılır. Ayrıca, TM yöntemi yağlama, süzme ve enerji dağıtımında faydalanılan, gözenekli yapı üretimine de izin verir. Bu ürünlerin imalatında rekabet edebilecek başka bir teknoloji de genellikle yoktur (German, 2007).

TM teknikleri ile üretilen mamuller birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; yataklar, transmisyon milleri, zırh delici mermiler, elektrik temas elemanları, nükleer güç yakıt çubukları, ortopedik protezler, yüksek sıcaklık filtreleri, fren balataları, elektronik kapasitörler, jet motor türbinleridir (Hanyaloğlu, 1999).

TM ile şekillendirmenin önemli avantajlarından birisi, mikro yapı kontrolüdür. Fazlar karışık, hatta bir cihazın ihtiyaçlarını karşılamak için tabakalı olabilir. Diğer malzeme şekillendirme teknikleri, uygulamaya göre mikro yapı sağlama konusunda toz metalurjisi ile yarışamazlar (German, 2007).

5.1. Metalik Partiküllerin Üretim Yöntemleri

Bir tozun nasıl üretildiğinin bilinmesi, o tozun boyutu ve şekli gibi özelliklerinin başlangıçta tahmin edilmesini sağlar. Birçok malzeme toz haline getirilebilir, ancak belirli bir malzemeyi toz haline getirmek için seçilen yöntem; maliyet, tepkimeler ve istenen özellikler gibi faktörlerin göz önünde bulundurulmasıyla belirlenir (Öveçoğlu, 1997). Toz üretiminde kullanılan ana yöntemler,

- Mekanik üretim yöntemleri

- Elektrolizle üretim yöntemi
- Kimyasal üretim teknikleri
- Atomizasyon teknikleri
- Buharlaştırma teknikleridir.

Mekanik üretim yöntemleri

Dört ana mekanik öğütme yöntemi vardır: darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basma. Darbe, malzemeye çekiçle vurma gibi çok hızlı, anlık uygulamaları içerir ve malzeme küçük parçalara ayrılır. Aşındırarak öğütme, aşındırıcıların bir biri üzerinde sürtünme hareketi ile sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesidir. Kesme, talaşlı imalatta olduğu gibi kesme işlemi ile malzemenin parçalanmasıdır. Diş dolgu malzemesi amalgamlarda kullanılan gümüş gibi pek çok metal tozu önceki yıllarda, tornalama ile elde ediliyordu. Kesme ile oluşturulan tozların büyük olma eğilimi vardır. Sonuncu olarak, basma kuvvetleri ile bir malzeme kırılma noktasına kadar deforme edilerek toz haline getirilir.

Haddelenmiş malzemelerin talaşlı imalatında, kesme ile düzensiz şekillerde iri tozlar elde edilmektedir. Metal işleme tekniklerinde ortaya çıkan bol miktarda talaş hurdası metal tozu için büyük bir kaynaktır. Bu hurdalar, kimyasal tekniklerle temizlenir ve boyut küçültmek için öğütülürler. Aslında, öğütme ile parçacık boyutunu veya şeklini değiştirmek çok yaygın bir metottur. Ancak hava ve işleme sıvılarından kaynaklanan, kimyasal kirlilikleri de içeren toz özelliklerinin kontrolünün zayıflığı, bu yöntemin olumsuz tarafıdır (German, 2007).

5.2. Partiküllerin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Toz metalurjisi ile imal edilen parçaların özelliklerini, büyük oranda, bu parçaların imalinde kullanılan partiküllerin sahip olduğu özellikler belirlemektedir. Toz metalurjisi üretim sürecinde elde edilecek ürünlerin mekanik özellikleri, yüzey kalitesi, boyut hassasiyeti yüzey pürüzlülüğü ve presleme basınçları gibi üretim esnasında kullanılacak birçok parametre, kullanılacak metal tozunun özellikleri ile değişiklik gösterdiğinden metal tozlarının özelliklerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Toz özellikleri fiziksel ve kimyasal olarak iki grupta incelenir (Kurt, 2001).

Kimyasal özellikler

TM tekniğinde kullanılan metal tozların kimyasal özellikleri irdelendiğinde, onların saf halde olup olmadıkları, ilk akla gelen husustur. Kimyasal analizlerle tespit edilen, tozların bu özellikleri, üretilen cisimlerin imalatına ve mekanik özelliklerine doğrudan etki etmektedirler. Özellikle metal esaslı tozlar ile mukavemetli alaşımların üretilmesi için önemli bir unsur olan saflık ve kimyasal özellik, sinterlenmiş cisimlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini birinci derecede etkilemektedir. Tozlar kimyasal açıdan üç gruba ayrılır. *Elementel tozlar*, göreceli olarak yüksek saflıkta malzemelerdir ve kimyasal analiz, kompozisyonda az miktarda bulunan, karbon, oksijen ve azot seviyelerini belirlemek için yapılır. Oksijen ve karbon miktarının malzeme içinde ne şekilde bulunduğu da önemlidir. Mesela oksijen levhaları, erimiş oksit veya absorbe edilmiş gazlar halinde bulunabilir. Oksitlerin redüklenmesi ile hazırlanan metalik tozlar genellikle oksit kalıntıları ihtiva ederler. Elektroliz, granülasyon veya pulvarizasyon metodu ile elde edilen tozlarda, oksijen genellikle oksit kalıntıları halinde bulunur. Karbon ise serbest karbon (grafit), karbür veya çözelti hallerinde bulunur (Özçelik, 2007). Bu değerler, yanma teknikleri ile kolaylıkla ölçülebilir. *Ön karışımlı tozlar*, iki ya da daha fazla farklı tozun birleştirilmiş halidir. Buna yaygın bir örnek, ısıtıldığında bronzu oluşturan karıştırılmış bakır ve kalay tozlarıdır. Safsızlık düzeyleri ve karışımın uygun biçimde bileşik hale getirilmesi, ön karışımlı tozların kimyasal sorunlarındandır. *Tamamen bileşik hale getirilen tozlar,* tek bir parçacığı oluşturan bileşenlerin tamamını içermektedir. Bu tür tozlarda bileşim bütünlüğü ve safsızlıklar önemlidir (German 2007).

Fiziksel özellikler

TM tekniği ile üretilecek malzemenin, üretimi esnasında kullanılacak parametreleri ve işlem sonrası kazanacağı tüm özellikleri etkileyecek diğer bir konuda tozların sahip oldukları fiziksel özellikleridir. Bunlar (Hanyaloğlu, 1999);

- Tane boyutu ve dağılımı
- Tane şekli
- Görünür ve ham yoğunluk

- Akıcılık
- Sıkıştırılabilirlik
- Ham mukavemettir.

Tane boyutu ve dağılımı

Metal tozların şekilleri ve boyutları şüphesiz farklılık arz eder. TM üretim tekniğinde kullanılan tozların partikül boyutları 1-200 mikron arasında değişmektedir. Partikül boyutlarındaki dağılımı tespit etmek için, elek analizi, mikroskobik muayene, sedimantasyon gibi farklı yollar kullanılmaktadır. Metal tozlarının tane büyüklüğü, büyük oranda elek analizi ile yapılmaktadır. Ancak 45 mikronun altında tane büyüklüğüne sahip tozların analizinde bu metot çok iyi netice vermemektedir. Çok ince tozlar için sedimantasyon, ışık dağılması, yöntemleri kullanılmaktadır. Homojen olarak dağıtma işlemi parçacık boyutu azaldıkça bir o kadar güçleşir. Özellikle 100µm'den daha küçük parçacıklar, dağıtma işlemine direnç gösteren yüksek çekim kuvvetine sahiptirler (Sarıtaş, 1994).

Tane şekli

Parçacık şekli, paketlemeyi, akışı, ham yoğunluk, ham mukavemet ve sıkıştırılabilirliği etkiler, ayrıca toz üretim esnasında kullanılacak şartların da belirlenmesine yardımcı olur. Parçacık şeklini sayısal olarak ifade etmek zor olduğundan; şeklin bir anlam ifade etmesi için, nitelikle ilgili tanımlayıcılar sıkça kullanılır. Şekil 5.1.parçacık şekillerini ve isimlerini göstermektedir (German, 2007).



Şekil 5.1. Parçacık şekilleri ve isimleri (German 2007).

Mekanik yöntemlerle üretilen metalik tozların şekilleri, küresel olamamaktadır. Lamel şeklinde olan partiküllerin kenarları, kıvrımlı görünüm arz ederler ve genellikle genişlikleri ve uzunlukları, kalınlıklarından daha büyüktür (German, 2007).

Görünür ve ham yoğunluk

Görünür yoğunluk *(G_y)* veya yığılma yoğunluğu, bir tozun sarsılmamış, gevşek durumdaki yoğunluğudur. Toz ağırlığının, serbest düşüş hacmine bölünmesi ile bulunur ve g/cm^3 birimiyle ifade edilir. Pres kalıplarının tasarımında ve istenilen yoğunluğa ulaşmak için uygulanan sıkıştırma yükünün hesaplanmasında göz önünde bulundurulması gereken en önemli toz özelliğidir. Görünür yoğunluk; toz şekline, tane büyüklüğüne ve metalin yoğunluğuna bağlıdır.

Ham yoğunluk *(H_y)*, sıkıştırılmış ham parçanın yoğunluğudur. Toz ağırlığının, sıkıştırılmış hacme bölünmesi ile bulunur ve g/cm^3 veya teorik yoğunluk cinsinden yüzde olarak ifade edilir. Sinterleme sonrasında malzemenin sahip olduğu yoğunluk ise sinterlenmiş yoğunluk olarak nitelendirilir (German, 2007).

Akıcılık

Toz akış hızı, 50g ağırlığındaki bir tozun, Hall akış ölçerden aktığı saniye cinsinden süre olarak ifade edilir. Kısa akış süreleri tozların serbest akışını, uzun akış süreleri ise tozlar arasındaki yüksek sürtünmeyi gösterir. Görünür yoğunluk ve akış

süresi huni hassas hacimli bir kabın birlikte kullanıldığı Hall akış ölçeri ile kolayca tespit edilebilir (German, 2007).

Sıkıştırılabilirlik

Sıkıştırma, tozları şekillendirmenin yaygın bir yoludur. Sıkıştırılabilirlik; bir metal partikül kütlesinin basınç altında yoğunlaşma kabiliyetini gösterir. Bir partikülün sıkıştırılabilirliği aşağıdaki özelliklere bağlıdır (German, 2007).

- ✓ partikülün sertliğine
- ✓ partikül şekline
- ✓ partikül tane büyüklüğü dağılımına
- ✓ kullanılan yağlayıcılara

Ham mukavemet

Sıkıştırılmış toz kütlesinin pişirmeden önceki mukavemetidir. Ham mukavemet tozların bir birlerine kilitlenmelerinden ve kısmen de soğuk kaynaklanma neticesinde oluşur. Sıkıştırma işleminden sonra kalıptan çıkarılan parçaların boyutlarını koruyabilmeleri ve taşınabilmeleri için ham mukavemetleri büyük öneme haizdir. Sıkıştırılabilirlik, tozun şekli, tozun tane büyüklüğü, ham mukavemete etki eden faktörler olarak sıralanabilir. Toz üretim teknikleri, tozun fiziksel özelliklerini belirler. Fiziksel özellikler de tozdan üretilecek parçaların mekanik özelliklerine doğrudan tesir eder (Kurt, 2001).

5.3. Toz Metalurjisi Tekniği İle Parça Üretimi

TM metoduyla parça üretebilmek için tozları parçanın şekline biçimlendirebilmek ve tozlar arasında bağ oluşturmak gereklidir. Biçimlendirme yöntemleri ile parçaya belirli bir şekil kazandırılır ancak, mukavemet sinterleme işlemi sonrasında elde edilir. Ham mukavemet, parçanın taşınabilmesi için gerekli mukavemetin üzerinde olması yeterlidir. Şekil verme işlemi soğuk ya da sıcak olarak gerçekleştirilebilir. Otomasyona çok uygun oldukları için genellikle soğuk basınçlı şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır (German, 2007).

TM metodu ile parça üretimi nihai ölçülerde ve hassas boyutlarda parça üretimine imkân verdiği için çok önemli ve oldukça ekonomik sayılabilecek bir üretim tekniğidir. Parçayı oluşturan tozlar ve yağlayıcılar homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılırlar. Karışım daha sonra kalıbın içerisine doldurulur ve basınç altında sıkıştırılır, son olarak parçalar sinterlenir. Küresel ve iri bronz tozlarından filtre elemanlarının basınç kullanmadan üretimi istisnai bir durumdur. Bu işlemde tozlar uygun şekilli kalıp içerisine doldurulur ve kalıpla birlikte sinterlenir. Tozları sıkıştırmanın tek eksenli presleme, haddeleme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, izostatik presleme gibi birçok metotları vardır. Bu metotların seçimi, parça geometrisine ve üretim miktarına bağlıdır (Özçelik, 2007).

TM ile parça üretimi şu aşamalardan oluşmaktadır (German, 2007);

1. Toz hazırlama (karıştırma)
2. Sıkıştırma (presleme)
3. Sinterleme (pişirme)
4. Sinterleme sonrası işlemlerdir.

Bir parçanın TM ile yöntemiyle imal edilmesini gerekli kılan başlıca kriterler şu şekilde özetlenebilir. Bunlar (German, 2007);

- Üretilen parçanın içeriğindeki elementlerin karışım olarak bulunmasının gerekli olması ya da alaşım yapılmasının zor veya imkânsız oluşudur. Farklı ergime sıcaklıklarına sahip bileşenlerin bir parça içerisinde kullanılması gibi.
- Saf metal haline eritilerek getirilememesi
- Parça hacminin bir kısmını boşlukların oluşturması zorunluluğu (kendinden yağlamalı yataklar gibi)
- Üretim miktarı, kalıp ve presleme gibi tüm giderleri ekonomik kılacak boyutta ise alışılagelmiş yöntemlere göre hızlı ve ucuz olması nedeniyle, malzeme fire ve talaşını azaltma veya sona erdirmesi açısından
- Diğer sebeplerden kaynaklanan zorunluluklardır.

5.3.1. Karıştırma

Karıştırma işlemleri, sinterleme esnasında yeni alaşımların oluşturulması maksadıyla, parçacık boyut dağılımının ve yağlayıcıların da eklenmesi ile oluşan içeriğin homojen olarak dağıtılması işlemleridir. Tozların karıştırılmasının diğer sebebi genel olarak, taşıma sırasında titreşimlerle oluşan ayrışmanın engellenmesidir. Zira kalıp içerisinde titreşime maruz kalan karışımda bulunan nispeten iri partiküller, sıyrılıp yukarı doğru hareket etmektedirler. Parçacık boyutundaki bu ayrışma, sıkıştırma ve sinterleme esnasında birtakım düzensizliklere yol açmaktadırlar. Ayrışmanın üç nedeni bulunmaktadır bunlar (German, 2007);

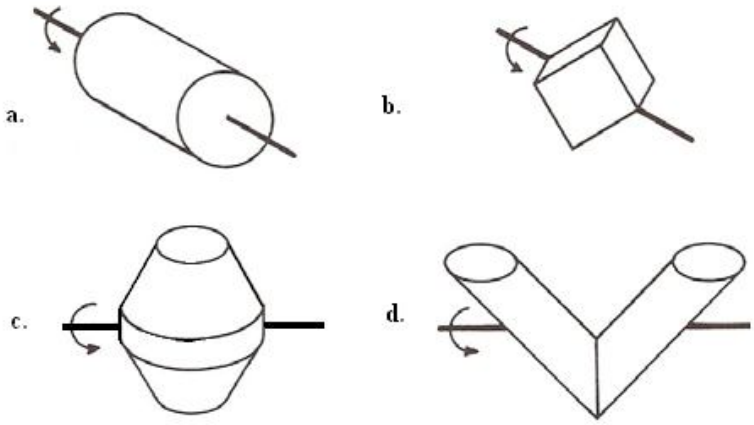
- Parçacık boyutu,
- Yoğunluk farkı
- Şekil farklılıklarıdır.

Ancak boyut farkından ileri gelen ayrışma en baskın olanıdır. Boyut ayrışmasının bir sonucu, yoğunluk değişimi nedeni ile genel görünür yoğunluğun noktadan noktaya değişiklik arz etmesidir. Bu durum, sinterlemede de, daha büyük gözenekli yapıların oluşması gibi düzensizlikler yaratır (German, 2007). Bunun sonucunda üretilecek malzemenin mekanik özelliklerin kötüleşmesi kaçınılmaz olacaktır (German, 2007).

Düzensiz parça şekli boyuta bağlı ayrışmayı engellemektedir. Aynı şekilde parçacık boyutunun yaklaşık olarak 100μm'nin altında olduğu karışımlarda, parçacıklar arası sürtünmenin daha fazla olması nedeniyle boyuta bağlı ayrışma daha az gerçekleşmektedir (German, 2007).

Karışım, imal edilecek parçanın ağırlığı dikkate alınarak, bileşenlerin ağırlıkça yüzdelerin belirlenmesi ve son olarak toplam ağırlığın % 0,5-2,0'si kadar yağlayıcı ilave edilmesi ile oluşturulur. Yağlayıcı olarak, çinko stearat, metalik steratlar, parafin ve toz grafit en çok kullanılmaktadır. Yağlayıcılar, karışımdaki partiküller arası sürtünme ile kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltırlar. Özellikle sıkıştırma esnasında partiküllerin kolayca kaymasını sağladıklarından daha düşük presleme basınçları ile üretimi mümkün kılarlar (German, 2007).

Karıştırma işlemi, şekil 5.3.'de gösterilen prizmatik, çift taraflı konik ve V şekilli kapalı kaplar içerisinde gerçekleştirilir. Karıştırmada, bu kapların hacmen en az % 30-40 dolu olması tavsiye edilmektedir. Karıştırıcı doluluk oranı karıştırma verimini doğrudan etkiler (German, 1989).



Şekil 5.3. Toz karıştırmada kullanılan karıştırıcı tipleri (German, 1989).

Çift taraflı konik karıştırıcı (Şekil 5.3. c.) verimlilik ve kısa karıştırma süreleri açısından en etkin olanıdır.

Karıştırma verimliliğine etki eden diğer bir husus, karıştırıcının dönme hızıdır. Yavaş dönme hızlarında, homojen karışımın elde edilmesi için gereken süre uzayacak ve fazla miktarda serbest düşüş yapan partiküller boyutsal olarak ayrışacaktır. Ancak yüksek dönme hızlarında da partiküller, merkezkaç kuvvetinin etkisi ile karıştırıcı duvarına yapışacak ve akış sağlanamadığı için homojen karışım elde edilemeyecektir. En iyi karıştırma, merkezkaç kuvvetinin küçük olduğu, ancak türbülans oluşumuna izin veren hızlarda gerçekleşmektedir (German, 2007).

5.3.2. Sıkıştırma

TM ile parçaların, önceden belirlenen boyutlarda ve özelliklerde üretimini gerçekleştirmek amacıyla, tozların, hazırlanan kalıpların içerisinde, basınç etkisiyle istenilen yoğunluğa getirilmesi işlemine sıkıştırma (presleme) denir. Bu işlem esnasında kullanılan en yaygın metot tek eksenli kalıpta sıkıştırma işlemidir. Partiküller, basınç uygulandığında, önce birbirleri üzerinden kayarak ve daha sonra da yüksek basınçlarda şekil değiştirerek yoğunlaştırılırlar. Yoğunluk artışı düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artan bir şekilde direnç gösterir. Sıkıştıra işlemi şu üç aşamada gerçekleşir (German, 2007);

- İlk olarak görünür yoğunluğa sahip toz partikülleri, basınç uygulanmaya başlandığında, yer değiştirmeye ve yeniden pozisyon almaya başlarlar. Bu aşamada henüz kalıcı deformasyon yoktur ancak kısmen bazı partiküllerde kırılmalara rastlanabilir. Bu aşamada partiküllerin boyutu, boyut dağılımı, şekli ve yüzey özellikleri ile partiküller arası sürtünme önemli rol oynamaktadır.
- Elastik ve plastik deformasyonun birlikte görüldüğü bu aşamada, partiküller arası soğuk deformasyonla bağlar ve mekanik kilitlenmeler oluşabilir. Basınç uygulandıkça, deformasyon miktarına bağlı olarak parçalar arası etkileşim önem kazanır.
- Şekil değiştirme, partiküllerin sertliğini artırdığından, sıkıştırmayı devam ettirmek için daha yüksek basınçlara ihtiyaç duyulur. Bu aşamada toz partiküllerinin kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanır. Uygulanan yüksek basınç sebebiyle partiküller arası soğuk kaynak oluşur.

Neticede parça, geriye dönüşü olmayan bir noktaya kadar sertleştirilmiş olur. Toz cinsi ve kalıp malzemesine bağlı olarak, en üst sıkıştırma basıncı 1000Mpa değerine kadar çıkabilir. Tozun sıkıştırılması esnasında kalıp duvarı ile toz partikülleri arasında sürtünme meydana gelmektedir. Bu durum, parçanın iç kısımlarında basıncın azalması ile istenen yoğunluğa erişimi zorlaştırmaktadır. Ayrıca kullanılan kalıbın ömrünü de oldukça kısaltmaktadır. Tozların sıkıştırılmasında basınç, mukavemet, yoğunluk ilişkilerini etkileyen çok sayıda önemli iç ve dış etkiler vardır. İç etkenler, sertlik, plastik deformasyon sertleşmesi, yüzey sürtünmesi ve malzeme özellikleridir. Dış etkenler ise toz tane büyüklüğü, yağlama çeşidi, sıkıştırma yöntemi gibi özelliklerdir (German, 1989).

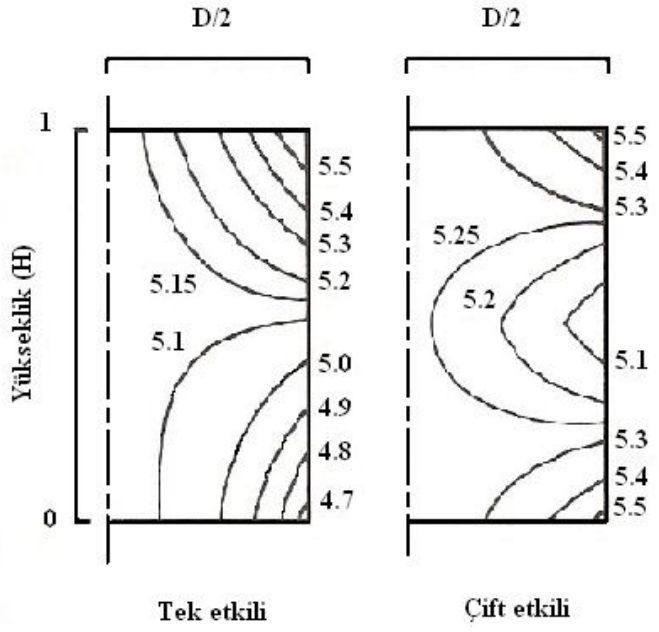
Tozların sıkıştırılmasında şu yöntemler kullanılmaktadır (German, 1989):

- Sabit kalıp içerisinde sıkıştırma
- İzostatik sıkıştırma
- Enjeksiyon kalıplama
- Ekstrüzyon ile sıkıştırma
- Yüksek enerjili sıkıştırma

- Haddeleme ile sıkıştırmadır.

5.3.2.1. Sabit kalıp içerisinde sıkıştırma

Soğuk olarak sabit bir kalıp içine dökülen metal tozlarının, tek bir eksende uygulanan kuvvetle sıkıştırılarak mekanik olarak bağlanması, ham mukavemetin sağlanması esasına dayanır. Basıncın alt ve üst zımbaların her ikisinden de yapıldığı işleme çift etkili sıkıştırma, tek bir zımbadan uygulanırsa, tek etkili sıkıştırma adını alır. Tek etkili sıkıştırmada sıkıştırma işlemi, üst zımba ile yapılmaktadır. Ancak işlem sonunda parçanın ham yoğunluğu, parçanın üst zımbaya temas eden yüzeyinden uzaklaştıkça azalmaktadır. Bunun nedeni üst zımba tarafından iletilen kuvvetin zımbaya daha yakın partiküllere nazaran alt kısımlardaki partiküllere iletilememesidir. Tek etkili sıkıştırmada gözlenen bu yoğunluk farkı, çift etkili sıkıştırma yönteminde dengelenebilmektedir. Şekil 5.3'te bu durum gösterilmektedir (German, 2007).



Şekil 5.2. Tek ve çift etkili sıkıştırmada yükseklik-yoğunluk ilişkisi (German, 2007)

Kompozitin üretimi esnasında, ham yoğunluğun, MMK malzemenin her noktasında aynı olabilmesi maksadıyla, presleme işlemi iki kez yapılmaktadır. Yapılan ilk preslemenin ardından parça kalıptan çıkarılarak, zımbayla temas eden yüzeyin karşısında olan diğer yüzeye ikinci presleme uygulanmakta, bu sayede ilk presleme

sırasında, zımbaya uzak kalan bu bölgelerin istenen yoğunluğa erişimi sağlanmaktadır (German, 2007).

5.3.2.2. Sıkıştırma hataları

Sıkıştırılmış metal parçaların yapısındaki hatalar parça mukavemetini hata nispetinde azaltır. Sıkıştırma sırasında genellikle 2 tür hata ile karşılaşılır. Bunlardan birincisi, sıkıştırma sırasında parçadaki düzlemsel çatlaklar şeklinde kendini gösteren ve katmanlaşma dediğimiz hata, diğeri parçanın kalıptan çıkarılması sırasında genleşme ile meydana gelen geri yaylanma denilen hatalardır (Kurt, 1992).

Katmanlaşma

Katmanlaşma, parça içerisinde sıkıştırma yönüne dik, yatay çatlakların meydana gelmesi ile şeklinde görülür. Katmanlaşma genellikle şu nedenlerle oluşur (Kurt, 1992):

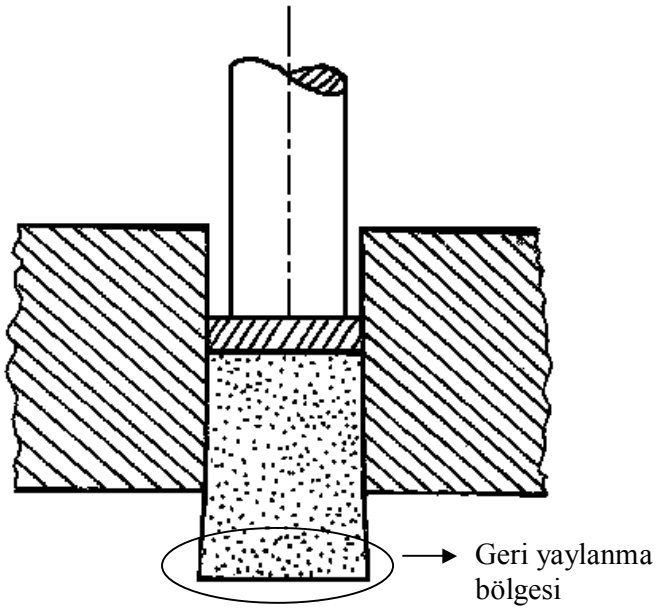
1. Sıkıştırılan parça içerisindeki yoğunluk farkından, genellikle gözenek miktarının fazla olduğu ve hızlı yoğunluk değişiminin görüldüğü, parçanın alt bölgelerinde,
2. Kötü kalıp tasarımından; parça kalıpta iken yük kaldırıldığında kalıptaki elastik genleşmeden dolayı parçanın dışındaki gerilmeler kırılmaya neden olur.
3. Uygulanan sıkıştırma basıncı ile gözeneklerde hapis kalan hava, parçada ayrılmalara neden olabilir.

Geri yaylanma

Kalıptan sıkıştırılan parçanın boyutları kalıptan çıkarılması esnasında bir miktar artabilir. Boyutlardaki bu artışa geri yaylanma veya elastik genleşme denir. Bu normal bir olay olmakla birlikte, boyutlardaki artış miktarı fazla olursa parça içerisinde çatlamalar olacaktır (Kurt, 1992).

Geri yaylanmayı azaltmak için, kalıba hafif bir koniklik verilmeli veya iki parçalı kalıp kullanılmalıdır. Böylece kalıp içindeki parçanın genleşmesi yavaş

olacağından geri yaylanma azalmış olacaktır. Şekil 5.4'de kalıptan çıkarma sırasında parçadaki geri yaylanma hatası gösterilmiştir (Kurt, 1992).



Şekil 5.4. Geri yaylanma hatası (Kurt, 1992).

Metal talaşlarının sıkıştırılması öncesinde karışımın kalıp içerisinde homojen bir biçimde şarj edilmemesi, her noktada eşit görünür yoğunluğa sahip olmamasıdır. Bu husus özellikle, eğme numunesi gibi genişliği yüksekliğinden çok daha büyük numunelerde önem kazanmaktadır. Kalıp içerisinde eşit görünür yoğunluğa sahip karışımlar, sıkıştırma sırasında ve sonunda homojen ham yoğunluğa sahip olabilmektedirler (Kurt, 1992).

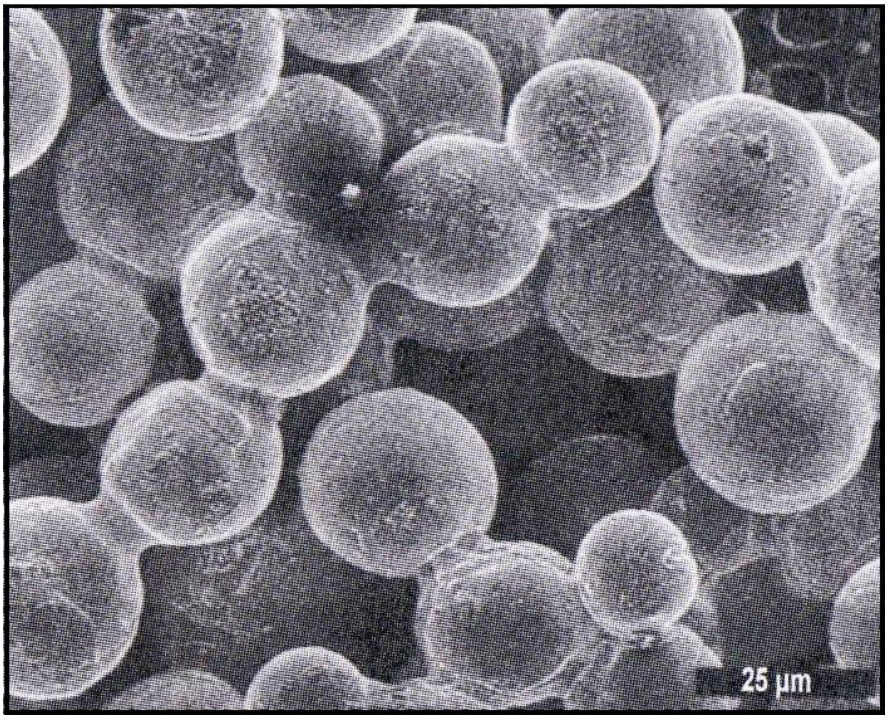
Sıkıştırmada homojen ham yoğunluğa sahip olmayan numunelerin, sinterleme sonrasında farklı yoğunluk gradyenleri nedeniyle çarpıldıkları ve çoğunlukla eğildikleri gözlenmiştir.

5.3.3. Sinterleme

Sinterleme işlemi, toz haldeki malzemenin difüzyon yardımı ile erime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa belirli bir süre maruz bırakılarak tozların birbirlerine temas noktalarından başlayarak kaynaşması işlemidir. İki ya da daha fazla alaşım elemanı içeren metal tozlarına, genellikle ana metalin ergime sıcaklığının altında, bağlayıcı

metallerin ergime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta sinterleme işlemi yapılır. Sinterleme işlemi, küçük partiküllerin yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi, parçacık boyutu ile ters orantılıdır. Bu nedenle, daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olan küçük boyuttaki parçacıklar, daha yüksek enerjiye sahiptir ve daha hızlı sinterlenirler (German, 2007).

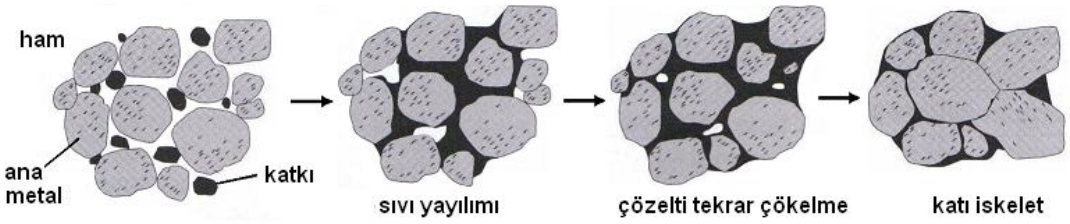
Birçok ham parçada, sinterleme işlemi sırasında boyut, yoğunluk, mukavemet, sertlik, elektrik ve ısıl iletkenlik ve Young modülü gibi özellikler değişir. Sinterleme öncesinde, preslenmiş toz parçalarının arasındaki bağlantı, mekanik kilitlenme, yapışma ve benzeri türden zayıf bağlardır. Bunlar kristal kafes sistemi içindeki bağ dayanımına göre daha zayıftır. Sıkıştırılmış toz taneleri birbirlerine temas veya nüfuz etmiş durumda olsa bile, her bir tane diğerinden bağımsızdır. Sinterleme ile, tane temas noktalarının büyümesi sonucu özgül yüzey alanının küçülmesi, gözenek hacminin azalması ile birlikte küreselleşmesi ve dislokasyon gibi kristal hataların azaltılması sağlanır. Mikro yapı ölçeğinde, bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Şekil 5.5'de verilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde küresel parçacıklar arasında katı halde boyun oluşumu görülmektedir (German, 2007).



Şekil 5.5. Küresel bronz parçacıklarında sinterleme ile boyun oluşumunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (German 2007).

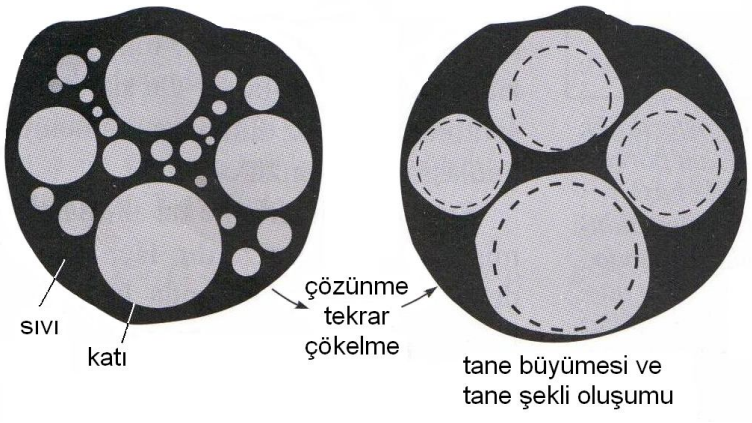
5.3.3.1. Sıvı fazlı sinterleme

Sinterleme işlemi sırasında, en az bir bileşenin ergiyerek sıvı faz oluşturmasına sıvı faz sinterleme denilmektedir. Sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu sinterleme hızını büyük ölçüde artırır. Esas olarak sıvı faz, taneleri birbirine bağlayan ve içinde hızlı yayınımın olduğu lehimi oluşturur. Sıvı faz sinterleme için temel şart ıslatmadır. Sıvı fazlı sinterlemede ki yoğunlaşma aşamaları şekil 5.6'de şematik olarak verilmiştir (German, 2007).



Şekil 5.6. Sıvı faz sinterleme aşamaları (German 2007).

Başlangıçta ısıtma sırasında taneler katı hal sinterlemesiyle birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Bundan sonra çözelti tekrar çökelme olarak bilinen işlemde sıvı katı atomların taşıyıcısı olur. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinden yayınır ve daha sonra büyük tanelerin üzerine çökelir. Katı tane çözünürlüğü tane boyutu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla öncelikle küçük taneler sıvı faz içerisinde çözünür. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar. Çözelti-tekrar çökelme işlemi, küçük tanelerin çözünmesi ve daha sonra büyük tanelerin üzerine katı faz çökelmesi ile tane büyümesini sağlar. Tane büyümesinin yanısıra, işlem tane yerleşimine imkan tanır, katının daha iyi paketlenmesini ve kalan boşlukların doldurulması için sıvının serbest bıraklımasını sağlar. Şekil 5.7.'de çökelti-tekrar çökelme işlemi ve tane irileşmesi gösterilmektedir (German,2007).



Şekil 5.7 Sıvı faz sinterleme aşamaları (German 2007).

Sinterlemede, bileşenlerin boyutu yoğunlaşma sürecini yavaşlatır. Sıvı fazın hacim oranı arttıkça, gözenekleri dolduracak sıvı miktarı daha fazla olduğundan yoğunlaşmada kolaylaşır. Eğer ortamda yeterli miktarda sıvı yoksa, sinterleme katı-hal mekanizması ile gerçekleşir. Fazla sıvı olması durumunda ise, sıvı faz oluşumu ile bütün gözenekler dolar ancak bu durumda ham parça şeklini koruyamayabilir (German,2007).

6. TRİBOLOJİ

Sürekli temas ve hareket nedeniyle meydana gelen sürtünme sonucunda oluşan ısı, aşınma adı verilen, istenmeyen yüzey değişikliklerini de beraberinde getirir. Genel anlamda aşınma, birbiri ile temas ve hareket halinde bulunan cisimlerden, çalışma esnasında oluşan mekanik yüklemeler sonucunda, mikroskobik parçacıkların kopmasıyla oluşan istenmeyen yüzey değişikliğidir. Aşınma, yıpranma hususunda kendisini çok yavaş hissettirmesine rağmen, uzun zaman diliminde çok önemli kayıplara yol açmaktadır. Aşınmanın malzeme kaybına yol açmasının yanında, makine elemanlarının şeklini bozarak, onların iş yapma kabiliyetini azaltması veya yok etmesi ise çok daha önemlidir. Aşınmanın en aza indirilmesi için, birbiri ile uyumlu malzemelerin seçiminin yanında, çalışma şartları da çok önemlidir. Birbiri ile sürtünerek çalışan malzemelerin aşınması, yağlama sistemlerinin kullanılmasıyla en aza indirilir. Fakat bazı sistemlerde yağlamanın faydadan çok zarar getireceği unutulmamalıdır. Özellikle sürtünme yoluyla çalışan kavramalarda ve fren sistemlerinde, birbiri ile temas halinde çalışan yüzeylere yağın bulaşması, bu sistemlerin verimli çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple birbirleri ile uyumlu çalışabilecek ve en az aşınacak malzeme seçiminin yapılması büyük önem taşımaktadır (Akkurt, 1998).

Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşıt cisim, aralarında belirli bir ara cisim varken, az ya da çok yük altında hareket ettirildiklerinde aşınırlar. Yanlış bir kanıya göre, düzgün yüzeyde aşınmanın az, pürüzlü yüzeyde ise çok olacağı sanılır. Hâlbuki sürtünme yüzeylerinin belirli bir pürüzlülük derecesinden daha düzgün işlenmesi, düşünülenin tersine, aşınmayı çoğaltır. Aşınma olayında etkili olan faktörleri çoğu zaman kontrol altında tutmak mümkün değildir. Çalışırken meydana gelen küçük değişiklikler bile aşınma olayını büyük ölçüde etkilemektedir (Akkurt, 1998).

Karşılıklı çalışan parçalardan değiştirilmesi kolay ve maliyeti daha az olanını daha çabuk aşınan bir malzemeden yapmak suretiyle diğer parçanın ömrünü uzatmak, aşınma olayının neticesinde ortaya çıkan teknik çözümlerden biridir (Akkurt, 1998).

6.1. Sürtünme

En genel manada sürtünme, temasta olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasında harekete karşı ortaya çıkan direnç olarak tanımlanır. Sürtünmenin

sayısal değeri bazı durumlarda hesaba katılmayacak kadar küçük olsa dahi pratik olarak daima mevcuttur. Sürtünme direncini oluşturan parametreler oldukça fazladır ve bunların etkileri büyük farklılıklar göstermektedir. Bağıl hareketin türü, elemanların fiziksel durumları, aralarında üçüncü maddenin bulunup bulunmadığı ve ortam şartları gibi parametreler olayı daha karmaşık bir hale getirmektedir (Ludema, 1996).

Sürtünme esasına göre çalışan sistemlerde basınç, kayma hızı, sıcaklık, aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı olmak üzere beş önemli faktöre dikkat edilir. Sürtünme esnasında uygulanan basınç nedeniyle sıcaklığın artması, sürtünme katsayısı üzerinde önemli rol oynar. Isınan malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak sürtünme katsayıları değişir ve bir süre sonra malzemeler görevlerini yapamaz hale gelirler. TS 555'e göre sürtünme katsayısı, disk veya kampana ile disk fren veya kampana fren arasındaki sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranı olarak tanımlanır ve soğuk (normal) sürtünme katsayısı ve sıcak sürtünme katsayısı olmak üzere ikiye ayrılır (Akkurt, 1998).

6.1.1. Sürtünme mekanizmaları

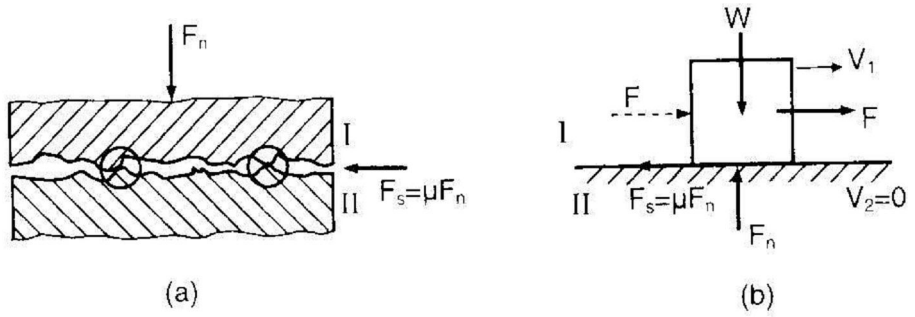
Sürtünme kavramı, birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasında yağlayıcı maddenin olup olmaması bakımından, temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru sürtünme, yarı sıvı (sınır) sürtünme ve sıvı sürtünme olarak üç durumda incelenir (Akkurt, 1998).

6.1.1.1. Kuru sürtünme

İzafi hareket halinde olan iki kuru parçanın temas yüzeylerindeki sürtünme durumu olup yüzeyler birbiri üzerindeki pürüzler üzerinde temas ederek kayar. Yüzey pürüzlülüğünün yüksekliği yağlama bölgesinde sürtünmenin artışına sebep olduğu bilinmektedir. Kuru sürtünmeli yüzeyler arasında bir ara madde veya yağlayıcı yoktur (Şekil 4.1.a). Teorik olarak kuru sürtünme modeli şekil 4.1.b'de gösterilmiştir. Coulomb kanunu esas alındığında, izafi hareket yapan ve normal kuvvet (F_n) etkisinde bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında, harekete ters yönde olan,

$$F_s = \mu . F_n \qquad (6.1)$$

şeklinde tanımlanan bir sürtünme kuvvetinin (F_s) oluştuğu görülür. Burada μ sürtünme katsayısıdır (Akkurt, 1998)..

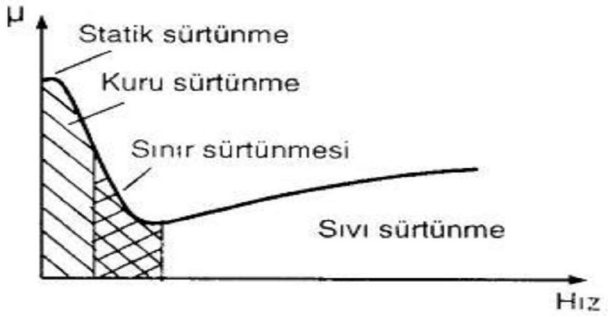


Şekil 4.1. a. Kuru sürtünmeli yüzeyler. b. kuru sürtünme modeli (Akkurt, 1998).

Yukarıda şekilde görüldüğü gibi katı cisimlerden W ağırlığındaki cisme bir F kuvveti uygulanırsa, iki durum ortaya çıkar. Birinci durumda, kuvvete rağmen cisimlerin birbirleri üzerinde kayma hali (sabit kalmaları) olmayıp, yüzeyler arasında statik veya durgun sürtünme şeklinde tanımlanan bir direnç oluşur. Bu hal için kuvvetlerin dengesinden,

$$F_s = F \tag{4.2}$$

yazılır. Uygulamada, kavrama ve frenler gibi sürtünme esaslı elemanlarda bu tür sürtünme söz konusudur. İkinci durumda F kuvvetinin etkisinde yüzeyler birbiri üzerinden kayar. Kinematik sürtünme denilen bu durumda Fs sürtünme kuvveti, F kuvvetinden daha küçük ve harekete ters yöndedir. Pratikte bu tür sürtünme söz konusu olup aşınma sıcaklık yükselişi ve enerji kaybı gibi olaylar bu sürtünme sonucu ortaya çıkar. Stribeck sürtünme eğrisi, iki yüzey arasındaki izafi harekete göre sürtünme halleri, geçiş bölgeleri ve sürtünme katsayısının hız ile değişimini vermektedir (Şekil 4.4) (Akkurt, 1998)..



Şekil 4.4. Stribeck sürtünme eğrisi (sürtünme katsayısı- hız grafiği) (Akkurt, 1998).

Sürtünme eğrisinden de görüldüğü gibi, karşılıklı çalışan sistemlerde, hareketin başlangıcında ve durma sırasında kuru ve sınır sürtünmesi halleri ve bunlara bağlı olarak aşınmalar meydana gelir. Bu nedenle hidrodinamik sıvı sürtünmesi halinde dahi sistemlerin aşınması tamamen önlenemez (Akkurt, 1998).

6.1.1.2. Sınır sürtünmesi

Sürtünen yüzeylerin arasına yağlayıcı olarak tanımlanan maddelerin girmesi veya gönderilmesi durumunda yüzeyler artık kuru olmayacaktır. Bu durumda sürtünme, yağlanmış yüzeyler arasında meydana gelecektir. Yağlanmış yüzeyler arasında sınır sürtünmesi ve film sürtünmesi şeklinde tanımlanan sürtünme mekanizmaları oluşmaktadır. Teorik olarak kuru sürtünme ile film sürtünmesi arasındaki sürtünme durumu, sınır sürtünmesi olarak tanımlanır (Akkurt, 1998).

6.1.1.3. Sıvı sürtünme

Birbirine karşı izafi hareket eden iki katı cisim arasında yüzey pürüzleri birbiriyle temas etmeyecek şekilde ince bir yağ filmi oluşturulduğunda sıvı sürtünmesi hali söz konusudur. Bu çalışma durumunda sürtünme doğrudan doğruya yağlayıcı sıvının tabakaları arasında olur. Metal yüzeyler arasındaki yağ tabakasında oluşan basınç dış kuvveti dengeleyecek bir değere ulaştığında yüzeyler birbirinden tamamen ayrılmış olur. Yağlama hesaplarında, sıvı sürtünmede, muylunun yatak zarfına değmesine imkân vermeyen bu yağ filminin kalınlığı tespit edilmeye çalışılır (Akkurt, 1998).

6.2. Aşınma

Aşınma; temas halinde olan malzemelerin yüzeylerinden mikroskobik parçaların veya tabakalar halinde pulcukların ana yapıdan kopup ayrılması olayıdır. Malzeme yüzeyinde oluşan değişikliklerin aşınma sonucu gerçekleştiğini söylemek için şu şartların sağlanması gerekir;

- Mekanik zorlama
- Cisimlerin izafi hareketi (sürtünme olayının gerçekleşmesi)
- Hareketin sürekli olması
- İstenmeden meydana gelmesi (Ludema, 1996).

Aşınma, malzeme kaybının yanında, makine elemanlarının şekillerini bozarak onların iş yapma kabiliyetlerini azaltır ve zamanla yok eder. Örnek olarak matkapla delme işlemi veya freze ile bir malzemeden talaş kaldırma işlemi sırasında matkapta ve freze çakısında meydana gelebilecek malzeme kayıpları aşınma olarak nitelendirilir, bu durum, hiç şüphesiz istenmeyen bir durumdur. Delinen veya talaş kaldırılan malzeme üzerinde meydana gelen madde ayrılmaları ise şekil verme olarak adlandırılır ve kolay bir şekilde olması arzu edilir (Ludema, 1996)..

Aşınan ve aşındırılan malzemelere aşınma çifti adı verilir. Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşıt cisim, az ya da çok yük altında hareket ettirildiklerinde aşınma olayı meydana gelir. Bu esnada, bu iki yüzey arasında bir ara cisim bulunabilir. Aşınma çifti arasındaki ara malzeme, sert taneli, sıvı ve gaz halinde olabildiği gibi, aşınma sırasında malzemelerden kopan parçacıklarda ara malzeme olacak şekilde aktif olarak aşınma olayına katılabilirler. Aşınma çifti ile ara malzemeye, birlikte "aşınma kombinasyonu" adı verilir (Ludema, 1996)..

Aşınma olayında, şu altı parametre oldukça önem arz etmektedir. Bunlar (Akkurt, 1998);

1. Ana malzeme (aşınan),
2. Aşındıran,
3. Ara malzeme,
4. Hareket,

5. Yük,
6. Sıcaklık.

Aşınma olayı sırasında bunların büyüklüğü, yönü, süresi ve hızı ile sıcaklık değişimi tespit edilir.

Aşınma olayına doğrudan etki eden diğer faktörlerde incelenmelidir (Akkurt, 1998).

Malzeme seçimi

Aşınma dayanımını artırmak için, birbiriyle temas halinde çalışan parçaların malzemeleri farklı seçilmelidir. İki farklı malzemenin birbiriyle kaynak yapabilme özelliği kötü olduğunda, adhezyon aşınması daha zor gerçekleşir (Akkurt, 1998).

Pürüzlülük

Genellikle, yüzey pürüzlülüğü arttıkça temas noktaları (yükü taşıyacak olan gerçek alan) azaldığı için aşınma miktarı artacaktır. Ancak bunun aksine, pürüzsüz sayılabilecek bir yüzeyde aşınma artıklarının kalabilmesi ve sürtünen iki yüzeyin arasındaki çekim kuvvetinin fazla olması da adhezyon ve abrazyon aşınmalarını arttıracaktır (Akkurt, 1998).

Sertlik

Diğer faktörler sabit kalmak üzere sertliğin arttırılması aşınma miktarını azaltır. Sertleştirilmemiş malzemenin yüzeyinde deformasyon sertleşmesine maruz mikro bölgeler oluşur. Bu bölgeler kolayca kopar. Aşınma dayanımını arttırmak için alaşımlandırmayla veya ısıl işlemle yüzey sertleştirilmelidir (Akkurt, 1998).

Yüzey işlemleri

Yüzeyde kimyasal, elektro-kimyasal veya termo-kimyasal metotlarla oluşturulacak tabakalar birlikte çalışan iki metal arasındaki sürtünme katsayısını ve tutunabilme özelliğini azaltıcı etki yaptıkları için, aşınmaya karşı olumlu yönde katkıda bulunurlar. Bu işlemlerde elde edilecek reaksiyon tabakası metal matrisine rijit bir

şekilde tutunarak çeşitli çalışma şartlarında yüzeyden koparak abrasif etki oluşturmamalıdır (Akkurt, 1998).

Yağlama

Aşınmaya karşı alınabilecek en ekonomik ve kolay tedbirdir. Yağlayıcı maddenin görevi sürtünen yüzeyler arasındaki metal-metal sürtünmesi yerine sıvı-metal sürtünmesini sağlamaktır. Kullanılan yağlayıcılar yağlama özelliğini uzun süre muhafaza edebilecek ve mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklara kadar yağlama görevini sürdürebilecek niteliklere sahip olmalıdır (Akkurt, 1998).

Temas geometrisi

Sürtünme elemanlarının temas geometrisi aşınma miktarını etkiler. Aşınma artıklarını iki yüzey arasından dışarı çıkmaları kolaylaştıkça parçaların abrazyon aşınması azalır (Akkurt, 1998).

Çevre

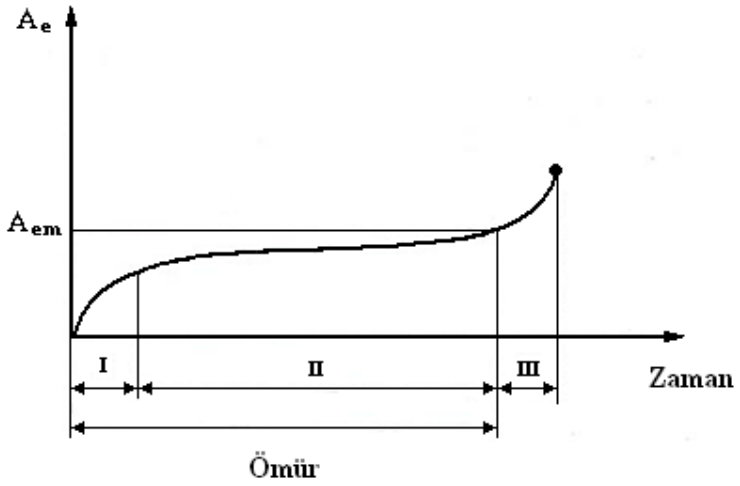
Aşınma miktarına diğer bir etkende çevredir. Atmosferde bulunan oksijen yüzeyde koruyucu oksit tabakası oluşturur. Ortam olarak soy gaz (argon v.b) kullanıldığında oksit oranı azalacaktır. Bu oksit tabakalarının koparılmasıyla metal-metal teması oluşur ve parça adhezyon aşınmasına uğrar. Ayrıca atmosferdeki bağıl nem oranı da aşınmayı etkilemektedir. Bağıl nem oranı arttıkça sürtünme katsayısı azalmakta, dolayısıyla aşınma miktarı düşmektedir (Akkurt, 1998).

Zaman

Metal yüzeyinin yorulması ve deformasyon sertleşmesi devir sayısına, frekansa ve toplam zamana bağlıdır. Dolayısıyla yüzeyin aşınması zaman, frekans ve devir sayısının fonksiyonu olmaktadır (Akkurt, 1998).

6.2.1. Aşınma türleri

Aşınmanın sınıflandırılması birkaç değişik yolla yapılabilmektedir. Aşınmanın miktarına göre hafif aşınma şiddetli aşınma olarak sınıflandırılacağı gibi mekanik, kimyasal ve termal olarak da sınıflandırılabilir. Pratik bakımdan aşınma olayları zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Zamanla meydana gelen aşınma Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi olay üç safhadan ibarettir (Akkurt, 1998).

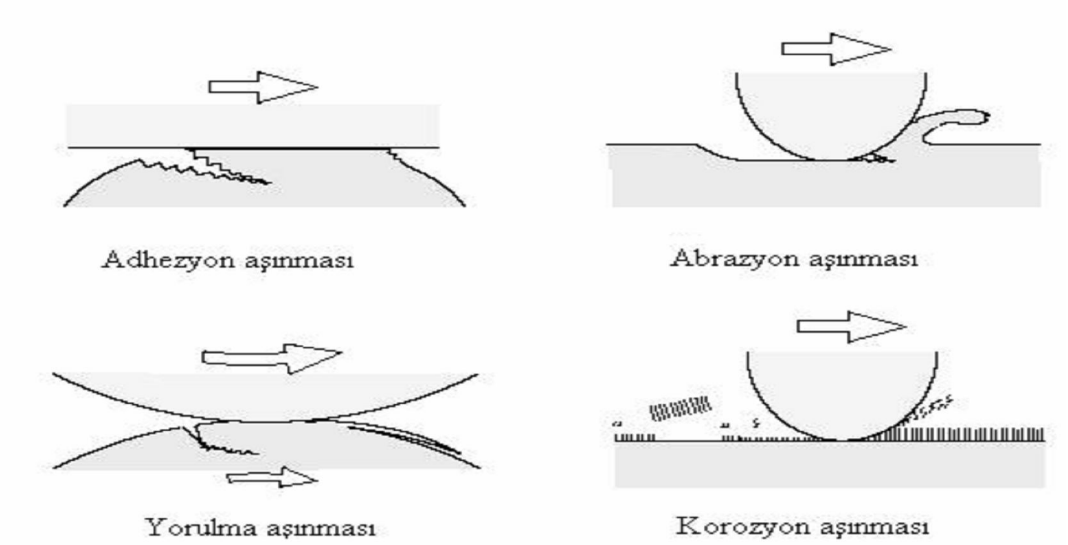


Şekil 4.5. Aşınma-zaman eğrisi (Akkurt, 1998).

Birinci safhada (I), yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj denilen bu aşama, parçaların birbirine alıştırma safhasıdır. İmalatın devamı olarak sayılabilecek bu safha parçanın daha sonraki aşınmasını büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle parçaların rodajın iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi önemlidir. Genellikle rodaj, yüksüz ve normal hızdan daha küçük hızlarda yapılır. Rodajın iyi ve kısa sürede tamamlanması için özel yağlar kullanılır. Çünkü rodaj bölgesinde yüzey pürüzlülüklerinin fazla olması bu safhanın fazla aşınma meydana getirmesiyle sonuçlanır. İkinci safha (II), esas çalışma sırasındaki aşınmayı gösterir. Aşınma hızı oldukça artan üçüncü safhaya (III), şiddetli aşınma bölgesi denir. Aniden meydana gelen aşınmada, parçaların yüzeyleri birden bire bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir çalışmaz duruma gelir. Genellikle, eş çalışan malzemelerin

seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersiz olmasından meydana gelir (Akkurt, 1998).

İkinci sınıflandırmada göz önüne alınan husus parçanın maruz kaldığı etkilerdir. Adhezyon, abrazyon, yorulma, mekanik aşınma çeşitleridir. Korozyon ve erozyon ise kimyasal aşınma çeşitleridir (Şekil 4.6).



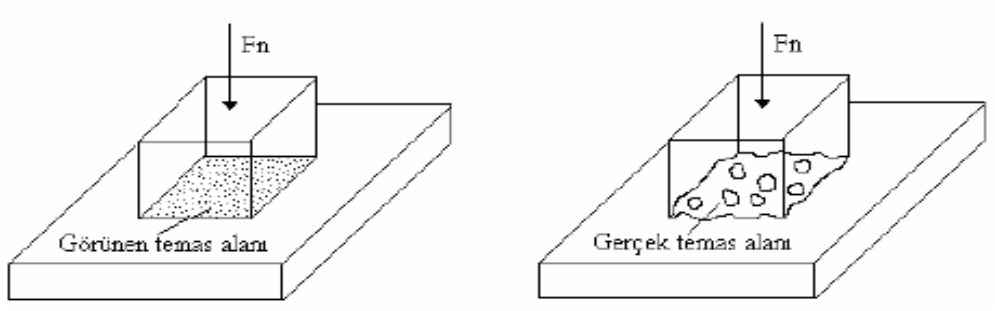
Şekil 4.6. Aşınma çeşitleri (Akkurt, 1998).

Aşınma olayını meydana getiren unsurların farklı durumlarına göre bunların değişik kombinasyonları, değişik aşınma tiplerinin ortaya çıkmasına neden olur. Aşınma, malzemelerin cinsi, yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, malzemenin işlenme şekli ve sertlik gibi parametrelerin değiştirilmesinden etkilenmektedir (Akkurt, 1998).

6.2.1.1. Adhezif aşınma

Temas halinde olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan kuru kayma yüzeylerinde daima mevcut olan bir aşınma türüdür. Kayma aşınması olarak da adlandırılır. Aşınma, kayan ara yüzeylerde metal-metal temas noktalarının soğuk kaynak oluşturması nedeniyle oluşur. Kaynak oluşmuş temas noktası, tamamen veya kısmen parçalandığında malzeme aşınma ürünü haline gelir ve kopan parçacıklar serbestçe düşebilir veya yüzeyler arasında kalarak abrasif aşınmaya neden olabilirler. Bu oluşumda yüzeylerin karşılıklı fiziksel ve kimyasal etkileşimleri önemli ölçüde rol oynamaktadır. Kayma halinde yüksek basınçlara ilaveten, temas noktalarında aşırı sıcaklık artışlarının da olması, kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Oluşan bağ,

malzeme yüzeyleri ne kadar temiz ise, o oranda kuvvetli olmaktadır. Rutubet, absorbe gazlar ve yağlayıcı maddelerin varlığı bağ kuvvetini ve dolayısıyla aşınmayı azaltır (Akkurt, 1998).



Şekil 4.7. Görünen ve gerçek temas alanları (Akkurt, 1998).

Şekil 4.7'de şematik olarak gösterildiği gibi malzemenin temas eden yüzeyleri ne kadar hassas işlenirse işlensin yüzeyde mikroskobik girinti ve çıkıntıların olduğu bir gerçektir. Bu bakımdan temas halinde olan iki yüzey bu çıkıntılar vasıtasıyla temas eder. Bu çıkıntıların arasındaki girintiler ise temas alanının dışında kalır. Pürüzsüz yüzeylere sahip eş çalışan malzemelerde bile, temas, oldukça kısıtlı alanlar üzerinde gerçekleşir. Bu dar alanlar üzerindeki gerilmeler, malzemenin akma sınırını geçebilmektedirler. Yüzeydeki oksit tabakası parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynama meydana getirir. Kayma hareketi ile bu noktalardaki mikro kaynakların kesilmesi sonucu yenme ve aşınma olayı gerçekleşir (Akkurt, 1998).

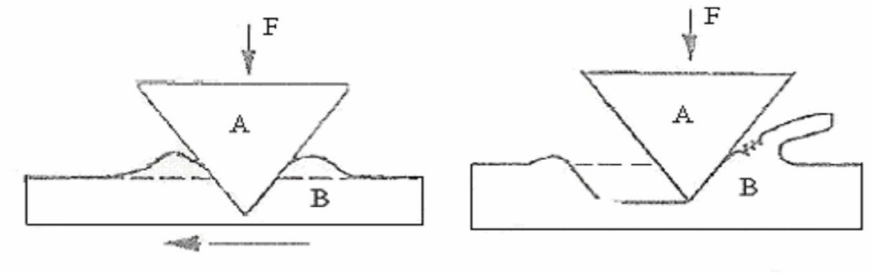
Bu güne kadar yapılmış deneysel çalışmalarda adhezyon aşınmasına ait birçok önemli sonuçlar elde edilmiştir. Adhezyon aşınmasının, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana geldiği, eş çalışan yüzeylerin, izafi hızıyla ve normal kuvvetle arttığı, yüzeyler üzerinde bulunan oksit veya yağ tabakasının, aşınma üzerinde çok etkili olduğu, temiz yüzeylerde, aşınmanın daha küçük ve hafif yüklemelerde bile görülebileceği gözlenmiştir. Ayrıca eş çalışan yüzeylerde, yüzey sertliği düşük olan tarafta kaynak bağlarının koptuğu ve sert yüzeye taşındığı görülmüştür (Akkurt, 1998).

Yapılan bu çalışmaların ışığında, adhezyon aşınmasına karşı alınacak önlemler kısaca özetlenecek olursa;

- Malzeme çifti benzer ya da kolay alaşım yapabilecek malzemeler arasından seçilmemeli, ayrıca malzemelerin sahip olduğu sertlik değeri arasında fark olmalıdır.
- Eş çalışan yüzeyler arasında, kimyasal film oluşturmak ya da sürtünmeyi azaltacak, oluşan ısıyı uzaklaştıracak iyi bir yağlama yöntemi ile aşınma minimize edilebilir.
- Malzemelerin yüzey pürüzlülüğü azaltıldığı takdirde, aşınma azalmaktadır.

6.2.1.2. Abrazif aşınma

Sürtünen sert yüzeylerin, daha yumuşak malzemeleri kesmesi şeklinde meydana gelen aşınma türüdür (Şekil 4.8.). Sert partiküller ya dışarıdan sisteme girerler ya da adhezif aşınma ürünleri olarak sistemin içinde meydana gelirler. Sert yüzey pürüzleri, kesici takım gibi işlev görerek daha yumuşak malzemelerden parçacık koparır. Aşınmadan dolayı kopan parçacıklar, yabancı maddeler gibi davranır ve aktif olarak aşınmaya iştirak ederler (Akkurt, 1998).



Şekil 4.8. Abrazif aşınma mekanizması (Akkurt, 1998).

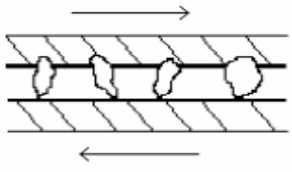
Abrasif aşınma mekanizmasında etkili olan temel faktörler (Akkurt, 1998);

- Sertlik,
- Aşındırıcı, tane veya pürüzün boyutu ve şekli,
- Uygulanan normal yük
- Kayma hızı olarak sayılabilir.

Abrazif aşınmayı önlemek maksadıyla aşağıdaki önlemler alınmalıdır (Akkurt, 1998).

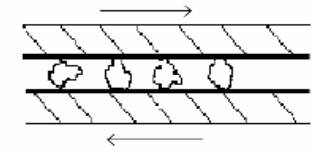
1. Eş çalışan yüzeylerin, daha sert malzemeyle kaplanması ya da ısıl işlemlerle, malzemenin çok fazla gevrekleşmesine izin vermeden yüzeylerinin sertleştirilmesi,
2. Sisteme dışarıdan sert partiküllerin girmesini önlemek için gerekli önlemleri almak, bu partiküller yağlayıcı vasıtasıyla da sisteme girebildiklerinden, filtre kullanılarak önlem alınması,
3. Sistemin belirli periyotlarda temizlenmesine ve gerektiğinde değiştirilmesine imkân tanıyan tasarımların tercih edilmesidir.

Abrazif aşınmanın iki türü bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, *iki elemanlı abrazyon*; sürtünen yüzey çiftlerinden sert ve pürüzlü olanın veya yüzeylerden birisine gömülmüş sert bir partikülün, diğer yüzeyi kazıması olayıdır (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. İki elemanlı abrazyon mekanizması (Akkurt, 1998).

Sürtünen yüzey çiftlerinin dışında, üçüncü bir eleman serbest aşındırıcı olarak, yüzeylerin arasında bulunması ve her iki yüzeyde kazıyıcı etki yapması üç elemanlı abrazyon olarak adlandırılır (Şekil 4.10.).



Şekil 4.10. Üç elemanlı abrazyon mekanizması (Akkurt, 1998).

6.2.1.4. Diğer aşınma çeşitleri

Erozif aşınma

Erozif aşınma, abrasif aşınmayla birçok yönden benzerlikler göstermektedir. Erozif aşınmanın abrasif aşınmadan temel farkı, aşınmanın, sert partiküllerin yüzeyi kazımasından ziyade yüzeye çarpması sonucunda oluşmasıdır. Buna örnek olarak gaz türbinlerinin nozul ve kanatçıklarının yanma ürünleri içersindeki katı parçacıklar tarafından aşındırılması verilebilir. Sert partiküllerin bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma, abrasif erozyon olarak adlandırılır. Sert partiküllerin bağıl hareketleri yüzeye dik olduğunda aşınma, çarpma erozyonu olarak adlandırılır. Erozif aşınmayı etkileyen temel faktörler, aşındırıcı partikülün özellikleri (aşındırıcı boyutu, şekli, sertliği), aşınmaya maruz kalan elemanın özellikleri (elemanının sertliği ve yüzey kalitesi) ve ortamın özellikleri (partikülün çarpma veya yalama hızı, çarpma açısı ve birim zamanda çarpan partikül miktarı) olarak üç ana grup altında incelenebilir (Akkurt, 1998).

Kazımalı aşınma

Kazımalı aşınmada mikro kaynaşma oluşumu ile malzeme kaybı gözlenir. Bu yönüyle her ne kadar adhezyon aşınmasına benzese de bu aşınma tipinde yüzeyler birbirlerine göre hareket etmezler. Titreşimli ortamlarda çok rastlanan bir aşınma tipidir (Akkurt, 1998).

Yorulma aşınması

Değişik yüklemeler etkisi altında meydana gelen bir aşınma türüdür. Böyle bir aşınma çok sayıda yükleme periyodundan sonra meydana gelmektedir. Yüzey bölgesi, titreşimli değişken zorlanmaya maruz kaldığı zaman malzeme yüzeyinin hemen altında mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların yüzeye ulaşması sonucunda pulcuk kalkması meydana gelir ve yüzeyden büyük parçacıklar koparak çukur ve oyukların oluşmasına neden olur. Dişli ve rulmanlarda soğuk veya sıcak haddeleme işlemlerinde

görülmektedir. Bu tip aşınmada temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması ile kendini gösterir (Ay 2008).

6.2.2. Aşınma deneyi yöntemleri

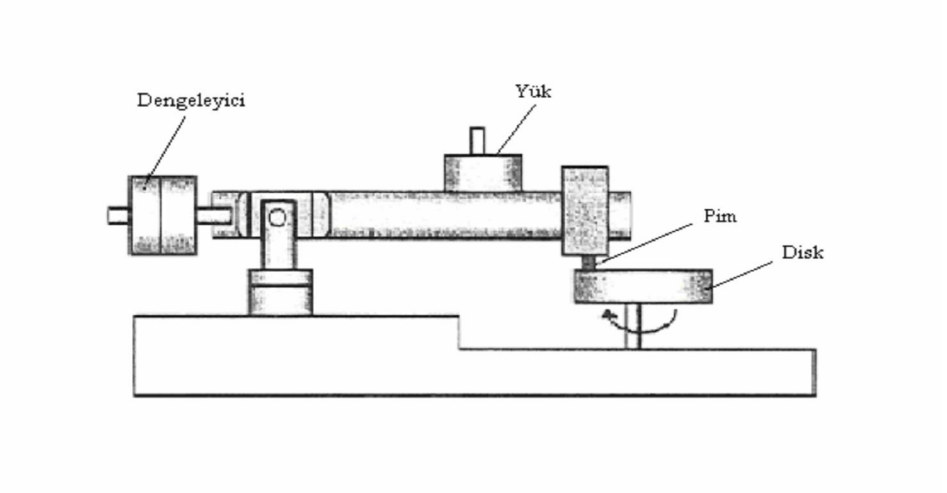
Sistem veya sistem elemanlarının sürtünme ve aşınma davranışlarının belirlenebilmesi için yapılan testler, tasarım açısından oldukça önemlidir. Sürtünme ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, gerçek makineler veya model deney düzenekleri kullanılarak yapılmaktadır. Doğrudan makine üzerinde ve gerçek şartlarda yapılan deneyler hem oldukça pahalıdır, hem de karmaşık tribolojik etkiler nedeniyle değerlendirilmeleri zordur. Bu sorunları ortadan kaldırmak için birçok model deney yöntemleri geliştirilmiştir. Sürtünme direnci ve aşınma dayanımının ölçülmesinde kullanılan model deney yöntemlerinin sayısının fazla olmasının sebebi, sürtünme ve aşınma mekanizmalarının ve tribolojik sistemlerin fazla olmasındandır. Bu sebeple günümüzde sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı uluslararası standartlarla belirlenmiş test teknikleri ve parametreleri kullanılarak yapılmaktadır (Ludema, 1996).

Sürtünme ve aşınma testleri genellikle aynı sistemler üzerinde yapılmaktadır. Buradaki en önemli parametre ölçüm yöntemlerindeki farklılıklardır. Yine test süresi de önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Sürtünme testleri çoğunlukla kısa sürerken, aşınma testleri bazen çok uzun süreler alabilmektedir. Sürtünme ve aşınma testleri için geliştirilen model deney sistemlerinin temel prensipleri şu şekilde sıralanabilir (Ludema, 1996);

- Pim-disk,
- Blok-halka,
- Silindir-silindir,
- Çapraz silindir,
- Levha-kayış
- Pim-levha
- Dört bilye

Pim disk test metodu

Pim-disk (disk üzerine pim) yöntemi, model test yöntemlerinin en basit ve en yaygın kullanılanlarından birisidir. Deneyde kullanılan yatay döner disk genellikle metal bileşenlerden oluşmaktadır. Deneyde aşınma durumu incelenecek olan numune koni, küre veya silindir şekline sahip bir pimdir. İzafi kayma hızı, diskin merkezi ile pimin temas noktası arasındaki radyal "r" mesafesi değiştirilmek suretiyle ayarlanabilir. Pim üzerinden diske uygulanacak normal yük, mekanik, pnömatik veya bir hidrolik silindir vasıtasıyla sağlanabilir. Bu test tekniği kullanılarak kuru kayma halindeki sürtünme ve aşınma davranışları incelenebilmektedir. Bu metot özellikle abrasif aşınma türünün tespiti için uygundur (Hutchings 1996). Şekil 4.11'de çalışmada kullanılan pim disk cihazı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Pim-disk test cihazı (Akkurt, 1998).

6.2.3. Aşınma miktarının ölçülmesi

Bir sürtünme sisteminde, aşınma miktarını ölçmek için, çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sürtünme elemanlarının malzeme özelliklerine ve sistemin yapısına bağlı olarak yöntem seçimi yapılmalı ya da beklenenleri yerine getirecek şekilde yöntem kombinasyonu veya geliştirilmesi yoluna gidilmelidir. Bir sürtünme sisteminde aşınma miktarını ölçme yönteminden; yüksek hassasiyet, kolay ve seri uygulama, teknik sistemlerde ve modellerinde paralel uygulanabilmesi ve ekonomik olması beklenir. En yaygın olarak kullanılan aşınma değerlendirme yöntemleri, tartma ve boyutlardaki

değişimlerin ölçülmesidir. Eğer aşınma hacimleri küçükse parçaları tartarak karşılaştırmak zor olabilir. Aşınma yüzey üzerine muntazam olmayan bir şekilde dağılabilir. Bu durumda yerel aşınma hasarlarının ölçümü, toplam kütle kaybının ölçümüne göre daha uygundur (Hutchings 1996).

6.3. Kaymalı Yataklar

Dönel ve doğrusal hareket altında kuvvet ve hareket ileten mil, aks ve tabla gibi elemanların eksenel ve radyal yöndeki kuvvetleri taşıyan ve destekleyen elemanlara yatak denir. Miller, dönel ve doğrusal hareketlerini bir yerden başka bir yere nakletmek amacıyla üzerlerine dişli çark, zincir, kayış-kasnak ve kavramalar bağlanır. Yataklar, millerin bu görevlerini icra edebilmesi için desteklik yapar ve millerin hareketlerini kolaylaştırırlar (Babalık, 2006).

Yataklar, devir sayısı, yük, darbeli ve darbesiz çalışma, ortam sıcaklığı gibi çalışma koşullarına bağlı olarak tercih edilir. Yuvarlanmalı yataklara göre daha ucuz olan kaymalı yataklar titreşimli, sarsıntılı çalışma koşullarında daha yüksek performansa sahiptirler. Ayrıca büyük güç veya kuvvetlerin iletilmesinde daha elverişlidirler. Krank millerinde, hadde merdanelerinin yataklanmasında, takım tezgâhlarında, kara ve demir yolu taşımacılığında ve birçok endüstri sektöründe yaygın bir biçimde kullanılırlar (Babalık, 2006).

6.3.1. Kaymalı yatak malzemeleri

İyi bir yatak malzemesinin birbirleriyle çelişen iki özelliğe sahip olması istenir. Bunlardan birincisi, yatağın dışarıdan uygulanan yüklere karşı koyabilmesi için yeterli basma ve yorulma mukavemetine sahip olmasıdır. İkincisi ise, yatağın hafif olması, düşük erime noktası ve düşük Young modülüne sahip olmasıdır. İkinci gruptaki istekler malzemenin aşınmasına veya gömme kabiliyetine sahip olması için istenir. Böylece malzeme, sert parçacıkları abrazyon aşınmasını önlemek için bünyesine gömebilir. Aşınmaya karşı dirençli ve sürtünme katsayısı düşük olmalıdır. Çünkü yatakların tamamı en azından belli bir zaman için sınır yağlama durumunda çalışmak zorundadır (Shigley, 1986).

Yatak malzemesi seçiminde diğer faktörler, korozyona karşı direnç gösterebilmesi, kolaylıkla işlenebilmesi, düşük ısıl genleşme, iyi ısıl iletkenlik ve

mümkün olduğu kadar ucuz olmasıdır. Endüstride kullanılan yatak eleman malzemeleri şu şekilde açıklanabilir (Babalık, 2006);

- Teflon
- Naylon (polyamid)
- Dökme demirler
- Çelik döküm
- Bronzlar
- Beyaz metal
- Alüminyum ve alaşımları
- Gözenekli metallerdir.

Metal tozlarının, sıkıştırılıp sinterlenmesi ile elde edilen bu malzemeler oldukça yüksek boşluk miktarına sahiptirler. Yağlama gözeneklere emdirilen yağlayıcılarla sağlanır. Bu tip yataklara *kendinden yağlamalı yataklar* da denir.

Kendinden yağlamalı yataklar TM metodunun en eski ve en başarılı uygulamalarından birisidir. Toz metal endüstrisinde %7-8'lik bir oranı teşkil etmektedir (Özçelik, 2007). Bu oran TM uygulamalarının en büyük bölümünü oluşturmaktadır. Parçadaki gözenekler yağ deposu olarak çalışır. Mil dönmeye başlayıp ısınınca yağlar mile doğru akarak yağlamayı sağlar. Milin durarak soğuması halinde ise kılcal hareketlerden dolayı yağ tekrar gözeneklere döner (Sarıtaş 1994).

Gözenekli kaymalı yataklar üç gruba ayrılır, sinterlenmiş bronz yataklar, demir esaslı sinterlenmiş yataklar ve demir-bronz sinterlenmiş yataklar, ilk ve çok kullanılan TM yatak %90 Cu ve %10 Sn içeren bronz (CuSn10) yataklardır (Schatt ve ark,1997). Yükün büyük, hızın küçük olduğu çalışma şartlarında tercih edilirler (Sarıtaş 1994). Kalay bronzlarında, kalay oranı arttıkça sertlik ve kırılganlık artar (Babalık, 2006).

Yatak tozuna istendiğinde katı yağlayıcı olarak %1-1.5 değerleri arasında grafit ya da molibden disülfit karıştırılabilir (Sarıtaş 1994).

Kaymalı yataklardaki gözenek miktarı toplam hacmin %15'i ile %30'u arasında değişebilmektedir. Sinterleme sonrası bu yatakların yağ, gres emdirilir. Yatağın çalışması sırasında, gözenekler sıcaklığın etkisi ile küçülür buna ilave olarak yağın, metale göre daha yüksek genleşmeye sahip olması, gözenekteki yağın yataktan mile doğru hareket etmesine sebep olur, böylece yatakta kendi kendine yağlama sağlanmış olur. Dönme işlemi bittiğinde ise yatak soğur ve kılcallık etkisi ile yağ yatak tarafından

tekrar geri emilir (Nortbert, 1998). Aşağıda çizelge 6.1'de çeşitli TM yatakların mekanik özellikleri verilmiştir (Sarıtaş 1994).

Çizelge 6.1. Gözenekli TM yatakların özellikleri (Sarıtaş 1994).

	Bronz	**Demir**	**Demir-Bronz**
Çekme Dayanımı (MPa)	80-100	--	80-200
Sertlik (BSD)	30-40	40-50	--
Max. Statik yük (MPa)	22-28	--	28
Max. Yavaş dönme yükü (MPa)	1.7-3.9	1.6-4.8	1.4-2.8
Max. Hız (m/s)	7.6	4.0	--
Max. PV (MPa m/s)	40000-50000	30000-40000	25000-50000
Max. Çalışma sıcaklığı (°C)	65	65	--

Uygulamalarda genellikle bronz ve demir alaşımlı kaymalı yataklar tercih edilmektedir. Bronz yatakların mekanik özellikleri demir yataklara göre düşük olmakla birlikte sürtünmeleri daha küçük olduğu için tercih edilir. Diğer taraftan, TM kaymalı yataklarda demir miktarı arttıkça sertlik artar. Yani demir yatağa olumlu mekanik özellik kazandırır. Fakat sürtünme miktarı fazladır. Bakır ile birlikte kullanılması yatağa akma mukavemeti kazandırıp sürtünmeyi azaltır (Tüfekçi, 2003).

6.4. Sürtünme Elemanları

Endüstride sürtünme malzemeleri çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe ağır ticari araçlar-otomobillerde, vinçlerde, uçaklarda, motosikletler, demir yolu sektöründe, takım tezgâhlarında sıklıkla rastlanmaktadır. Sürtünme malzemelerinden şu özellikler beklenir (Blau, 2001);

- Her çevre şartında yüksek statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip olmalıdır.
- Değişken sıcaklıklarda dinamik sürtünme katsayısı kararlı olmalıdır.
- Aşınma karakteristiğinin minimum seviyelerde olması gerekir. Aynı zamanda karşı yüzeydeki aşınmayı da minimum düzeyde tutması gerekir.
- Kırılmalara ve çatlamalara karşı mukavemetli olması için kayma gerilmesi dayanımı yüksek olmalıdır.

- Yüksek korozyon direncine sahip olmalıdır. Çünkü çalışma şartları su, tuz, kum, çamur gibi korozif ortamlar olabilir.
- Isı iletim katsayısı büyük olmalıdır. Aksi halde yük altında sürtünme nedeni ile sıcaklık yüksek seviyelere çıkabilir
- Karşı yüzey ile üniform ve uyumlu bir düzeyde ısı üretebilecek karakteristiğe sahip olmalıdır.
- Çalışma esnasında titreşimlere neden olmamalıdır.
- Ham madde, üretim ve işleme maliyeti düşük olmalıdır

Aşağıda, çizelge 6.2'de sürtünme malzemeleri ve özellikleri geniş bir aralıkta görülmektedir. Bu malzemelerin bazıları üzerine yağ püskürtülerek veya yağ emdirilerek ıslak ortamlarda çalışabilmektedir. Bu durumda sürtünme katsayıları oldukça düşer, ancak daha fazla ısının uzaklaşmasına olanak sağlanır ve daha yüksek basınçlarda kullanıma izin verilebilir (Blau, 2001).

Çizelge 6.2. Sürtünme malzemeleri ve özellikleri (Blau, 2001).

Malzeme	Sürtünme Katsayısı		Max. Sıcaklık	Max. Basınç
	Islak	Kuru	(°C)	(kPa)
D.Demir-D.Demir	0.05	0.15-0.2	320	1000-1750
Toz metal*-D.Demir	0.05-0.1	0.1-0.40	540	1000
Toz metal*-Sert çelik	0.05-0.1	0.1-0.30	540	2100
Tahta-Çelik yada D.Demir	0.16	0.2-0.35	150	400-620
Deri-Çelik yada D.Demir	0.12	0.3-0.5	100	70-280
Mantar-Çelik yada D.Demir	0.15-0.25	0.3-0.5	100	50-100
Keçe-Çelik yada D.Demir	0.18	0.22	140	35-70
Dokuma asbest*-Çelik yada D.Demir	0.1-0.2	0.3-0.6	175-260	350-700
Kalıplanmış asbest*-Çelik yada D.Demir	0.08-0.12	0.2-0.5	260	350-1000
Emdirilmiş asbest*-Çelik yada D.Demir	0.12	0.32	260-400	1000
Grafit-Çelik	0.05-0.1	0.25	370-540	2100

*Bu gruptaki özel malzemelere göre sürtünme katsayıları ±%5 değişebilir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar ana başlığı altında öncelikle, çelik-bronz kompozit malzemenin üretimi ve üretim sürecinde sırasıyla yapılan işlemler detayları ile anlatılmıştır. Ardından, kompozit malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerini belirlemek için yapılan testler ve test parametrelerine değinilmiştir. Son olarak kompozitin TEM ve metal mikroskobundan alınan görüntüleri ile mikro yapı incelenmiştir.

7.1. Çelik/Bronz Talaş Kompozit Malzemenin Üretimi

Bu çalışmada, endüstride geri dönüşümü büyük oranda döküm metodu ile gerçekleştirilen atık metal talaşlarının, bu metottan daha ekonomik, daha hızlı ve daha verimli bir metot kullanılarak (Gronostajski, 1997) kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında sıkıştırılıp, TM tekniğinde olduğu gibi sinterlenerek üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerin mekanik ve aşınma-sürtünme özellikleri yapılan testlerle tespit edilmiştir.

Ağırlıkça üç farklı çelik ve bronz talaş oranının seçildiği kompozit malzemeler hacmen %25 gözenek oranına sahip olacak şekilde üretilmiştir. Bu oran tüm kompozit grupları için sabit tutulmuştur. Bu gözenek oranı, talaş karışımlarının oda sıcaklığında sıkıştırma sırasında uygulanan basınç değerinin ve sinterleme sıcaklığının hassas bir şekilde yapılan bir dizi ön deneyle belirlenmesiyle sağlanabilmiştir.

Kompozit malzemelerin üretimi, sırasıyla aşağıdaki işlemler takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

- Talaşların temini ve boyutlarına göre sınıflandırma,
- Talaşların yıkanması,
- Ağırlıkça oranlanması ve yağlayıcı (toz grafit) eklenmesi,
- Karıştırma
- Oda sıcaklığında sıkıştırma,
- Sinterleme
- Son işlemler (yüzey temizliği ve boyutlandırma)

7.1.1. Çelik ve bronz talaşların fiziksel - kimyasal özellikleri

Bu çalışmada çelik ve bronz talaşların boyutları, gözenek boşluğu 800µm (20 mesh) olan elek kullanılarak düzenlenmiştir. Elekten geçebilecek boyutlarda olan talaşlar kullanılmıştır.

Kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmesi ve üretim maliyetini azaltması amacıyla, kolay bulunabilen S355JR (EN10025 normu) çelik malzemeye ait testere talaşları kullanılmıştır. Bu malzemenin seçilmesinin amacı, düşük karbon oranına sahip olması ve endüstride en çok kullanılan çeliklerden olmasıdır. S355JR'nin bu düşük karbon oranı onu nispeten yumuşak yapıda olmasına sebep olmaktadır. Bu özellik, bilhassa talaşların oda sıcaklığında sıkıştırılmaları esnasında, büyük avantaj sağlamakta, sıkıştırma işleminde, malzemenin planlanan hacimce boşluk oranlarına erişimi için daha düşük basınçlara ihtiyaç duyulmaktadır (German 2007). Ayrıca TM tekniğinde, sıkıştırma sırasında yumuşak partiküller, birbirlerine göre kolay şekil değiştirmekte, mekanik kilitlenmelere ve soğuk kaynak oluşumuna imkân tanımaktadırlar. Diğer bir önemli husus ise bu malzemenin, daha yüksek oranda karbon içeren malzemelere oranla, daha az aşındırıcı özellik taşımasıdır. Eş çalışan yüzeylerde, nispeten sert malzemeler, karşı yüzeyi aşındırmaktadır (Akkurt, 1998).

Yapıya katılan çelik talaşlarının kimyasal bileşimi, Geçgel Mak. A.Ş. laboratuarlarında yapılan spektral analizler sonucunda doğrulanmış ve içerik çizelge 7.1'de verilmiştir. İncelemelerde elde edilen çelik ve bronza ait sonuçların literatürde belirtilen değer aralıkları içerisinde olduğu tespit edilmiştir. S355JR'nin sahip olduğu özgül ağırlık yaklaşık olarak 7.8 g/cm^3'tür.

Çizelge 7.1. Çelik (S355JR) malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

Malzeme	C	Si	Mn	$P_{(max)}$	$S_{(max)}$	N	Fe
S355JR-3	0,24	0,55	1,60	0,040	0,040	0,009	Kalan

Kompozit malzemenin içerisine, hem matris eleman olarak görev yapması, hem de malzemenin aşınma özelliklerini iyileştirmesi için CuSn10 bronzuna ait testere talaşları katılmıştır. Kendinden yağlamalı yatak malzemeler arasında yaygın kullanıma sahip bronz, aynı zamanda TM yönteminde de yaygın kullanılmasına sebep olan,

yüksek bağlayıcılığı ve sahip olduğu yüksek aşınma özelliği nedeniyle seçilmiştir. CuSn10 bronzuna ait spektral analiz sonucu çizelge 7.2'de görülmektedir. CuSn10 bronzunun özgül ağırlığı 8.8 g/cm^3'tür.

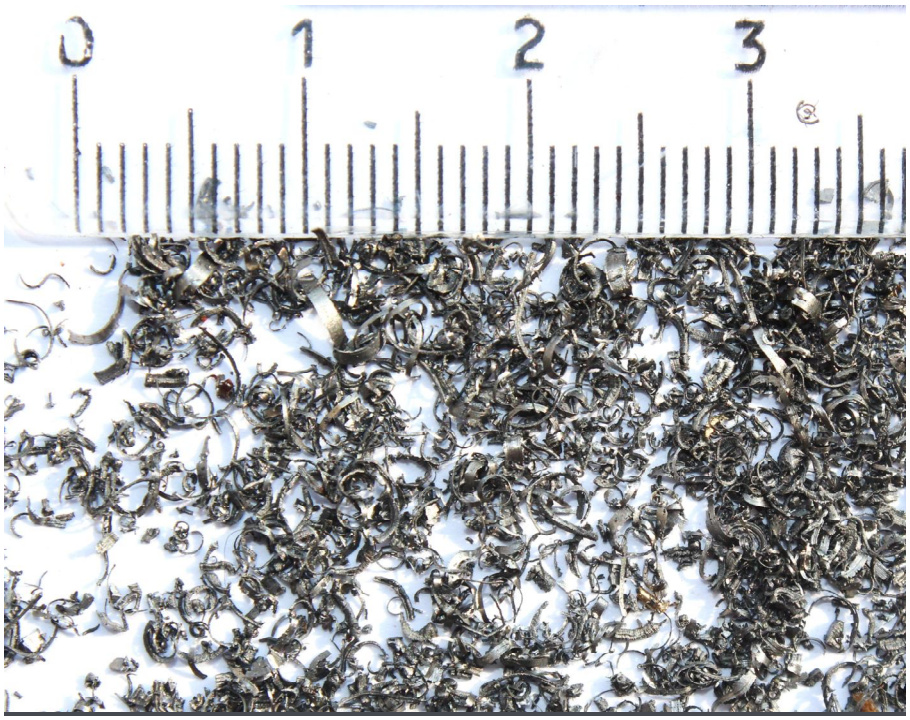
Çizelge 7.2. Bronz (CuSn10) malzemenin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

Malzeme	Cu	Sn	Pb	Ni	Fe	Zn	Si	P	Mn
CuSn10	87,95	10,45	0,36	0,67	0,025	0,45	0,053	0,012	0,026

Kompozit malzemeyi oluşturan metal talaşları, sadece bu malzemelerin kesildiği testere tezgâhlarında (diğer malzemelere ait partiküllerin karışması önlenerek) üretilmiştir. Bu talaşlara ait resimler şekil 7.1 ve 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Bronz (CuSn10) testere talaşları.



Şekil 7.2. Çelik(S355JR) testere talaşları.

Çalışmada testere talaşlarının tercih edilmesi şu sebeplerle açıklanabilir,

- Testere tezgâhında oluşan metal talaşları, diğer talaşlara (torna, freze gibi) oranla daha yüksek boyutsal homojenliğe sahiptirler.
- Testere tezgâhında oluşan metal talaşlarının boyutları, torna ya da freze tezgâhında oluşan talaşlardan çok daha küçüktür. Bu durum testere talaşlarının daha yüksek görünür yoğunluğa sahip olmasına sebep olmaktadır. Yapılan ön denemelerle, büyük partiküllerin (torna ve freze talaşı) aynı miktarda basınç uygulanarak sıkıştırılması sonrasında büyük boşlukların oluştuğu ve oluşan bu büyük boşluklar sebebiyle, kompozit malzemenin oldukça zayıf mekanik özellik sergilediği gözlenmiştir. Ayrıca, düşük partikül boyutu, daha düşük sinterleme süresi ve sıcaklığında çalışmayı mümkün kılmaktadır (German, 2007).
- Testere tezgâhında talaş oluşumu, torna veya freze tezgâhlarındaki gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmediği için oksitlenmenin çok az oranda ya da hiç gerçekleşmemesidir. Partiküllerin yüzey oksit tabakası ile kaplandığında bileşenler arasında yeterli düzeyde yapışma olamamakta

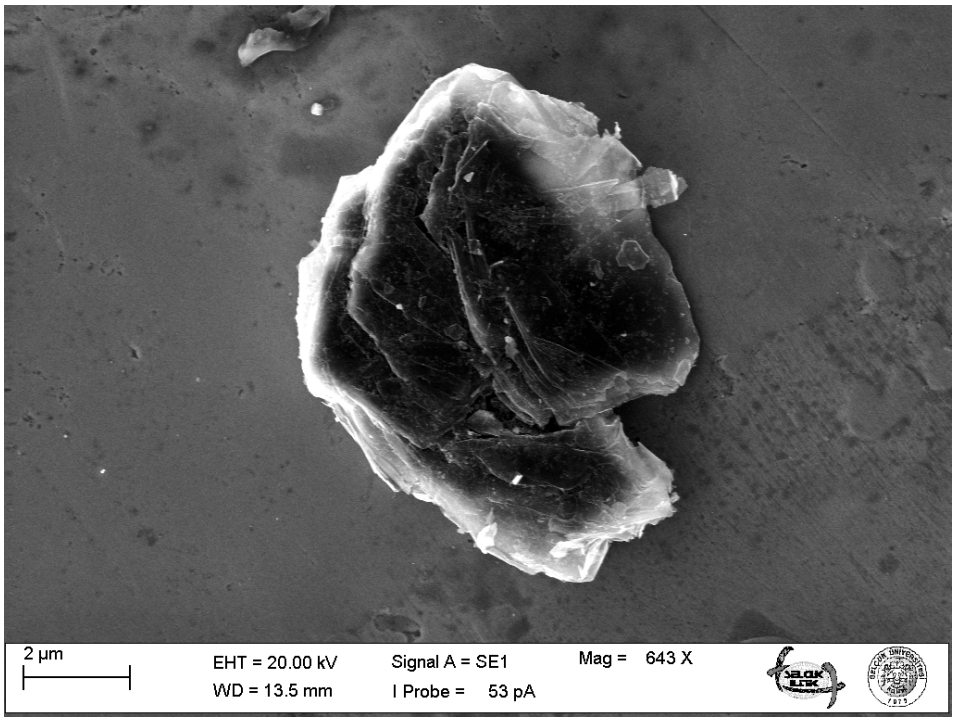
bu da kompozit malzemenin mekanik özelliklerini oldukça zayıflatmaktır (Hu ve ark. 2008).

Testere talaşların sahip olduğu fiziksel özellikler, sıkıştırma işleminde belirlenen boşluklu yapıya erişmek için ihtiyaç duyulan basınç miktarını düşürmekte ve herhangi bir öğütme işlemi olmaksızın talaşların doğrudan kullanımını mümkün kılmaktadır.

7.1.2. Toz grafitin özellikleri ve yapıya etkisi

Metal talaşlarından oluşan karışım içerisine partikül boyutu 5-6µm olan toz grafit katılmıştır. Ağırlıkça %1,5 oranında katılan toz grafitin kompozit malzemeye muhtemel etkileri şu şekilde ifade edilebilir.

1. Toz grafit, karışımın sıkıştırılması sırasında talaş-talaş ve talaş-kalıp duvarı arasında oluşan sürtünmeyi azaltmaktadır. Talaşlar arasındaki yüksek sürtünme, sıkıştırma işlemi sonunda ham yoğunluğu ve ham mukavemeti düşürmekte ve ham numune içerisinde farklı yoğunluklu bölgeler oluşturmaktadır. Sinterleme sonunda, parçaların şeklinin değişmesine, çatlamasına ya da eğilmesine sebep olan bu problem karışıma yağlayıcı toz grafit katılarak giderilmiştir. Kalıp duvarı-talaş arasında oluşan sürtünme ise ham numunenin kalıp içerisinden itilerek çıkarılması sırasında, malzeme ham yoğunluğunun homojen dağılımını bozmakta, numunenin parçalı ve daha boşluklu bir biçimde kalıp içerisinden çıkmasına sebep olmaktadır. Yapıya toz grafitin eklenmesi ile sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet artmakta ve numunelerin şekillerini koruyarak düzgün bir biçimde kalıp içerisinden çıkmaları mümkün olmaktadır.
2. Toz grafit sinterleme sıcaklığında (925°C) çelik talaşa difüze olarak bu bileşenin sertliğini artırmaktadır. S355JR çelik talaşının ağırlıkça karbon oranının (%0.24) düşük oluşunun, bu bileşene karbon difüzyonunu kolaylaştırdığı düşünülmektedir.
3. Sinterleme sonunda bronza difüze olmamış grafit partiküllerinin (Şekil 7.3), kompozit malzemenin aşınma özelliklerine olumlu etki edeceği bilinmektedir (Hirotaka 2003).



Şekil 7.3. Bronz bileşene gömülü haldeki grafit partikül.

7.1.3. Bileşenlerin hazırlanması

Metal talaşları sıkıştırma işleminden önce boyutlarına göre ayrıldı. Bu ayrım, gözenek boşluğu 800µm (20 mesh) olan elek yardımıyla yapıldı. Elekten geçemeyecek kadar büyük boyutlara sahip talaşlar, büyük boşluklar doğuracağından kullanılmamıştır. Elekten geçebilen partiküllerden oluşan talaşlar, yüzeylerinde bulunan yağ, kir ve oksit tabakalarından arındırılmaları maksadıyla, asetonla (C_3H_6O) yıkandı.

Bu çalışmada, çelik ve bronz talaşlarından, üç farklı ağırlıkça oranlama yapılarak kompozit malzeme üretilmiştir. Yapılan ön denemelerde, ağırlıkça %40 oranından daha az bronz içeren kompozitlerin yapısında büyük gözeneklerin oluştuğu ve bu gözeneklerin, ortamda yeterli bronz olmadığından doldurulamadığı görülmüştür. Bu durumun kompozit malzemenin mekanik özelliklerini oldukça zayıflattığı tespit edilmiştir. Ayrıca, kompozit içerisine ağırlıkça %80'den fazla bronz talaşı katıldığında ise bronzun sinterleme aşamasında, özellikle numunenin yüzeyinde oldukça akıcı davrandığı, böylece parçaların şekillerini koruyamayabildiği gözlenmiştir. Ön denemelerde karşılaşılan bu kısıtlar göz önünde bulundurularak aşağıda belirtilen

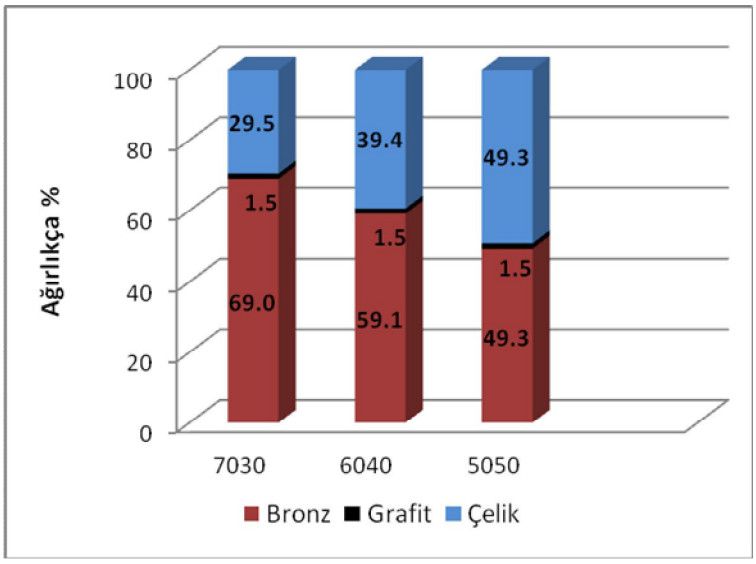
ağırlıkça oranlarda çalışılmıştır. Kompozit malzemelere, sahip oldukları bu ağırlıkça oranlar kullanılarak isim verilmiştir. Her bir malzemeye verilen isim çizelge 7.3'de gösterilmektedir. Kompozit isimlerinde bulunan ilk iki rakam ağırlıkça bronz bileşen yüzdesini, son iki rakam ise ağırlıkça çelik yüzdesini göstermektedir.

Çizelge 7.3. Kompozit malzemelerin ağırlıkça oranları ve adlandırma.

Bileşen Adı	**b70s30**	**b60s40**	**b50s50**
CuSn10 (%)	70	60	50
S355JR (%)	30	40	50

Talaşların ağırlıkça oranlanmasında, 10^{-4}g hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin ağırlıkça çelik-bronz oranlarının belirlenen yüzdede olduklarının kontrolü, basitçe bir mıknatısla yapılmıştır. Hassas terazide oranlanmış ve homojen bir biçimde dağılım elde edilinceye kadar karıştırılmış talaşlardan bir miktar alınmış ve terazide bu miktar tartılmıştır. Karışımdaki çelik ve bronz talaşları, sadece çelik talaşları çeken mıknatıs yardımı ile tekrar ayrılmıştır. Ayrılan talaşlar tekrar hassas terazide ölçülerek oranların kontrolü yapılmıştır. Bu sayede çelik ve bronz talaşların homojen bir biçimde karıştırılması için gereken süre belirlenmiştir.

Ağırlıkça üç farklı oranda hazırlanan talaş karışımı içerisine partikül boyutu 5-6µm olan toz grafit eklenmiştir. Eklenen grafit miktarı her bir karışımın kendi ağırlığının %1.5'i kadardır. Grafitin yoğunluğu 2g/cm^3'dür. Şekil 7.4'de kompozit malzemeler ve CuSn10 ağırlıkça oranları görülmektedir. Kompozit malzemelerin üretimi sırasında önceden belirlenen bu oranlar dikkate alınmıştır.



Şekil 7.4. Kompozit malzemelerin ağırlıkça oranı.

Kompozisyona toz grafit eklenmesinin sebebi, sıkıştırma esnasında talaşların birbirleri ve kalıp cidarı ile aralarında oluşan sürtünmeyi en aza indirgemektir. Böylece talaşlar birbirleri üzerinden daha kolay bir şekilde kayacak ve kalıp duvarı ile metal talaşlar arasındaki sürtünmenin azalması da daha düşük basınçlarda ve kesintisiz sıkıştırmayı mümkün kılacaktır. Ayrıca kalıp-talaş ara yüzeyinde oluşan sürtünme ne denli fazla ise kalıp ömrü o kadar kısa, sinterleme sonrası üründeki boyutsal değişim ve kusur oranı da o ölçüde fazla olacaktır (German 2007, Hale 2003).

Kompozit malzemelere yağlayıcı olarak eklenen grafitin tespit edilen bir diğer önemli etkisi, sinterleme sırasında çelik bileşene difüze olarak bu bileşenin nihai karbon seviyesini belirlemesidir.

Ağırlıkça oranlamadan sonra, her karışım 15 dakika boyunca, homojen olarak dağılıncaya kadar, iç çapı 50mm olan konik karıştırıcı içerisinde (Şekil 7.5) 33.5dev./dk. karıştırılmış ve sıkıştırma işlemine hazır hale getirilmiştir. Karıştırıcı içerisine koyulan karışım miktarı, karıştırıcı iç hacminin yaklaşık olarak %20'si kadardır. Uygulamalar esnasında, 15 dakikadan daha kısa süren karıştırma işlemlerinde karışımın homojen olarak dağılmadığı, mıknatısla yapılan kontroller yardımıyla gözlenmiştir.



Şekil 7.5. Torna aynasına bağlanmış konik karıştırıcı.

7.1.3. Talaşların kalıplanması ve sıkıştırma işlemleri

Bu aşamada, metal talaşları ve toz grafit ihtiva eden homojen karışım kalıp içerisine yeter miktarda konulup, önceden belirlenen hacimce gözenek oranına ulaşılıncaya kadar sıkıştırılmaktadır. Toz metalurjisi tekniği ile üretilen parçaların içerdiği boşluk oranları hacmen % 0-35 arasında olduğu bilinmektedir (German 2007). Bu çalışmada üretilen malzemelerin açık gözenek miktarının (%25) orta bir değer olduğu ve gözenekli malzemelerin sahip olduğu gözeneklilik aralığı içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, ön denemeler sırasında, kompozit malzemenin, daha yüksek gözenek miktarına sahip olacak şekilde üretildiğinde mekanik özelliklerinin hızlı bir biçimde zayıfladığı tespit edilmiştir. Gözenek miktarının azaltılması (%15'in altına düşürülmesi) durumunda da çok büyük pres basınçları ve ağır kalıp tasarımı gerektiği görülmüştür.

Yapılan ön denemelerde, karışımın görünür yoğunluğunun, ham yoğunluğun yaklaşık olarak 1/5'i olduğu tespit edilmiştir. Bu, kalıp içerisine şarj edilen karışım hacminin, sıkıştırma işlemi sonrasında %80 oranında azalması anlamına gelmektedir. Ön denemelerde edilen bu bilgi kalıp dizaynı sırasında kullanılmıştır.

Üç noktadan eğme ve basma numuneleri, farklı geometriye sahip olduklarından, sıkıştırma işleminde iki farklı kalıp kullanılmıştır. Aşağıdaki şekil 7.6'de, üç noktadan eğme numunesi hazırlamada kullanılan kalıp görülmektedir.

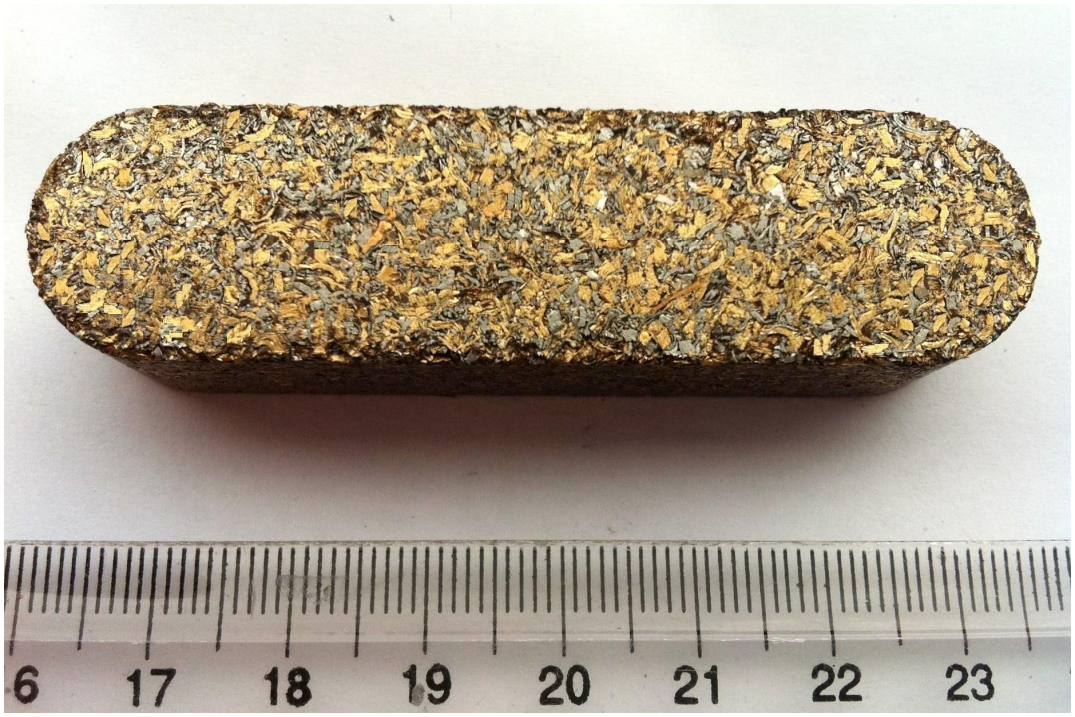


Şekil 7.6. Üç noktadan eğme numunesi üretiminde kullanılan kalıp.

Üç noktadan eğme numunesinin üretiminde, her bir numune için yaklaşık 120g talaş karışımı, kalıp içerisine doldurulur ve ham numunenin sıkıştırma işlemi sonunda %17 hacimce gözenek oranına sahip olabilmesi için parçaya sırayla, üst ve alt yüzeylerden basınç uygulanır. İlk preslemede, yaklaşık olarak 390MPa basınç altında sıkıştırılır daha sonra parça kalıptan yekpare olarak alınır. Karşı yüzeye ikinci sıkıştırma işlemi esnasında uygulanan basınç ise 490MPa civarındadır. Bu değer ilk sıkıştırma basıncının %25 artırılması ile elde edilmiştir. Deneyler sırasında, karşı yüzeyden yapılan ikinci sıkıştırmada, ilk basınç değeri uygulandığında kompozit malzemenin homojen olarak sıkışmadığı, ilk sıkıştırma işleminin yapıldığı yüzey yakınlarında malzemenin daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Bu durum, ilk sıkıştırma esnasında talaşların soğuk şekil değiştirmesiyle (deformasyon sertleşmesi) dayanımlarının ve sertliklerinin artması ile izah edilebilmiştir. İkinci preslemede, uygulanan basınç %25

oranında artırıldığında ise, malzemenin daha homojen bir yoğunluk dağılımına eriştiği, kesit alanın gözle muayenesiyle belirlenmiştir.

Üç noktadan eğme testi için hazırlanan ham numuneler 19X19X75mm ölçülerine sahiptir (Şekil 7.7).



Şekil 7.7. Üç noktadan eğme numunesi (ham b70s30)

Basma ve aşınma numunelerinin geometrisi birbirlerine benzer olduğu için üretimleri, aynı kalıp içerisinde yapılmıştır (Şekil 7.8).



Şekil 7.8. Basma numunesi üretiminde kullanılan kalıp.

Ortalama 85g. ağırlığında olan bu numunelerin de hacimce aynı boşluk oranına sahip olmaları için, ilk sıkıştırmada, yaklaşık olarak 905MPa ve ikinci preslemede ise karşı yüzeye, 1070MPa basınç uygulanmıştır. Bu basınç değerleri, 19mm. çap ve 45 mm. yüksekliğe sahip silindirik numunelerin, üç noktadan eğme test numuneleri gibi hacmen %17 açık gözenek miktarına sahip olabilmeleri için yapılan bir dizi deney sonucunda elde edilmiş değerlerdir. Basma numunelerinin sahip olduğu yükseklik, eğme numunesinin yüksekliğine göre daha fazla olduğu için, yüksek basınçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Aksi takdirde, sıkıştırılan yüzeylere uzak noktalarda (numunelerin orta bölgelerinde) yoğunluk istenilen düzeyde olmamaktadır. Basma ve aşınma numunesi için üretilen 19mm çapında 45mm yüksekliğine sahip ham numune, şekil 7.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 7.9. Basma ve aşınma numunesi için üretilen ham numune.

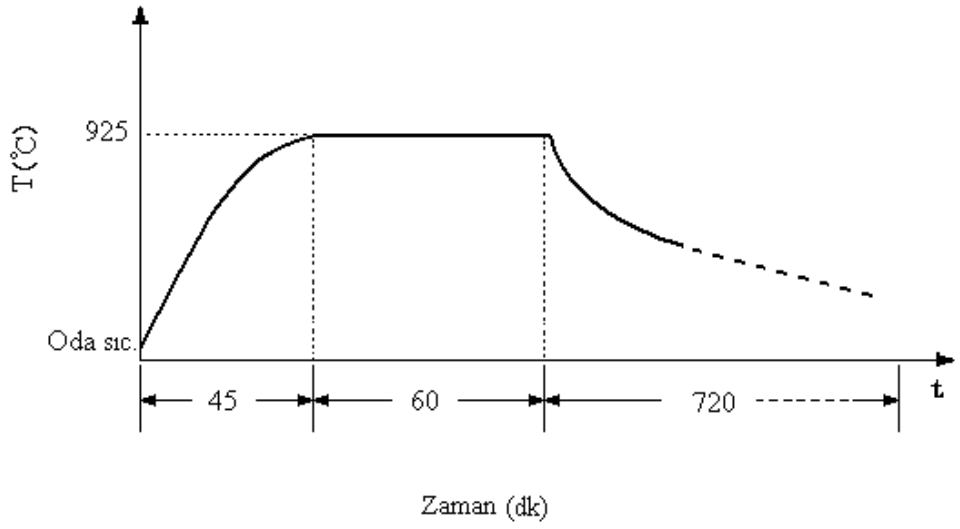
Ham numuneler sıkıştırma işleminden sonra, içerisindeki metal talaşlarının birbirlerine kilitlenmesiyle ve kısmen soğuk kaynak oluşumu ile belirli bir ham mukavemete sahip olmuşlardır.

7.1.4. Ham numunenin sinterlenmesi

Kompozit malzemeler, sıkıştırıldıktan sonra, ısınma hızı ve süresi elektronik olarak kontrol edilebilen fırında sinterlenmişlerdir. Sinterleme işlemi, içerisinde argon gazı bulunan fırında, oksijenin girişine izin vermeyen silindirik çelik tüpler içerisinde gerçekleştirilmiştir. Aksi takdirde, kompozit malzemelerin yüzeyleri, metal talaş boyutlarının oldukça küçük olması nedeniyle, hızlı bir şekilde oksitlenmektedir. Ayrıca, numunelerin yapısındaki gözeneklerde ve bu kapalı silindirik tüpler içerisinde bulunan çok az miktardaki oksijenin olumsuz etkisi, tüp içerisine ilave edilen eser miktarda toz grafit ile büyük ölçüde giderilmiştir.

Sinterleme işleminde, ergime sıcaklığı nispeten çeliğe göre düşük olan bronzun, lokal olarak (kısmen) ergimesi ve etrafında bulunan çelik talaşları çevreleyip ana yapıyı yekpare tutarak, matris görevini düzgün bir biçimde icra etmesi hedeflenmiştir. Bu safhada, her numune 925°C'de sinterlenmiştir. Bu sıcaklıkta sinterleme mekanizması yarı katı, yarı sıvı sinterleme şeklinde gerçekleşmektedir (Bkz. Ek-1. Cu-Sn denge

diyagramı). Bu sinterleme sıcaklığına yaklaşık 45 dakikada çıkılmış, bir saat boyunca bu sıcaklıkta beklendikten sonra fırın içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Fırın içerisindeki numunenin oda sıcaklığına kadar soğuması ise yaklaşık 12 saat (720 dk.) sürmüştür (Şekil 7.10).



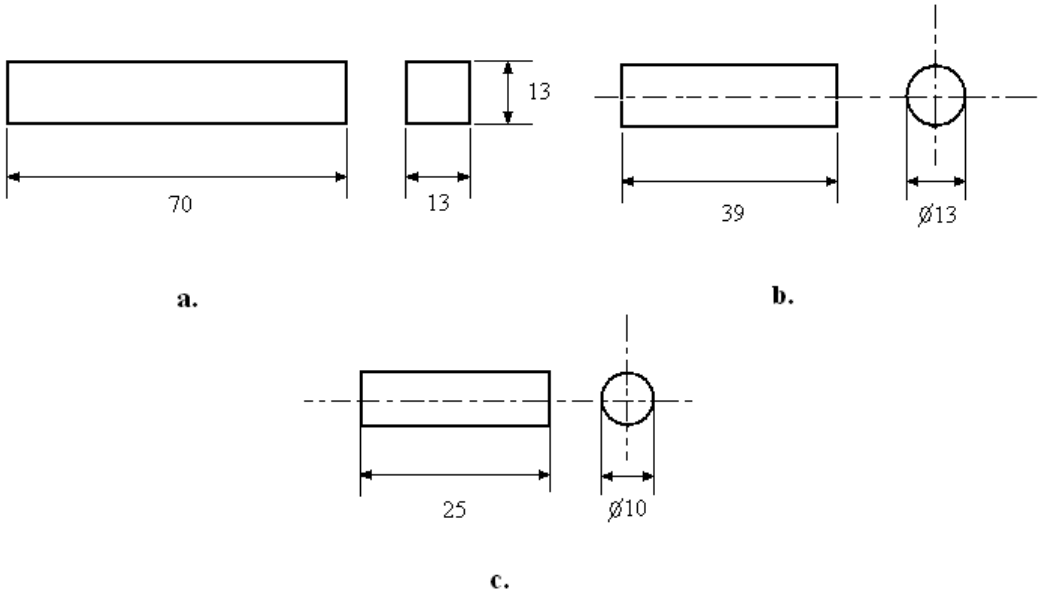
Şekil 7.10. Numunelerin fırında bekleme (ısınma-soğuma) süreleri

Sinterleme sıcaklığı ve süresi yapılan bir dizi deney sonucunda belirlenmiştir. Bu işlem sırasında, uygulanan sıcaklığın ve sürenin, hassas bir şekilde belirlenmesi gerektiği yapılan deneylerle anlaşılmıştır. Sinterleme sıcaklığının çok az (4-5°C civarında) artırılması durumunda bile, kompozit malzeme içerisindeki, ergime sıcaklığı düşük olan bronz bileşenin eriyip akıcı bir hal aldığı ve kendi ağırlığıyla yapıdan süzülerek dışarıya aktığı gözlenmiştir. Bu hata sebebiyle, kompozit malzeme çok daha fazla boşluklu yapıda olmakta, bu da mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir.

Sinterleme sıcaklığı, 925°C'nin biraz altında bir değerde seçildiği takdirde ise, bronzun yeter miktarda eriyemediği, yeterince çelik talaşları saramadığı gözlenmiştir. Bu durum, kompozit malzemenin, zayıf kuvvetlerde bile bütünlüğünü koruyamayıp ufalanmasına neden olmaktadır.

Sinterleme sonrasında kompozit malzemeler, torna ve freze tezgâhlarında işlenerek standartlarda belirtilen ölçülere getirilmiştir. Basma testleri ASTM (E9-89a) standardında belirtilen, 13mm çap ve 39mm yükseklikteki silindirik numunelerle, eğme test testleri ise ASTM (E290-97a) standardında belirtilen 13mm kare kesit, 70mm

uzunluğundaki prizmatik numuneler ile yapılmıştır. Aşınma testleri için 10mm çapında pimler üretilmiştir(Şekil 7.11. a, b ve c).



Şekil 7.11. a.basma, b.eğme ve c.aşınma numune ölçüleri.

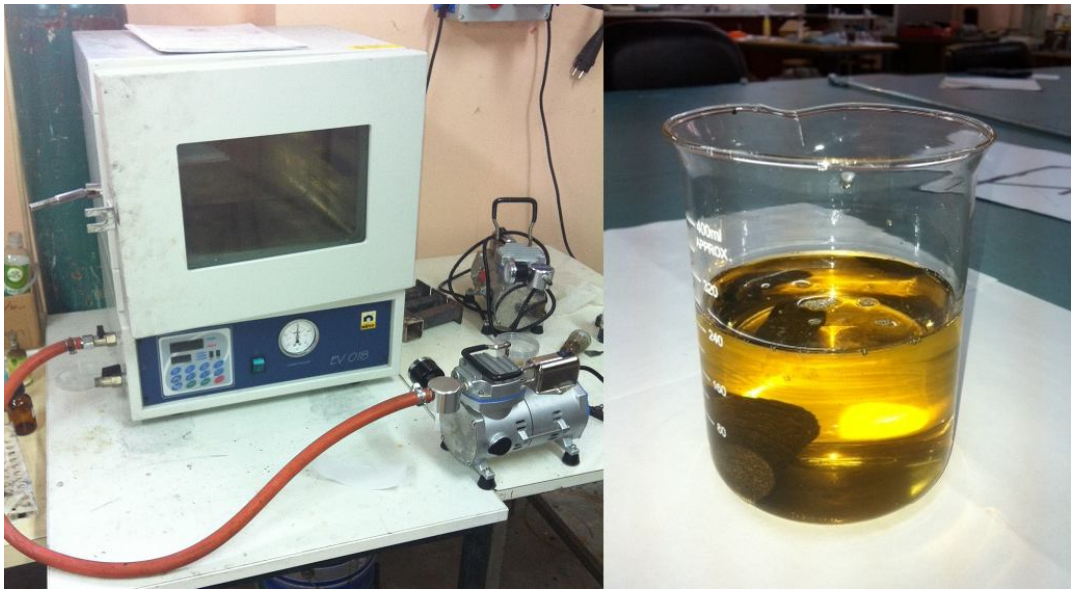
7.1.4.1. Kompozit numunelerin hacim-kuru yoğunluk-açık gözenek miktarlarının tespiti

Üretilen kompozit malzemelerin sahip olduğu fiziksel özellikler (hacim, kuru yoğunluk ve hacmen açık gözenek yüzdesi) Türk Standardında, geçirgen sinterlenmiş malzemeler için kullanılan, TS2305 (EN ISO 2738) numaralı standarda göre tespit edilmiştir.

Kompozit malzemelerin oda sıcaklığında preslenmesinden sonra ve ardından sinterleme işleminden sonra sahip oldukları bu fiziksel özellikler tespit edilmiş ve oluşan fark belirlenmiştir.

Standartta hacmi tayin edilecek deney numunesinin havada ve su içerisinde tartılacağından, malzemedeki gözeneklerin kullanılan sıvıyı emmesi gerekmektedir. Bu sebeple gözeneklere yağ emdirilmiştir. Deneyde kullanılan yağ, 40°C sıcaklıkta 46 mm^2/s viskoziteye sahiptir ve yoğunluğu 0,86 g/cm^3'tür.

Kompozit numuneler standartta belirtildiği gibi oda sıcaklığındaki yağ içerisine konup, vakum ortamda (80 kPa) kabarcık çıkmayana dek bekletilmiştir. Vakum kaldırıldıktan sonra ilave olarak 10 dakika daha yağ içerisinde beklemeye bırakılmıştır (Şekil 7.12).



Şekil 7.12. Nüve EV018 vakum fırını ve yağ içerisindeki kompozit numune

Kompozit malzemelerdeki gözeneklerin kullanılan yağı tamamen emmesinden sonra, her bir gruptan numune tele bağlanarak havada ve su içerisinde 10^{-2} gram hassasiyetindeki Impact marka terazide tartılarak hacmi bulunmuştur (Şekil 7.13).



Şekil 7.13. Impact BA-Trojan havada ve suda tartım yapabilen terazi.

Hacim hesabı aşağıda formül 7.1 yardımı ile yapılmıştır.

$$V = \frac{m_a - m_b}{\rho_{su}} \tag{7.1}$$

Burada, V kompozit parçanın hacmi (cm^3), m_a havada tartılan tam emdirilmiş parça ile askı telinin toplam kütlesi (g), m_b suda tartılan tam emdirilmiş parça ile askı telinin toplam kütlesi (g).

Aşağıda presleme işleminden sonra b50s50 malzemeye ait örnek hacim hesabı yapılmıştır.

Eğme numunesi için, $V_{eğgmepres.sonra} = \frac{m_a - m_b}{\rho_{su}} = \frac{133.70 - 114.60}{1} = 19.10 cm^3$

Basma numunesi için, $V_{basmapress.sonra} = \frac{m_a - m_b}{\rho_{su}} = \frac{88.45 - 76.21}{1} = 12.24 cm^3$

Kompozit malzemelerin presleme işleminden ve sinterlemeden sonra eğme-basma numunelerine ait hacim değerleri çizelge 7.4 ve 7.5'de görülmektedir.

Çizelge 7.4. Kompozit malzemelerin eğme numunelerine ait hacim değerleri (cm^3)

İşlem	**b70s30**	**b60s40**	**b50s50**
Preslemeden sonra	19,13	19,07	19,10
Sinterlemeden sonra	20,14	20,19	20,31

Çizelge 7.5. Kompozit malzemelerin basma numunelerine ait hacim değerleri (cm^3)

İşlem	**b70s30**	**b60s40**	**b50s50**
Preslemeden sonra	12,20	12,14	12,24
Sinterlemeden sonra	12,86	12,81	13,03

Kompozit malzemelerin preslemeden sonra ve sinterlemeden sonraki yoğunluk miktarları, yukarıda belirtilen standart içerisinden yer alan formül 7.2 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\frac{m_1}{V} = \frac{m_1 \times \rho_{su}}{m_a - m_b} \tag{7.2}$$

Burada, m_1 deney parçasının başlangıçtaki kütlesidir (g). Formül 7.2 kullanılarak elde edilen yoğunluk değerleri çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Kompozitlerin sinterlemeden önce ve sonraki ortalama özgül ağırlıkları.

Numune	Sinterleme öncesi *(g/cm³)*	Sinterleme sonrası *(g/cm³)*
b70s30	6,51	6,09
b60s40	6,50	6,05
b50s50	6,50	6,05

Kompozit malzemelerin hepsinde sinterleme öncesinde ve sonrasında hacimlerin ve buna bağlı olarak da yoğunlukların değiştiği görülmüştür. Sinterlemeden sonra, preslenmiş ham numunelerin hacmine oranla, b50s50'nin hacminde %6,3, b60s40 hacminde %5,8 ve b70s30'de ise %5,4 artış gözlenmiştir. TM metoduyla üretilen malzemelerin hemen hemen tamamında sinterleme sonrasında yoğunluklarının arttığı bilinmektedir. Ancak bu durumun tersine, boyutları 2-3 mm'ye ulaşabilen metal talaşların kullanılarak üretilen kompozitlerin yoğunluklarında sinterleme işleminden sonra yaklaşık olarak %7 oranında azalma tespit edilmiştir. Ayrıca tüm numunelerin, sinterleme öncesinde sahip oldukları kütlelerin, sinterleme sonrasında 2-3 g arasında azaldığı tespit edilmiştir.

Metal talaşları oluşurken yoğun plastik deformasyona maruz kalıp süneklik özelliklerini büyük ölçüde kaybederler. Bu durum talaşların preslenmesi sırasında plastik deformasyonu zorlaştırarak elastik olarak deforme olmasına, adeta talaşların birer elastik yay gibi davranmalarına sebep olmaktadır.

Oda sıcaklığındaki yüksek basınçlar altında, talaşlar arasında mekanik bir kilitlenme ve bağlanma söz konusu olur. Bu durum preslenmiş numunenin bir miktar dayanım kazanmasına (ham mukavemet) sebep olur. Sinterleme aşamasında, talaşlar arasındaki mekanik kilitlenme sıcaklık artışıyla birlikte bileşenlerin elastiklik modüllerinde düşüşe sebep olarak, sıkıştırılmış yay gibi davranan bileşenlerin geri yaylanmasına sebep olmakta ve numunenin hacminde artışa sebep olmaktadır. Hacimce

genleşmeye sebep olan bir diğer önemli etken ise karıştırılan bileşenler arasında bir tür kimyasal tepkime sonucu ortaya çıkan şişme olayıdır ki en çok demir-bakır tozu karışımlarında, bakırın ergiyip demir parçacıkları arasına girerek onları birbirlerinden ayırması sonucunda gerçekleşmektedir (German, 2007). Sinterleme fırınından çıkan numunelerin, preslemeden sonraki şekillerinin kısmen değişmesi deforme olması (distorsiyon) bu fikri destekler niteliktedir.

Kompozit malzemelerin hacimlerinde sinterleme öncesi ve sonrasındaki değişim, tabii olarak bu malzemelerin sahip oldukları açık gözenek miktarlarını da etkilemektedir. Kompozit malzemelerin presleme ve sinterleme sonrasında sahip oldukları açık gözenek miktarları yukarıda bahsedilen Türk Standardına göre tespit edilmiştir. Hacimce yüzde olarak ifade edilen açık gözenek miktarı, standartta belirtilen formül 7.3 yardımı ile belirlenmiştir.

$$\frac{m_3 - m_1}{\rho_{yağ} \times V} \times 100 \qquad (7.3)$$

Burada, m_3 kompozit numunenin tam olarak (yağ) emdirilmesinden sonraki kütlesidir (g). Kompozit numunelerinin preslemeden sonra ve sinterlemeden sonraki hacimce açık gözenek yüzdeleri çizelge 7.7 ve 7.8'da görülmektedir.

Çizelge 7.7. Kompozit eğme numunelerinin hacmen açık gözenek miktarları (%) .

İşlem	**b70s30**	**b60s40**	**b50s50**
Preslemeden sonra	16,9	16,9	17,00
Sinterlemeden sonra	24,9	25,0	25,1

Çizelge 7.8. Kompozit basma numunelerinin hacmen açık gözenek miktarları (%) .

İşlem	**b70s30**	**b60s40**	**b50s50**
Preslemeden sonra	16,8	16,8	17,0
Sinterlemeden sonra	24,8	24,8	24,9

Tüm kompozit numuneler açık gözenek yüzdeleri sinterleme sonrasında, presleme sonrasına nispetle yaklaşık %47 oranında artış tespit edilmiştir.

7.2. Mekanik Deneyler

Kompozit malzemelerin sertliğinin, basma ve eğmedeki mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve elde edilen sonuçların CuSn10 bronzunun mekanik özellikleri ile kıyaslanması için aşağıda anlatılan deneyler yapılmıştır. Hadde ürünü olarak dışarıdan satın alınan CuSn10 bronzuna ait numuneler ve kompozit numuneler talaşlı imalat yöntemi ile işlenerek, ASTM test standartlarında belirtilen ölçülere getirilmiştir.

7.2.1. Basma deneyi

Kompozit malzemelere ait basma deneyleri ASTM (E9-89a) standartlarına göre, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuarlarında, oda sıcaklığında, şekil 7.14'de görülen Japon Autograph AG-IS marka test cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 7.14. Autograph AG-IS çekme-basma test cihazı

Basma numunelerinin boyutları, ASTM standardında belirtildiği gibi, 13 mm çapında ve 39 mm yüksekliğindedir. Deney hızı 2 mm/dk olup, her grup için üçer adet

basma numunesi ile yapılmıştır. Deney başlangıcında, her numunenin üst yüzeyine ve numunenin yerleştirildiği düz alan üzerine, numune ve zımba arasındaki sürtünmeyi en aza indirgemek için yağlayıcı olarak, toz grafit serpilmiştir. Deney sonucunda, tüm numunelerde, en büyük kayma gerilmesinin oluştuğu 45°'lik açıda kırılma gözlemlenmiştir ve fıçılaşmanın oluşmadığı saptanmıştır. Bu hususa 8. Bölümde "Deney Sonuçları ve Tartışma" kısmında daha geniş bir biçimde değinilmiştir.

Her bir deney numunesine ait kuvvet-yer değiştirme verileri, anlık olarak test cihazındaki elektronik ortamda kaydedilmiştir. Aşağıda formül 7.4 ve 7.5 kullanılarak gerçek gerilme-şekil değiştirme verileri ve grafikleri elde edilmiştir.

$$\sigma_{gerçek} = \frac{4Fh'}{\pi d_0^2 h_0} \tag{7.4}$$

Burada, F , uygulanan kuvvetin Newton cinsinden değerini, h' numunenin anlık yüksekliğini (mm) simgelemektedir. Basma deneyi başlangıcındaki numune yüksekliği olan h_0, uygulanan kuvvetle h' değerine kadar kısalmıştır. Başlangıçtaki numune çapı d_0'dır.

$$\varepsilon_{gerçek} = \ln \frac{h_0}{h'} \tag{7.5}$$

Bu formüller, fıçılaşmanın ihmal edilebilir olduğu durumlarda kullanılmaktadır (Dieter 1988).

Bu grafiklerde, kompozit malzeme içerisinde farklı oranlarda bulunan bileşenlerin basma dayanımına olan etkileri gözlenmiştir. Elde edilen grafiklerde her bir gruptan teste tabii tutulan 3'er numuneye ait eğrilerin hemen hemen birbirinin aynı olduğu gözlenmiştir. Bu deneylere ait sonuçlar ve değerlendirmeler bölüm 8'de verilmiştir. Her bir gruba ait deney sonuçlarının ortalama değerleri çizelge 7.9'da verilmiştir.

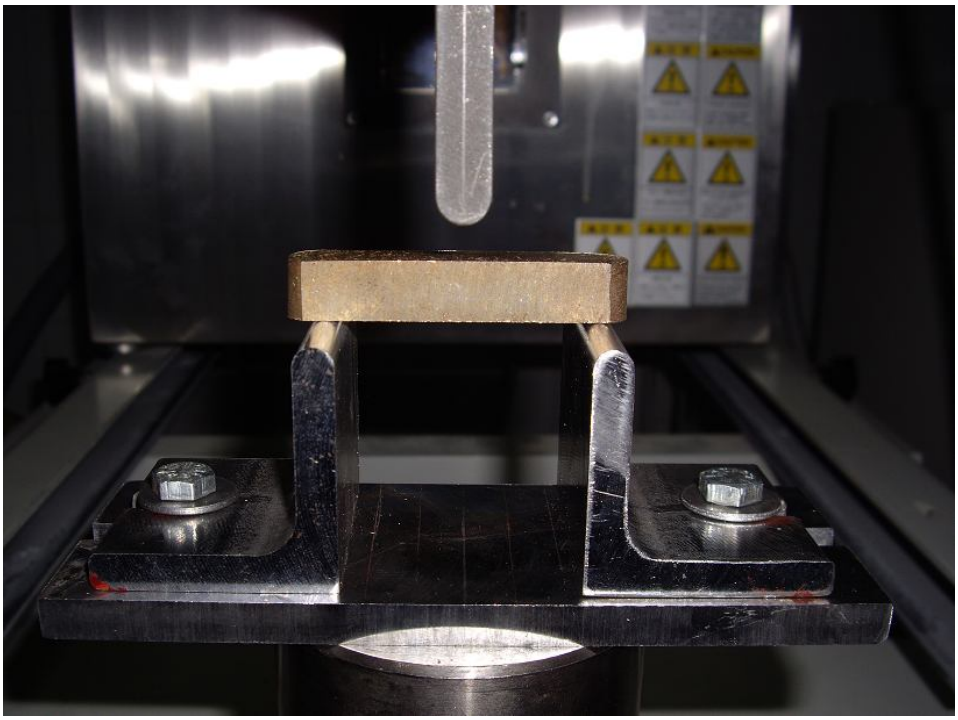
Çizelge 7.9. Kompozit malzemelerin ve bronzun ortalama basma dayanımları ve yer değiştirme miktarları (hacimce ~%25 açık gözenek oranına sahip kompozit malzemeler için)

Numuneler	Elastisite Modülü *(GPa)*	Akma Dayanımı *(MPa)*	Basma Dayanımı *(MPa)*	Kırılmadan sonraki kısalma *(%)*	Statik Tokluk *(J/m^3)*
b70s30	70,78	152,0	397,90	45	137,85
b60s40	53,64	132,3	335,10	42	87,80
b50s50	39,33	90,0	289,02	36	75,12
CuSn10	90,74	178,66	431,32	33	108,55

7.2.2. Üç noktadan eğme deneyi

Kompozit malzemelerin yapısındaki bileşenlerin birbirine ne ölçüde bağlandığını incelemek için malzemeler çekme yüküne maruz bırakılmalıdır. Kompozit malzemelerin üretiminde icra edilen metotla, standartlarda belirtilen boyutlarda çekme numunesi üretilmesi mümkün olamamıştır. Bu sebepten, kompozit malzemelerin çekme yükü altındaki davranışların incelenmesinde eğilme deneyinden faydalanılmıştır.

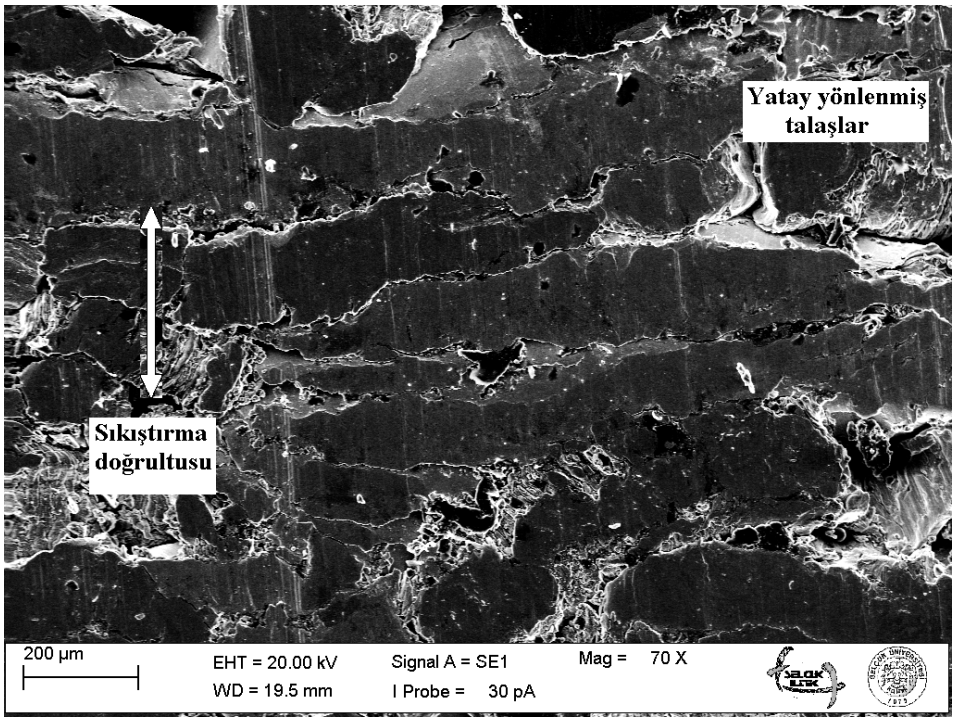
Deneyler Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuarında bulunan, Japon Autograph AG-IS marka test cihazı ile oda sıcaklığında ve 3 mm/dk hızla yapılmıştır. ASTM (E290-97a) standardına göre yapılan deneylerde kullanılan numune geometrisi 13X13X70 mm'dir. Şekil 7.15'de görülen desteklerin kullanıldığı deneyde, her grup kompozit malzemeden ve CuSn10'dan üçer numune test edilmiştir. Bu deneylerde, eğme kuvveti, hem üretim esnasında, üst zımbanın talaşları sıkıştırdığı yüzeyden hem de yan yüzeylerden tatbik edilmiştir.



Şekil 7.15 Eğme deneyinde kullanılan destekler ve numune

Desteklerin yarıçapı “r” 8mm seçilmiştir. ASTM standartlarında belirtilen bağıntı (3.3) kullanılarak, numunelerin yerleştirildiği destekler arası mesafe “C”, 55 mm olarak hesaplanmıştır .

Kompozit malzemelerin üretiminde sıkıştırma işlemi sırasında, talaşlar uygulanan kuvvetin etkisiyle yapı içerisinde doğrultu değiştirebilmektedir (Şekil 7.16.). Sıkıştırma doğrultusuna dik olarak yönlenmiş talaşların mevcudiyeti, bu anizotropik kompozit malzemelerin bu yöndeki mekanik özelliklerini belirleme ihtiyacı doğurmuştur.



Şekil 7.16. Kuvvetin etkisiyle yatay olarak yönlenmiş talaşlar

Üç noktadan eğme deneyi, her gruptan üçer kompozit malzemenin yan yüzeyleri için de tatbik edilmiştir. Deneyler, numuneler kırılıncaya kadar devam etmiştir. Deney süresince kuvvet ve her bir numunenin orta noktasına ait sehim miktarı anlık olarak elektronik ortama aktarılmış, bu verilerle kuvvete-sehim grafiği elde edilmiştir. Maksimum kırılma yükü kullanılarak eğmedeki en büyük gerilme miktarları hesap edilmiştir

Sıkıştırma doğrultusunda yapılan eğme deneyleri sonucunda, bütün numunelerin kuvvet ve sehim verileri elde edilmiş, bu verilerden eğme dayanımları hesaplanmıştır. Kompozit malzeme gruplarından ve CuSn10'dan üçer adet test numunesine ait sonuçların ortalama değerleri alınmıştır. Tüm bu değerler çizelge 7.10'de gösterilmiştir.

Sıkıştırma doğrultusuna dik doğrultuda (yan yüzeylerden) yapılan eğme deneyi neticesinde elde edilen kuvvet-sehim verilerinin ve hesaplanan dayanımların ortalama değerleri ise çizelge 7.11.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.10. Kompozit malzemelerin ve bronzun eğme deneyi sonuçları.

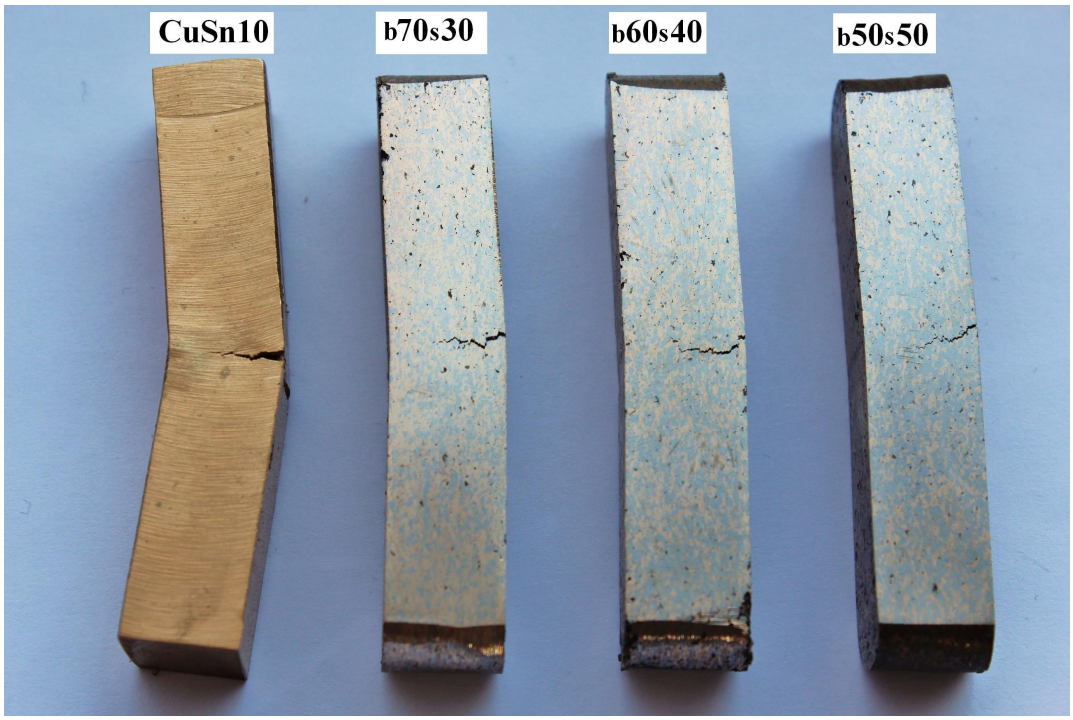
Numuneler	Eğme Dayanımı *(MPa)*	Kırılmadaki çökme *(mm)*	$Kuvvet_{max}$ *(kN)*
b70s30	276,8	0,99	8,13
b60s40	243	0,76	7,12
b50s50	215,5	0,63	6,34
CuSn10	310,7	1,92	9,11

Çizelge 7.11. Kompozit malzemelere, yan yüzeylerden yapılan eğme deneyi sonuçları.

Numuneler	Eğme Dayanımı *(MPa)*	Kırılmadaki çökme *(mm)*	$Kuvvet_{max}$ *(kN)*
b70s30yy	271	0,76	7,90
b60s40yy	227	0,70	6,71
b50s50yy	171,5	0,61	5,23

Çizelge 7.11. içerisinde numune isimleri yanında bulunan "yy" indisi, "yan yüzey" kelimelerini ifade etmektedir.

Deney esnasında, numunelerin hepsinde, orta kısımlarında çatlak oluştuğu ve uygulanan kuvvetin artışıyla, numune üst yüzeyine doğru ilerlediği gözlenmiştir. Şekil 7.17'de deney sonucunda çatlak oluşmuş haldeki numuneler görülmektedir. Bronz ve tüm kompozit malzemelerde, gözlenen çatlakların zikzaklar çizerek ilerlediği, ayrıca bronzun kompozit malzemelere oranla daha sünek kırıldığı, kompozit malzemelerde artan çelik bileşen oranının daha gevrek kırılmaya sebep olduğu gözlenmiştir



Şekil 7.17 Eğme deneyinde kırılan CuSn10 ve kompozit malzemeler.

Eğme deneyine ait elde edilen sonuçlar, "deney sonuçları ve tartışma" kısmında (8. Bölüm) tartışılmıştır.

7.2.3. Aşınma deneyi

Kuru ortamda, ağırlık kaybı esasına dayanarak gerçekleştirilen aşınma deneyleri, ağırlıkça üç farklı oranda çelik ve bronz talaşı içeren kompozit malzemelerin aşınma davranışlarının tespiti için yapılmıştır. Yapılarındaki bileşen miktarlarındaki değişimin, farklı yük ve kayma mesafelerinde, aşınma özelliklerine nasıl ve ne ölçüde etki ettiği incelenmiştir. Ayrıca, deneylerin sonunda tüm aşınan yüzeyler TEM'da incelenmiş, numunelerin maruz kaldıkları aşınma türleri tespit edilmiştir.

7.2.4.1. Aşınma numuneleri ve deney parametreleri

Pim-disk aşınma test cihazında test edilecek kompozit numuneler pim şeklinde üretilmiştir. Hazırlanan numunelerin yüksekliği 25mm ve numunelerin sürtünmeye maruz kalacak dairesel yüzeylerinin çapı ise 10 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 7.18).



Şekil 7.18 b50s50 (solda) ve b70s30'e ait aşınma test numuneleri.

Kompozit malzeme üretiminde yapıya, aşınma özelliklerini iyileştirmesi için toz grafit ilave edilmiştir. Bu oran numunelerinin ağırlıklarının %1,5'i kadardır ve toz grafitin ortalama partikül boyutu 5-6µm'dir.

Aşınma deneyi, Turkyus marka pim-disk aşınma test cihazı ile kuru ortamda, oda sıcaklığında yapılmıştır (Şekil 7.19). Cihaz numune ile disk arasında oluşan sürtünme kuvveti değerini yük hücresi (load-cell) vasıtasıyla anlık olarak elektronik ortama aktarmaktadır. Kaydedilen bu değerlerin, dik doğrultuda tatbik edilen kuvvete oranı sürtünme katsayısını vermektedir. Deneyde aşındırıcı karşı yüzey olarak **SEA 1050** Çelik disk kullanılmıştır. Diskin temperleme işleminden sonraki sertlik değeri **490±5 VSD**'dir. Yüzeyin, taşlama sonunda sahip olduğu pürüzlülük değeri ise **Ra=0.65 µm**'dir. Disk malzemesinin kimyasal kompozisyonu çizelge 7.12'de görülmektedir.

Çizelge 7.12 SAE 1050 diskin kimyasal bileşimi ve ağırlıkça oranları.

SAE 1050	**C**	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Fe**
Ağırlıkça oran (%)	0,51	0,25	0,75	0,040	0,050	Kalan



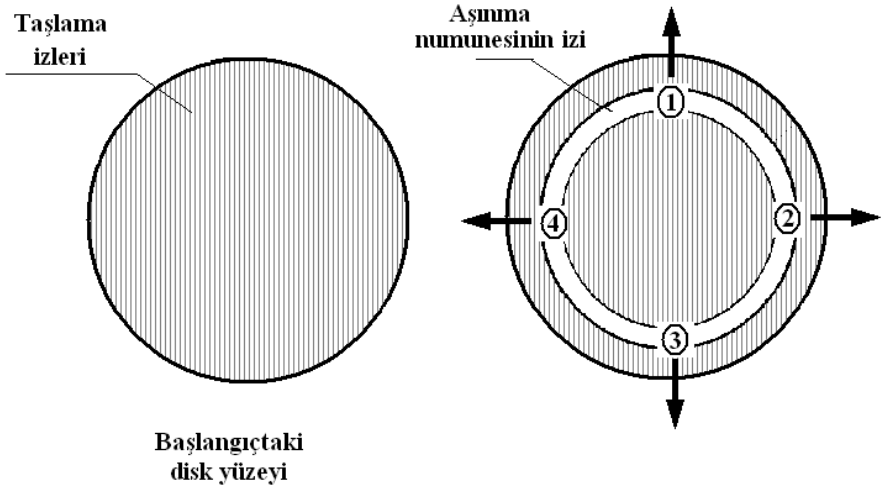
Şekil 7.19 Pim-disk aşınma test cihazı.

Deneyde tüm aşınma numuneleri **v=0,5 m/s** sabit hızda ve sırasıyla **5**, **10**, **20** ve **40N**'luk yükler altında teste tabii tutulmuşlardır. Belirlenen kayma mesafeleri ise **500**, **1000**, **2000** ve **4000 m**'dir.

Deneyin başlangıcında, her bir aşınma numunesi yüzeyi, CC-1000 kodlu abrasif zımpara kâğıdı ile zımparalanarak, karşı yüzeyle aynı pürüzlülük şartları sağlanmıştır. Ardından, numuneler 10^{-4} gram hassasiyete sahip Precisa marka terazide tartılmış ve her 500, 1000, 2000 ve 4000. metrelerden sonra yeniden tartılarak bu aşınma mesafelerinde kaybolan ağırlık miktarları tespit edilmiştir.

Aşınacak yüzeylerin ve karşı yüzey (SAE 1050) çelik diskin yüzey pürüzlükleri (R_a) Japon Mutitoyo marka yüzey pürüzlük ölçüm cihazı ile tespit edildikten sonra deneye başlanmış, yukarıda belirtilen her kayma mesafesinin sonunda numunelerin ve karşı yüzeyin sahip olduğu pürüzlülük değerleri tekrar ölçülüp kayıt edilmiştir. Deneyden önce karşı yüzeyin taşlanarak hazırlanması sırasında, disk yüzeyi üzerinde tek bir radyal doğrultuda birbirlerine paralel satıh taşlama izleri olduğu görülmüştür. Diskin başlangıç yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemek amacıyla, her bir kayma mesafesi sonunda, aşınma izi üzerinde dört farklı noktada (iki paralel ve iki dik doğrultuda), pürüzlülük ölçümü yapılmıştır (Şekil 7.20). İlk 500 metreden (rodaj) sonra

disk yüzey pürüzlülük değerlerinin bu dört farklı noktada hemen hemen aynı olduğu, başlangıçtaki taşlama çizgilerinin bu kayma mesafesinden sonra etkisini yitirdiği gözlenmiştir.



Şekil 7.20 Diskin başlangıçtaki yüzeyi ve kayma mesafesi sonunda yüzey pürüzlülük değeri ölçümleri için seçilen noktalar ve ölçüm doğrultuları.

Numunelerin yüzey pürüzlüklerinin tespitinde ölçüm cihazının tarayacağı mesafe (cutt off) 5,6 mm olarak tayin edilmiştir. Disk yüzey pürüzlülüğü için seçilen tarama mesafesi ise 1,7 mm'dir.

Numuneler belirlenen kayma mesafelerini tamamlayıp, ağırlıklarının ölçülmesi işleminden hemen sonra tekrar test cihazına monte edilirken, oluşan aşınma çiziklerinin yönü dikkate alınmış, deneye aynı doğrultuda devam edilmiştir. Ayrıca, aşınmanın homojen olarak gerçekleşmesi için, numunelerin aşınan yüzeylerinin tamamen diske temas etmesi sağlanmıştır.

7.3. Mikroyapı incelemeleri

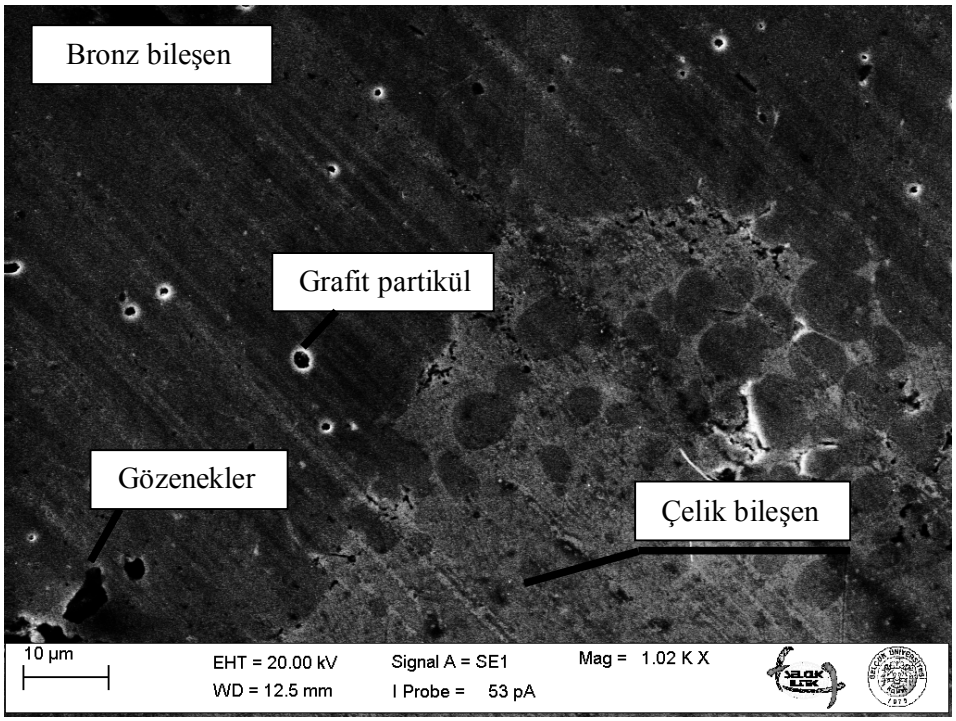
Mikroyapı incelemeleri Selçuk Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesinde bulunan Canon marka metal mikroskobunda ve Selçuk Üniversitesi Teknokenti laboratuarında bulunan Zeiss Evo LS10 marka TEM cihazında yapılmıştır.

Ham numunelerin yapısındaki bileşenlerin dağılımının gözle kontrolü için, makro boyutta ve yüksek çözünürlüğe sahip görüntüler Canon marka dijital fotoğraf makinesi ile alınmıştır.

Tüm bu görüntüler yardımıyla kompozit malzemelerdeki bileşenlerin yapıdaki dağılımları, pozisyonları ve birbirleriyle etkileşimleri hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca yapıdaki çeliğin tane yapısını incelemek için %2 nital ile numuneler dağlanmıştır.

Kompozit malzemelerin tamamının nihai yapısında şu dört bileşen bulunmaktadır (Şekil 7.21):

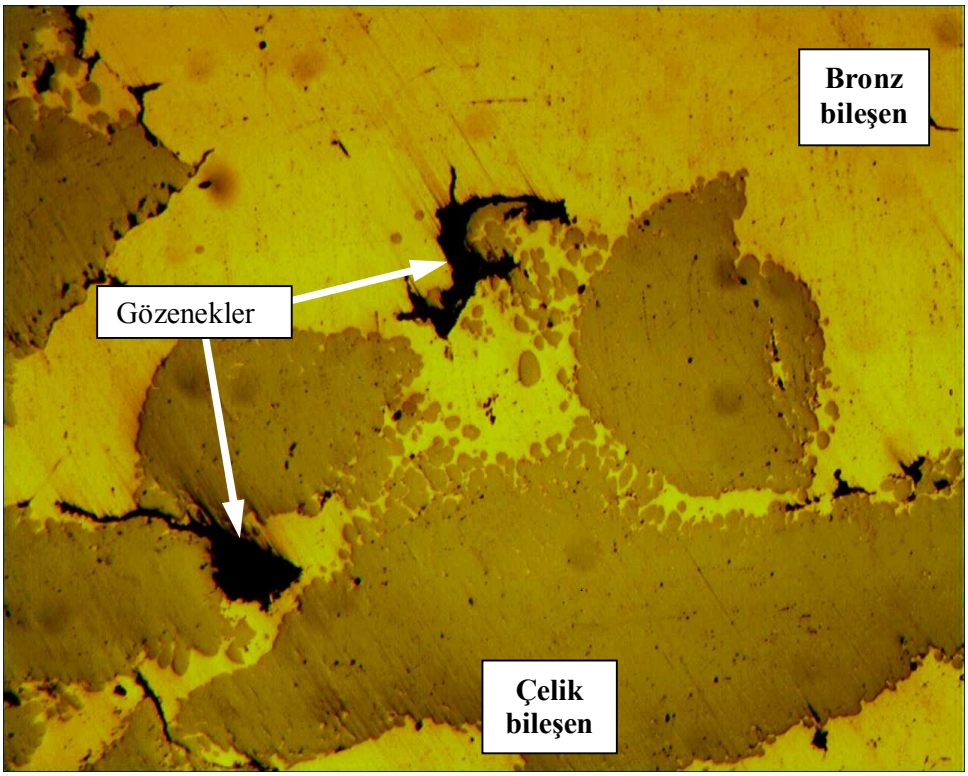
- Çelik bileşen
- Bronz bileşen
- Toz grafit partikülleri
- Boşluklar



Şekil 7.21 Kompozit malzemedeki bileşenlerinin TEM' deki görüntüsü (b70s30)

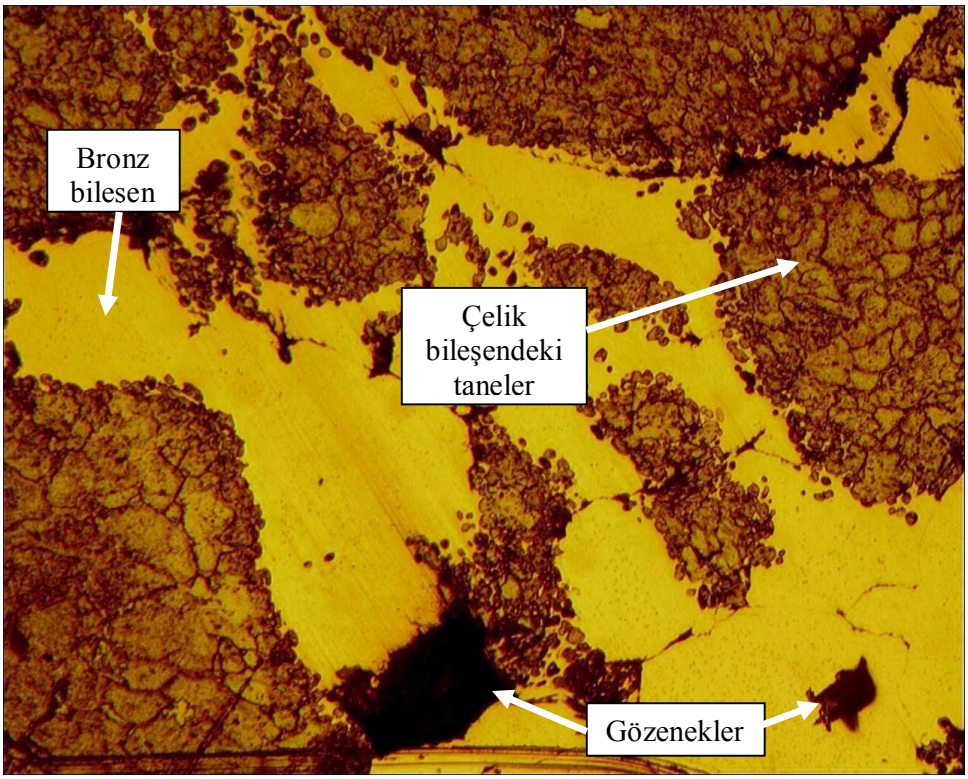
Kompozit malzemelerin sinterlemeden sonraki içyapı görüntüsü Şekil 7.22 görülmektedir. Bu görüntüde sarı renkte olan bronz talaşlarının sinterleme sıcaklığında

eriyerek resimde gri renge sahip çelik talaşlarını çevrelediği bununla birlikte eriyen bronzun yapıdaki tüm büyük boşlukları tamamen dolduramadığı görülmektedir.

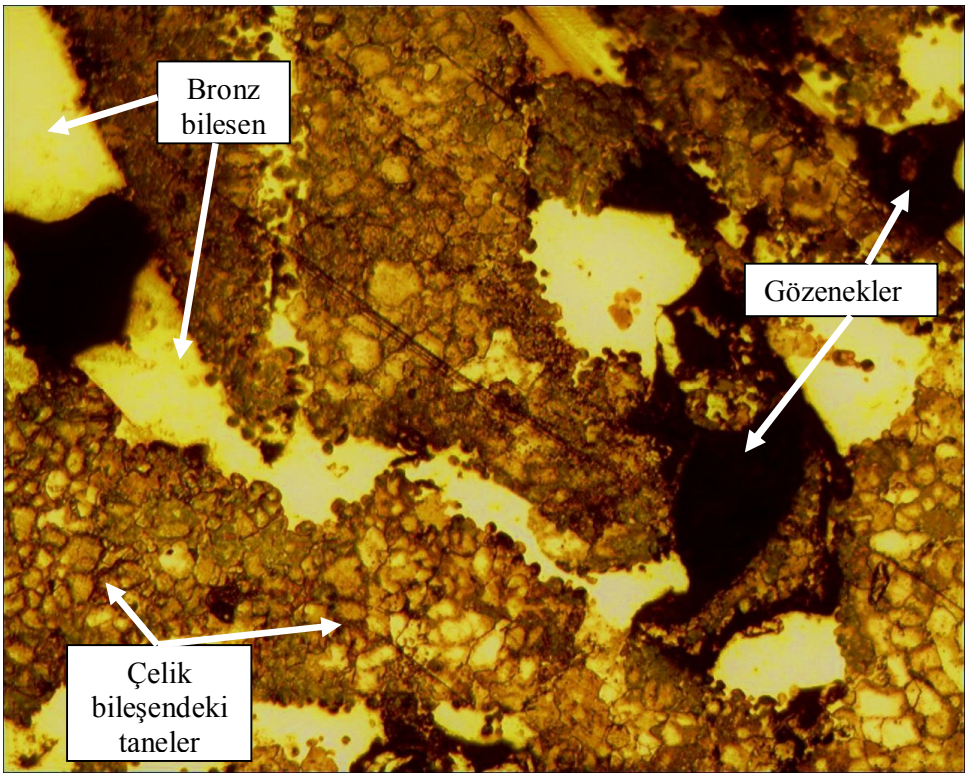


Şekil 7.22 Kompozit malzemenin sinterlemeden sonraki mikro yapısı (b70s30 dağlanmamış) 100X.

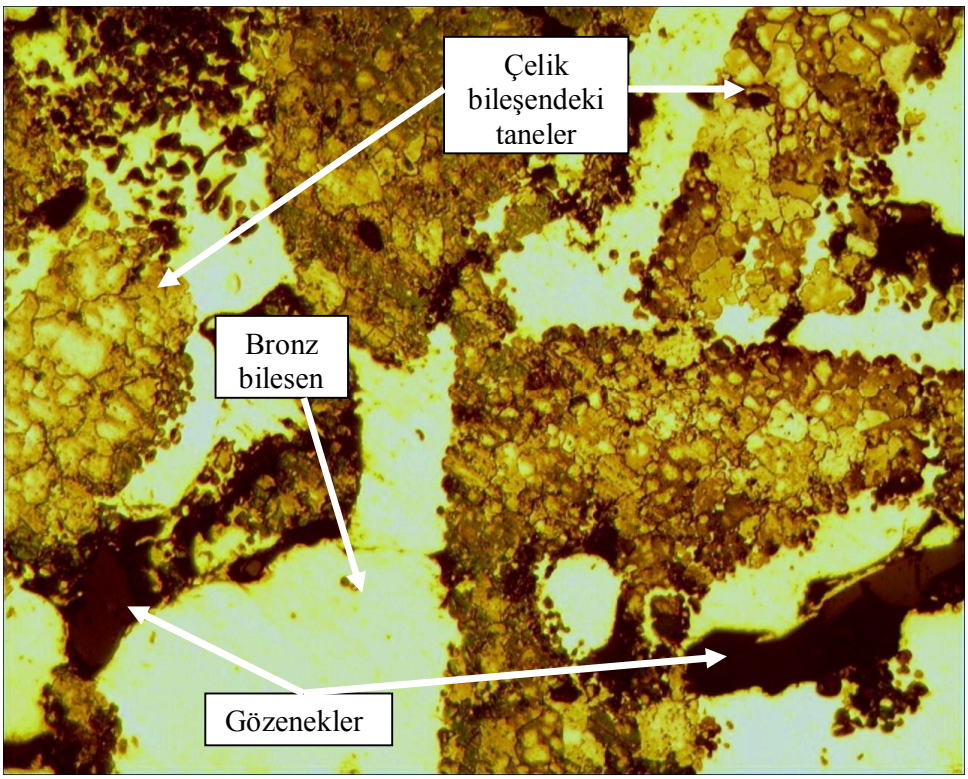
Yapıdaki çelik bileşenin tane yapısı, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etki edeceğinden, numuneler %2'lik nitalle dağlanmış ve çeliğin tane yapısı incelenmiştir. Bu incelemelerde tane yapısının tüm kompozit malzemelerde hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Çelik bileşenin bu tane yapısının irili ufaklı farklı çapta ama çoğunlukla eş eksenli geometriye sahip olduğu Şekil 7.23, 7.24 ve 7.25'de görülmektedir.



Şekil 7.23 Nital ile dağlanmış malzemedeki çelik bileşenin tane yapısı (b70s30) 100X.

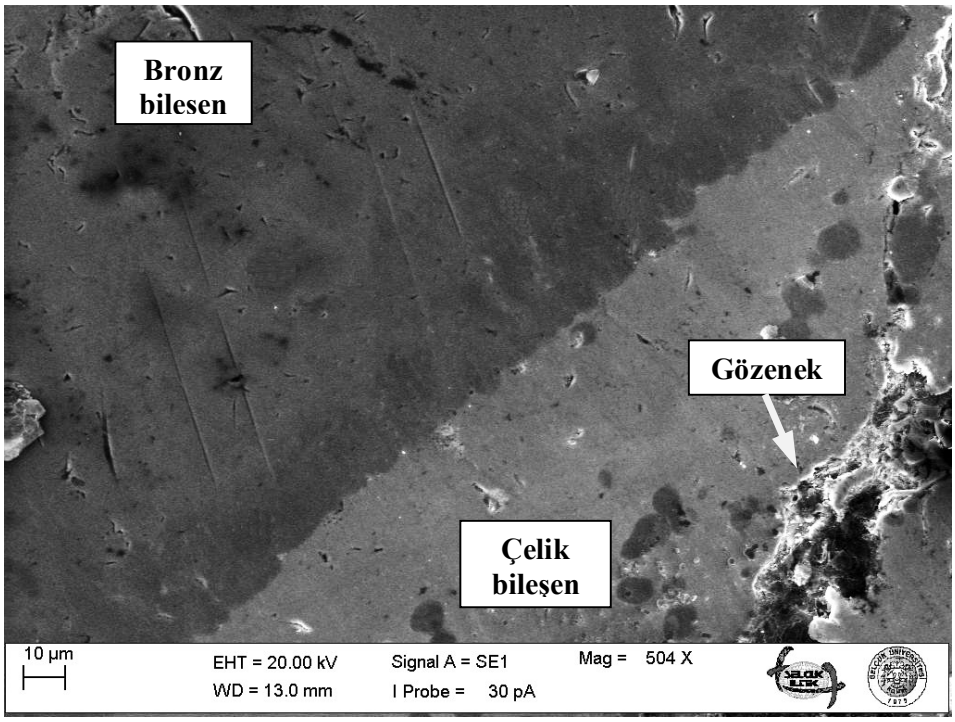


Şekil 7.24 Nital ile dağlanmış malzemedeki çelik bileşenin tane yapısı (b60s40) 100X.



Şekil 7.25 Nital ile dağlanmış malzemedeki çelik bileşenin tane yapısı (b50s50) 100X.

TEM cihazından alınan detaylı resimlerde de özellikle ağırlıkça en çok bronz yüzdesine sahip olan b70s30 grubuna ait numunelerde bronz talaşının, ergiyerek çelik talaşlarının arasına etkin bir biçimde nüfuz ettiği görülmüş, bununla birlikte yapıda bulunan çelik ve bronz bileşenler arasında ara faz oluşmadığı gözlenmiştir. Bu TEM görüntüsünde koyu gri bölge çelik bileşen, açık gri bölge ise bronz bileşendir (Şekil 7.26).

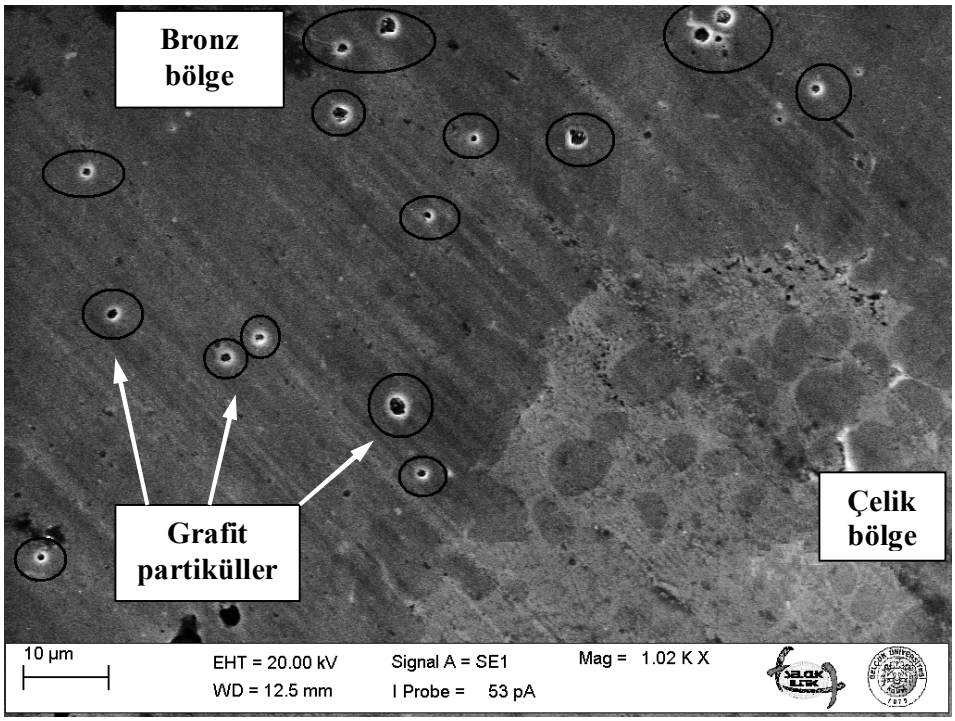


Şekil 7.26 Kompozit malzemedeki çelik ve bronz bileşenin birleşim yeri.

Kompozit malzemelerin hacmen %25 açık gözenek ihtiva etmesi nedeniyle TEM ve metal mikroskop görüntülerinde bronz tarafından tamamen doldurulmamış irili ufaklı boşlukların varlığı görülmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde sinterleme aşamasındaki 925°C'de bir saat bekleme ve devamında fırın içerisinde soğuması ile nihai yapıda, bronz-çelik bileşenler arasında tatminkâr derecede kaynama (lehim) gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum sinterleme sıcaklığı ile süresinin uygun olduğunu göstermektedir.

Kompozit malzemeye sıkıştırma işlemi sırasında, kalıp duvarı-metal talaşları arasında ve talaşların kendi aralarındaki sürtünmeyi en aza indirgemek maksadıyla katılan toz grafitin boyutu 5-6 µm'dur. Eklenen toz grafitin oranı malzeme ağırlığının %1.5'i kadardır. TEM görüntülerinde bu bileşen ile bronz bileşen arasında herhangi bir etkileşim olmadığı, grafitin bronz içinde difüze olmadığı gözlenmiştir. Bu durum Kestrusatya ve ark (2002)'nın bakır-grafit kompozit malzemenin aşınma performansı hakkında yaptığı çalışmanın sonucuyla örtüşmektedir. Grafit partiküllerin, bronz bölge içerisinde kısmen gömülü halde oldukları şekil 7.27'de görülebilir iken, aynı şekil üzerinde çelik bölgede bu boyutta grafit partikül görüntülenememiştir. Toz grafitin

sinterleme sırasında, zaten karbon oranı yüksek olmayan çelik bileşene neredeyse tamamen difüze olduğu, sinterleme sırasında da yanmadığı düşünülmektedir.



Şekil 7.27 Kompozit malzemedeki çelik ve bronz bileşen ve bronz bileşen üzerindeki grafit partiküller.

Vickers mikro sertlik testlerinde de, tüm kompozit malzemelerdeki bronz bileşen üzerinden yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçların, birbirleriyle ve CuSn10 malzemenin sahip olduğu yüzey sertliği ile aynı olduğu görülmüştür. Bununla birlikte kompozit yapısında ağırlıkça çelik bileşen oranının azalmasıyla çelik bileşenin sahip olduğu sertlik değerinin artış gösterdiği görülmüştür. Bu hususa 8. Bölümde bulunan mikro sertlik deneyi sonuçları adlı alt başlıkta daha geniş bir biçimde değinilmiştir.

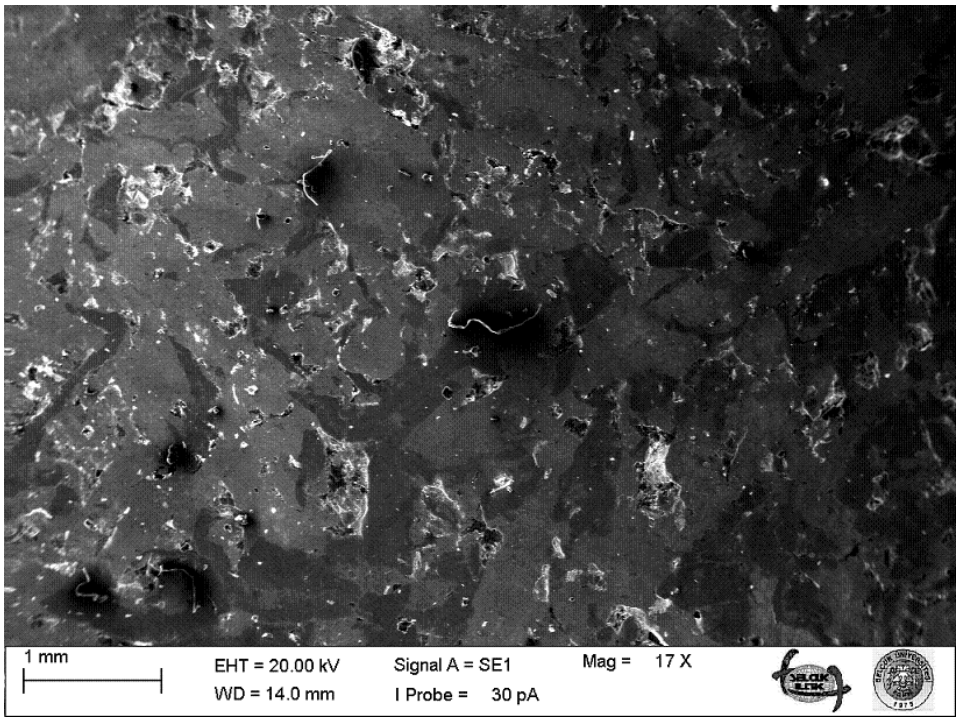
7.4. Sertlik deneyleri

Bu çalışmada, kompozit malzemelerin ve bronzun yüzey sertliği, Brinell sertlik deneyi (BSD) ile tespit edilmiştir. Ayrıca kompozit malzeme bileşeni olan çeliğin, sinterlemeden sonraki nihai sertliği de mikro sertlik ölçüm (Vickers elmas piramit uç) cihazı ile tespit edilmiştir.

7.4.1. Brinell sertlik deneyi

Kompozit malzemelerin sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesinde, sahip oldukları yüzey sertlik değerleri, aşınmanın miktarına ve türüne doğrudan etki edeceğinden yüzey sertlik değerleri tespit edilmiştir. Sertlik değerlerinin doğru bir biçimde tespit edilebilmesi için Brinell sertlik deneyi metodu seçilmiştir.

Kompozit malzeme üretiminde eleme işlemi 20 mesh'lik elekte yapıldığından metal talaşlar boyutları bir-iki milimetre olabilmektedir. Bu ölçekte partikül boyutuna sahip olan ve hacmen %25 açık gözenek içeren yapının (Şekil 7.27) yüzey sertliği ölçümü esnasında, aynı anda hem çelik ve bronz talaşları hem de gözenekleri bir arada tarayabilecek büyüklüğe sahip bir alanda ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu nedenle batıcı uç 5mm çapındaki bilye seçilmiştir.



Şekil 7.27. Kompozit malzemenin taşlanmış üst yüzeyi (b50s50).

Üretimi esnasında, bileşenlerin homojen bir biçimde dağıtılamaması gibi oluşabilecek hatalar sebebiyle mekanik özellikler bir noktadan diğerine farklılık gösterebilir. Bu durum, malzemenin farklı noktalarında yapılan Brinell sertlik ölçümleri sayesinde kontrol edilmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin ve CuSn10 bronzun basma

testi sonuçlarının teyit edilmesi bu sayede mümkün olmuştur. Zira basma testi ve üç noktadan eğme testi sonuçlarının, Brinell yüzey sertlik değerleri (BSD) ile paralellik arz etmesi beklenir (Dieter 1988).

Brinell yüzey sertlik deneyleri *Teknik Isıl İşlem* adlı firmanın laboratuarlarında, yapılmıştır. Kompozit malzemelerden ve bronz üzerinden üçer farklı noktadan ölçüm yapılmış ve ortalama değerleri hesaplanmıştır.

Deneyde kullanılan bilye çapı ve yük miktarı belirlendikten sonra, aşağıda belirtilen işlemler sırasıyla tatbik edilmiştir.

Deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır. Uygulanan yük 250 kgf.'dir. Yük 30 sn. boyunca tatbik edilmiş daha sonra kaldırılmıştır (kompozit malzemelerin nispeten daha yumuşak ve gözenekli olması münasebetiyle bu süre 30 sn. olarak tayin edilmiştir).

Ölçümlerin aritmetik ortalaması esas ölçüm değeri olarak kabul edilmiştir. Ölçümlerin güvenilir olması için belirlenen noktalar birbirlerinden ve numune kenarlarından uzak seçilmiştir.

Uygulanan kuvvetin kaldırılmasının ardından oluşan izin ölçülmesi, test cihazı üzerinde bulunan ve iz çapını 100 kat büyütebilen, 10^{-2} mm hassasiyetle ölçüm yapmayı mümkün kılan optik mikroskop vasıtasıyla gerçekleşmiştir.

Hacmen %25 açık gözenek içeren her bir grup kompozit malzeme ve bronza ait ortalama BSD çizelge 7.13.'te verilmiştir.

Çizelge 7.13 MMK malzemelerin ve endüstriyel bronzun ortalama BSD

Numune	**CuSn10**	**b70s30**	**b60s40**	**b50s50**
BSD	87	48	42	40

Deneylerin sonuçlarında oluşan iz çapları (d) ile deneyde kullanılan 5 mm'lik bilye çapı (D) arasındaki oranın (d/D), yapılan deneylerin güvenilirliği açısında 0.2-0.7 aralığında olması şartı, yapılan bu deneylerle sağlanmıştır. Bu oranın en küçük ve en büyük iz çapları için sırasıyla, 0.374 ve 0.54 olduğu görülmüştür.

Brinell sertlik deneylerine ait kapsamlı sonuç ve yorumlar, "sonuçlar ve tartışma" ana başlığı (bölüm 8) altında ele alınmıştır.

7.4.2. Vickers mikro sertlik deneyi

Bu çalışmada, Vickers mikro sertlik ölçümü, kompozit malzeme içerisinde bulunan çelik ve bronz bileşenin, sinterleme işlemi sonunda sahip olduğu nihai sertliğin tespit edilmesi maksadıyla yapılmıştır. Bronz ve çelik talaşlardan oluşan karışımın oda sıcaklığında preslenmesinden önce, talaşlar arasındaki ve talaş-kalıp duvarı arasındaki sürtünmeyi en aza indirgemek maksadıyla, karışım içerisine yağlayıcı olarak ağırlıkça %1.5 oranında toz grafit katılmaktadır. Katılan toz grafitin, sinterleme sıcaklığında (925°C) çelik yapıya difüze olması sebebiyle çelik talaşların sertliği artmaktadır. Bu artışın ne ölçüde gerçekleştiğinin tespiti gerekmektedir. Bu artış kompozit malzemenin aşınma ve diğer bazı mekanik özelliklerine doğrudan etki edebilmektedir. Sinterleme sonunda kompozit malzemelerdeki çeliğin sahip olduğu sertlik, mikro sertlik ölçümü ile belirlenebilmiştir. Bakalite alınan numunelerin Vickers sertlik değerleri(VSD), Japon Schmatsu marka mikro sertlik ölçüm cihazı ile tespit edilmiştir. Ölçümler, oda sıcaklığında ve 100 gram yük 20 saniye boyunca uygulanarak icra edilmiştir. Test sırasında uygulanan yükün 100 gram olarak belirlenmesinin iki sebebi vardır. Bunlardan ilki ölçüm yapılan nokta altında olabilecek muhtemel gözeneklerin ölçümü yanıltması ihtimalidir. Diğeri sebep ise ölçüm sırasında oluşacak izin, sadece incelenen bileşenin sınırları içerisinde kalacak şekilde olması gerekliliğidir.

Her bir grup kompozit malzemeye ait numunelerin çelik ve bronz bileşenleri, CuSn10, ve SJ355JR üzerinden beşer farklı noktada deney yapılmış ve bu çelik bölgelerin ortalama mikro sertlik değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çizelge 7.14'de verilmiştir.

Çizelge 7.14 MMK malzemedeki çelik bölgelerin ve CuSn10'nun ortalama VSD sonuçları

Numune	**b70s30** (çelikbileşen)	**b60s40** (çelikbileşen)	**b50s50** (çelikbileşen)	**Bronz** bileşen*	**CuSn10**	**S355JR**
VSD	360	350	340	94	93	155

*Tüm kompozit malzemelerdeki bronz bölgeler için.

Vickers mikro sertlik deneyine ait sonuçlar ve yorumlar, "sonuçlar ve tartışma" ana başlığı (bölüm 8) altında ele alınmıştır.

8. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

8.1. Basma Deneyi Sonuçları

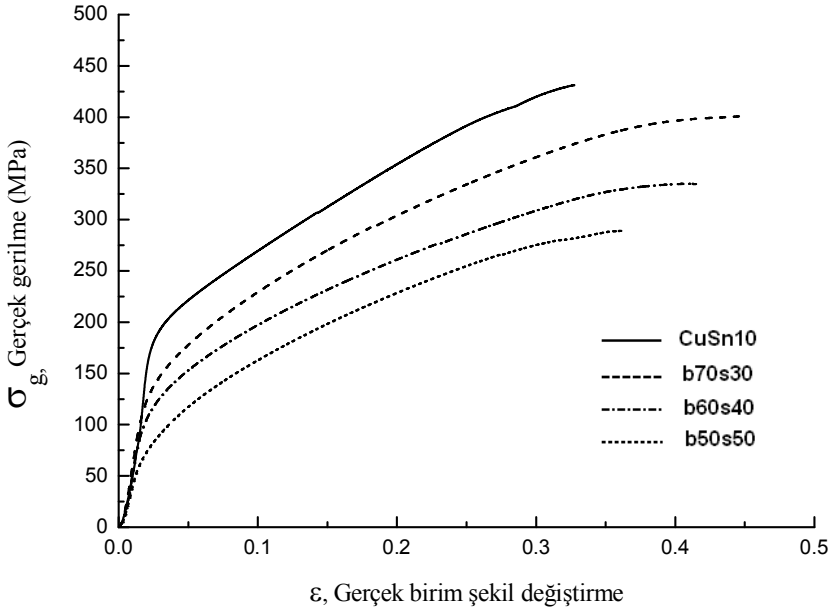
Basma deneyi sonunda, CuSn10 ve kompozit malzemelerin sünek davranış göstererek, en büyük kayma gerilmesinin oluştuğu 45° açılı düzlemden kırıldığı ve fıçılaşma olayının gerçekleşmediği gözlenmiştir (Şekil 8.1.). Numunelerin bu açı ile kırılması, yapı içerisindeki gözeneklerin belirli bir bölgede yoğunlaşmadan homojen dağıldığını göstermektedir. Gözenekler yapı içerisinde homojen dağılmadığında ise test sırasında uygulanan yükün artışı ile malzeme bükülüp plakalar arasından kaymaktadır.

Bronz basma numunesinin üzerinde plastik deformasyon sertleşmesi sonucu oluştuğu düşünülen çatlaklar görülmüştür.



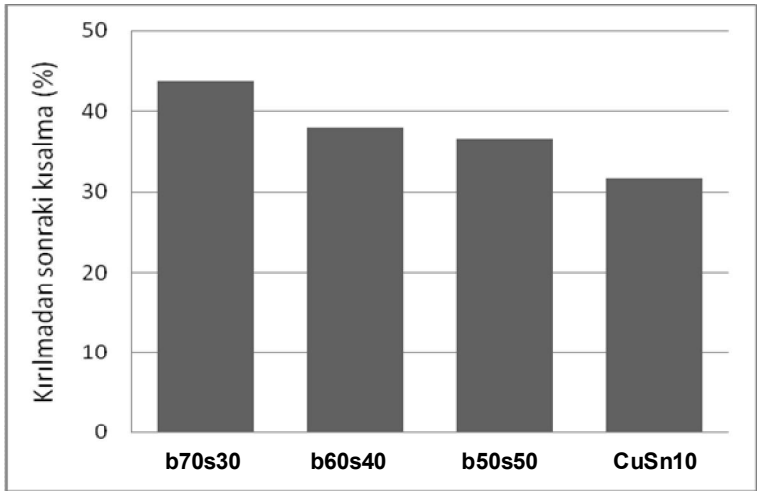
Şekil 8.1 Basma deneyi sonunda kırılan numuneler.

Basma deneyi sonucunda elde edilen, kompozit malzemelere ve CuSn10'a ait gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme eğrileri şekil 8.2.'de bir arada görülmektedir.



Şekil 8.2 Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrileri.

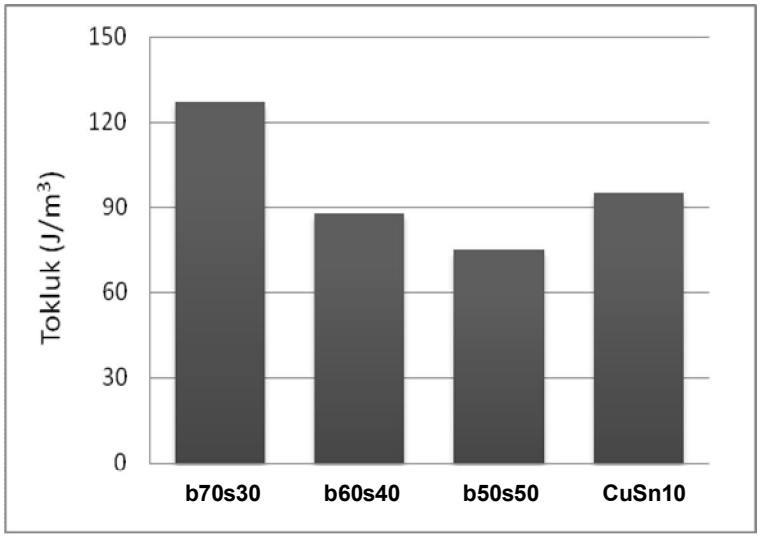
Basma deneyleri ile CuSn10'nun, kompozit malzemelere oranla en yüksek basma gerilmesine sahip olduğu gözlenmiştir. CuSn10'nun sahip olduğu gerçek basma gerilmesi σ_{CuSn10}**=431 MPa** olarak hesaplanmıştır. CuSn10'nun gerçek şekil değiştirme değeri ε_{CuSn10}**=0,33**'dür. CuSn10, kırılmadan sonraki kısalma açısından kompozit malzemelerle kıyaslandığında, en az şekil değiştiren malzeme olduğu görülmüştür (Şekil 8.3.).



Şekil 8.3. Kırılmadan sonraki kısalma miktarları.

CuSn10'a ait gerçek basma gerilmesine en yakın değer, kompozit malzemeler içerisinde ağırlıkça en az çelik miktarına sahip olan b70s30'dur. Bu malzemenin basma gerilmesi σ_{b70s30}**=398 MPa**'dır. b70s30, çalışma konusu tüm malzemeler içerisinde en çok kalıcı şekil değiştirebilen yani en sünek malzemedir. b70s30'un gerçek şekil değiştirme değeri ε_{b70s30}**=0,45** olarak gerçekleşmiştir ve sahip olduğu basma değeri, CuSn10'nun basma dayanımının yaklaşık olarak %92,5'i kadardır. Bu malzemenin kırılmadan sonraki kısalma oranı, CuSn10'nun kırılmadan sonraki kısalma oranının %138'i kadardır.

Şekil 8.4.'de üretilen kompozit malzemelere ve bronza ait tokluk miktarları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi b70s30'un sahip olduğu tokluk miktarı, b50s50, b60s40 ve CuSn10'a kıyasla en yüksektir.



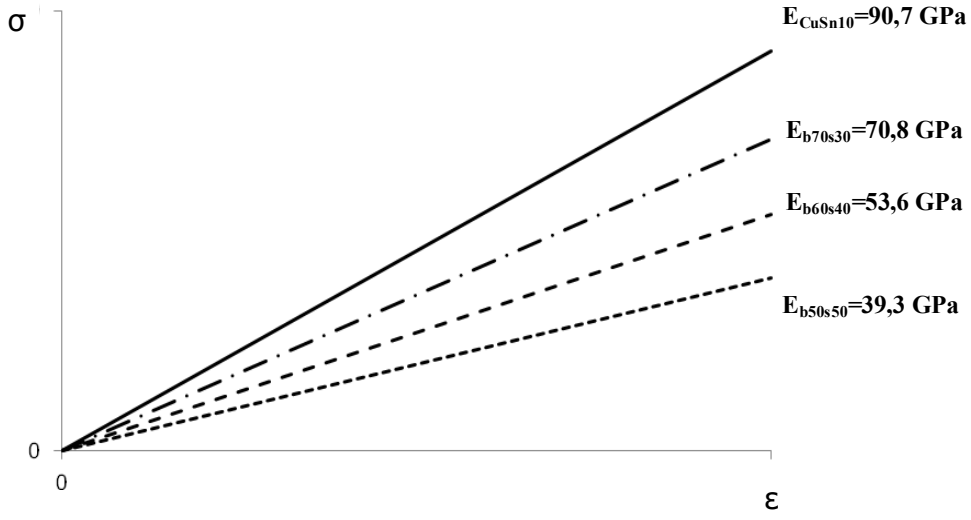
Şekil 8.4. Tokluk değerleri.

Kompozit malzemeler içerisinde b60s40 adıyla anılan grubun basma gerilmesi değeri σ_{b60s40}**=335 MPa**'dır. b60s40, basmada CuSn10'nun %78'i kadar dayanıma sahiptir. b60s40'ın gerçek birim şekil değiştirme miktarı ε_{b60s40}**=0,42**'dir. Bu değer CuSn10'nun sahip olduğu kırılmadan sonraki kısalma miktarının %127'sine tekabül etmektedir. Kompozit malzemeler içerisinde, ağırlıkça en çok çelik bileşene sahip olan b50s50 grubunun ise en az basma dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. b50s50'ye ait gerçek gerilme değeri σ_{b50s50}**=289 MPa**'dır. Bu değer CuSn10'nun sahip olduğu değerin yaklaşık olarak %67'sidir. Kompozit malzemeler içersinde en az sünekliğe

sahip olan b50s50 kompozit malzemenin gerçek birim şekil değiştirme değeri $\boldsymbol{\varepsilon_{b50s50}=0,36}$'dır. Ancak b50s50, CuSn10 ile mukayese edildiğinde kısalma miktarı, CuSn10'nun kırılmadan sonraki kısalma miktarının %110'u kadardır.

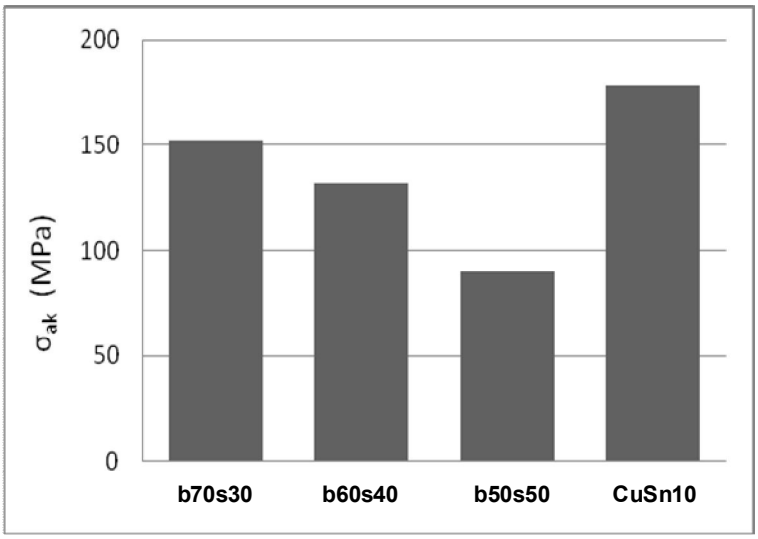
Aşağıda, şekil 8.5.'de CuSn10 ve kompozit malzemelere ait Young modülleri (E) eğim grafik olarak ifade edilmiştir. Young modülleri, her bir numune için gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisindeki elastik bölgede bulunan doğrusal çizginin eğiminin, bilgisayar programı kullanılarak tespit edilmesi ile belirlenmiştir.

CuSn10'un sahip olduğu Young modülü değeri, $\boldsymbol{E_{CuSn10}=90,7\ GPa}$'dır. Bu malzemeye en yakın değer b70s30'a aittir ve $\boldsymbol{E_{b70s30}=70,8\ GPa}$'dır. Diğer kompozit malzemelere ait Young modülü değerleri ise sırasıyla b60s40 için $\boldsymbol{E_{b60s40}=53,6\ GPa}$ ve b50s50 için $\boldsymbol{E_{b50s50}=39,3\ GPa}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8.5 Young modülleri

CuSn10 ve kompozit malzemelerin basmadaki akma dayanımları şekil 8.6.'da görülmektedir. CuSn10'nun akma dayanımı $\boldsymbol{\sigma_{CuSn10}= 178MPa}$ olarak hesaplanmıştır. b70s30'un akma dayanımı $\boldsymbol{\sigma_{b70s30}= 152MPa}$'dır ve CuSn10'un %85,5'i kadardır. b60s40 ve b50s50 malzemelere ait akma dayanımları ise sırasıyla $\boldsymbol{\sigma_{b60s40}= 132MPa}$ ve $\boldsymbol{\sigma_{b50s50}=90MPa}$'dır. b60s40 ve b50s50 malzemeler ile CuSn10 akma dayanımı açısından mukayese edildiğinde, sırasıyla b60s40 CuSn10'un %74'ü kadar, b50s50'nin ise %50,5'si kadar akma dayanımına sahip oldukları tespit edilmiştir.



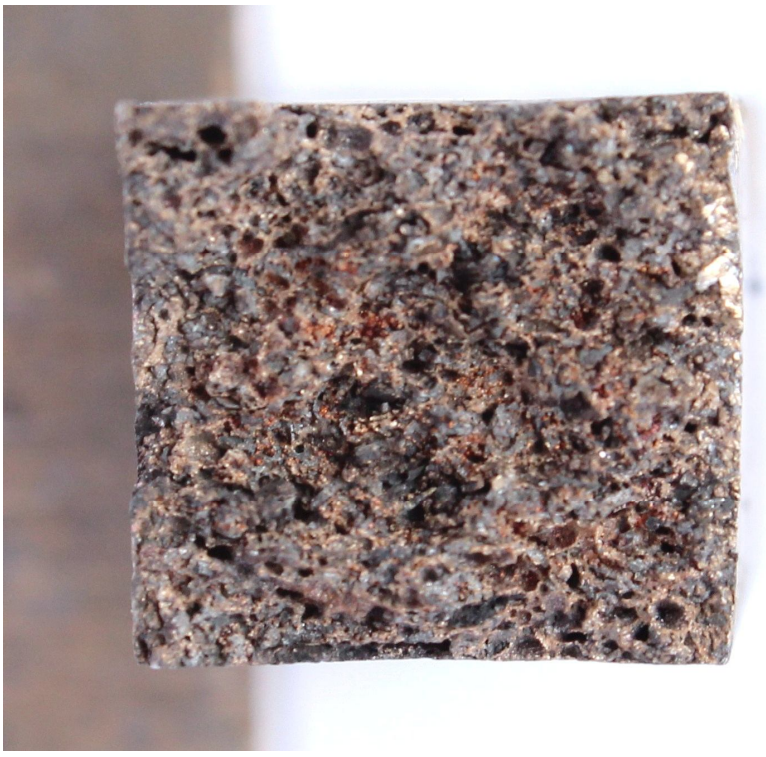
Şekil 8.6 Basmadaki akma dayanımları.

Basma deneyi sonuçları, CuSn10'un maksimum basma ve akma dayanımının kompozit malzemelere göre yüksek olduğunu, bununla birlikte CuSn10'un kırılmadan sonraki kısalma miktarının ise kompozit malzemelerden az olduğunu ortaya koymuştur.

Kompozit malzemelerin, CuSn10'dan daha az basma dayanımına ve kırılmadan sonraki kısalma miktarlarının daha yüksek olmasına, bu malzemelerin yapılarındaki boşluklar neden olmaktadır. Hacmen %25 açık gözenek içeren tüm bu kompozit malzemeler, yapı itibariyle hemen hemen aynıdırlar ve kısmen süngeri andırmaktadırlar (Şekil 8.7, Şekil 8.8 ve Şekil 8.9).



Şekil 8.7 b70s30 kompozit malzemenin eğme deneyi sonrası kırık yüzey görüntüsü..



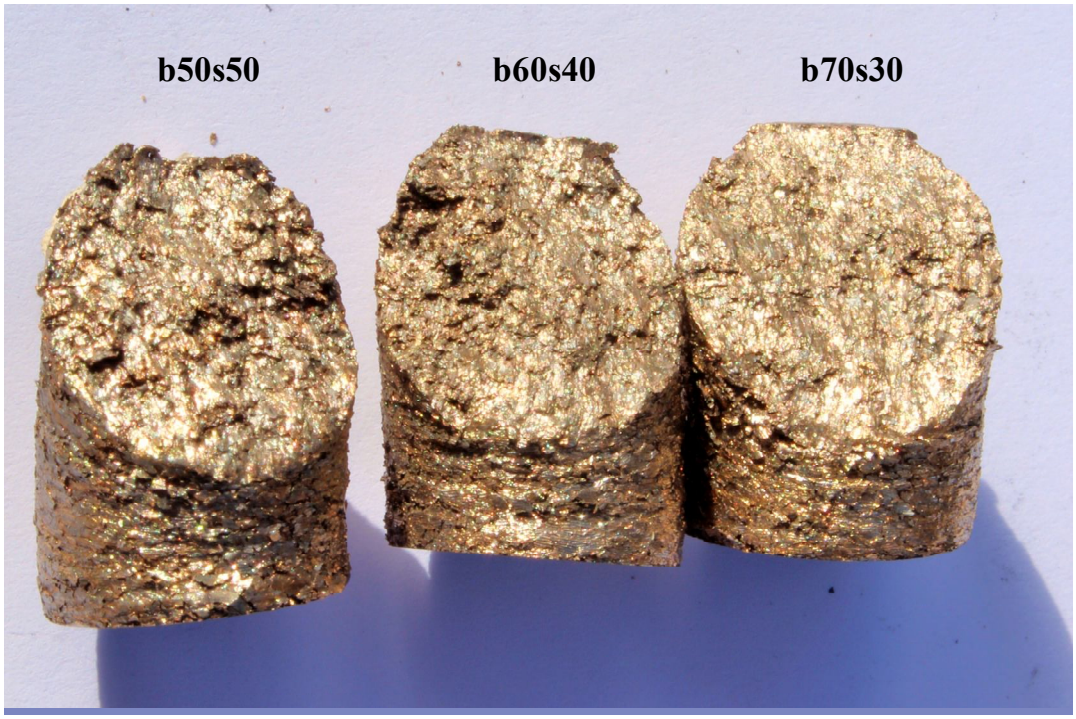
Şekil 8.8 b60s40 kompozit malzemenin eğme deneyi sonrası kırık yüzey görüntüsü.



Şekil 8.9 b50s50 kompozit malzemenin eğme deneyi sonrası kırık yüzey görüntüsü.

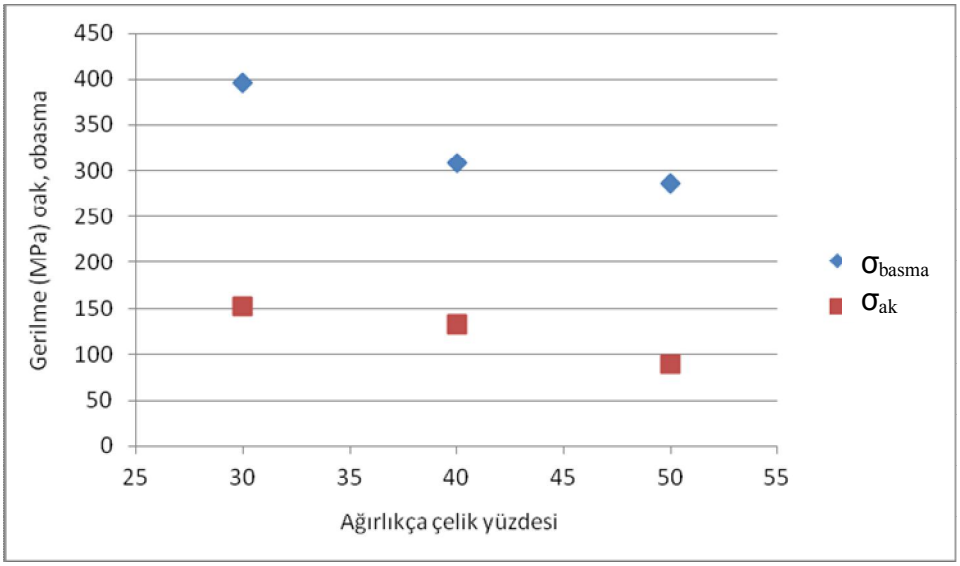
Kompozit malzemelere kuvvet uygulandığında, başlangıçta, çelik talaşlarla beraber, onları çevreleyen bronz bileşen direnç göstermektedir. Artan kuvvetin etkisi ile çeliğe göre daha sünek bir yapıya sahip bronz bileşende kayma olayının başlaması ile malzemede kalıcı şekil değişikliği başlamaktadır. Bu esnada, yapıda bulunan gözenekler kapanma eğilimi göstermektedirler. Uygulanan kuvvetin daha yüksek seviyelere çıkması, malzeme içerisindeki gözeneklerin büyük bir bölümünün kapanmasına neden olmaktadır. Kuvvetin daha da artıp maksimum seviyeye erişmesiyle, yapıda bulunan nispeten sert ve dayanımlı çelik partiküller kısmen ezilmekte ve kırılmaktadır. Bununla birlikte kayma olayının, çeliğe göre çok daha sünek özelliğe sahip olan bronz bileşende devam ettiği ve nihayet numunenin, maksimum kayma gerilmesinin oluştuğu 45°'lik açıya sahip düzlem boyunca kırıldığı görülmüştür. Bu sebepten, deney sonunda, bu düzlemde kırılan tüm kompozit numunelerinin kırılma yüzeylerinde, çoğunlukla kaymanın gerçekleştiği bronz bileşen ile az miktarda kırılmış çelik talaşları

gözlenmiştir. Kompozit malzemelerin tamamında rastlanan bu tarz kırık yüzeyler şekil 8.10.'da görülmektedir.

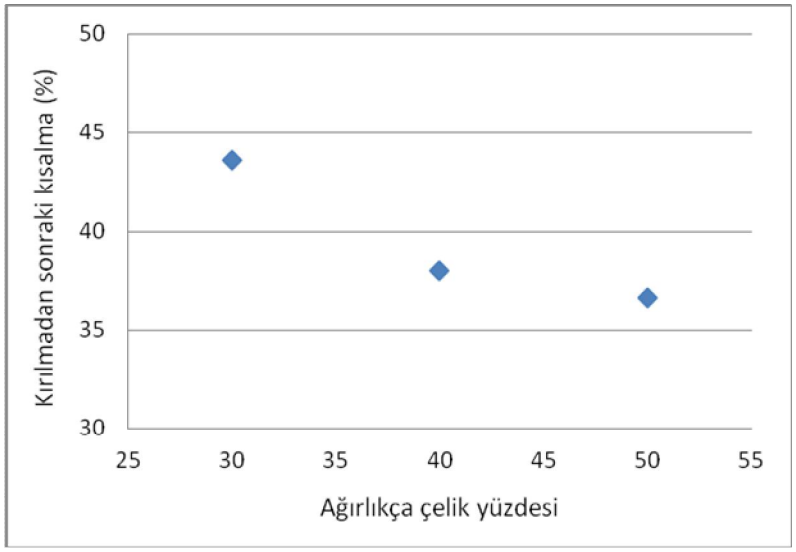


Şekil 8.10. MMK malzemelerin kırılma yüzeyleri.

Kompozit malzemeler kendi aralarında kıyaslandığında, yapıdaki çelik oranının artışı ile hem basma dayanımının hem de sünekliğin bir ölçüsü olan kısalma miktarının azaldığı gözlenmiştir (Şekil 8.11 ve 8.12). Ayrıca yapıdaki çelik oranının artışının, Young modülünü azaltıcı yönde etki ettiği görülmüştür.



Şekil 8.11. Kompozit malzemelerin yapısındaki çelik oranı ile basma dayanımı değişim.



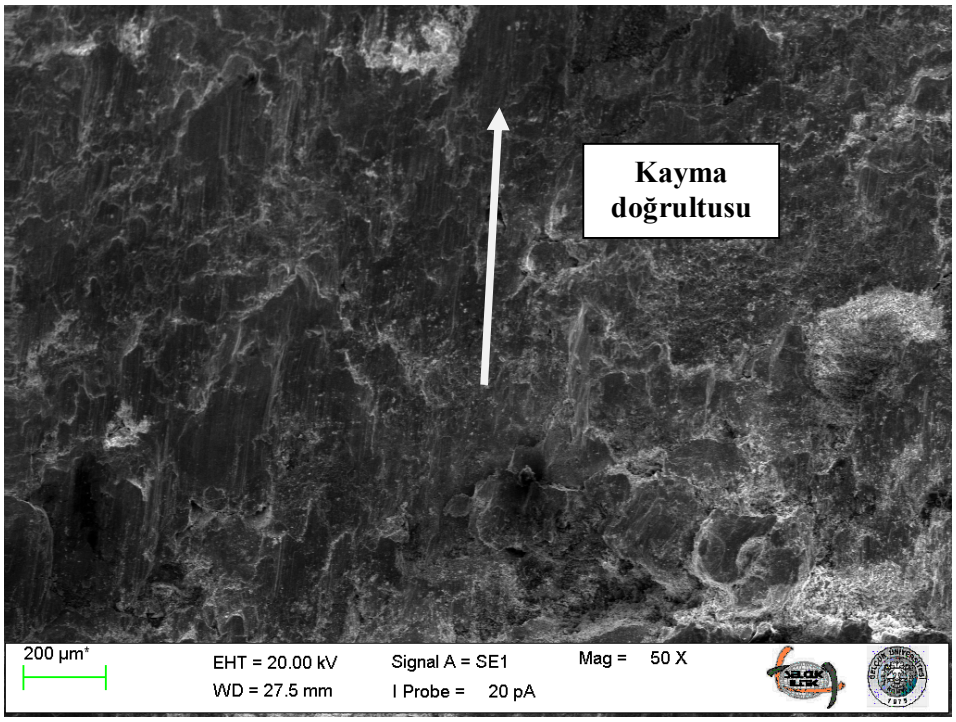
Şekil 8.12. Kompozit malzemelerin yapısındaki çelik oranı ile kısalma miktarı değişimi.

Kompozit malzemeler içinde en yüksek dayanıma ve en yüksek sünekliğe, ağırlıkça en çok bronz içeren, b70s30'un sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, b70s30 malzeme içerisinde, bronz bileşenin (matrisin) eriyerek çelik talaşların arasına nüfuz edip çevresini sarabilmesi ve mevcut boşlukları doldurmasının, b50s50 ve b60s40'a oranla daha fazla miktarda gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Zira b70s30 kompozisyonlu kompozit malzemede, çelik talaşlarını tamamen kaplayacak kadar çok bronz bulunmaktadır. Ağırlıkça en fazla çelik yüzdesine sahip olan b50s50 malzemede,

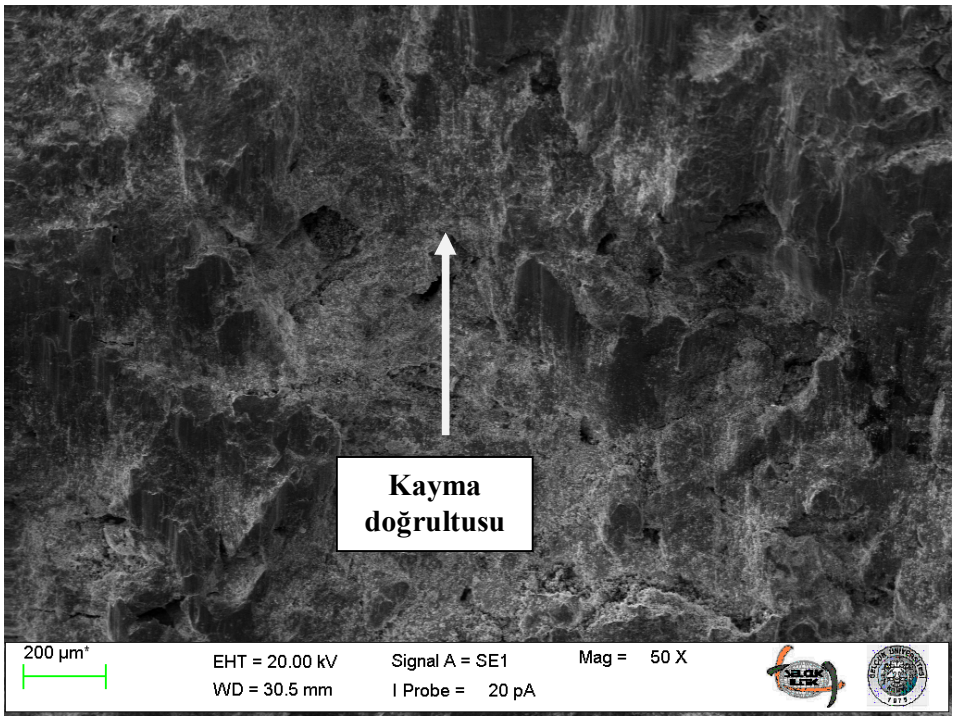
bronzun, çelik partiküller arasına nüfuz etme ve lehimleme işlemleri kısmen gerçekleşmektedir. Metal talaşların oda sıcaklığında sıkıştırılması esnasında, çelik talaşların kendi aralarında mekanik olarak bağlanmaları, sinterlemede, bronzun bu talaşlar arasına nüfuz etmesini zorlaştırmaktadır. Nüfuziyetin olamadığı ya da az olduğu bu gibi durumlarda, çelik talaşlar arasında sadece zayıf şekil bağı ile bağlanma (mechanical interlocking) vuku bulmaktadır. Bu bağların zayıf olmasının nedeni, metalik bağ oluşumu için uygun şartların oluşmaması yani 925 C° olan sinterleme sıcaklığının, çeliklerde sağlam bir bağ oluşumu için yeterli seviyede olmamasıdır. Zira toz metalürjisinde kullanılan çelik partiküller için bile sinterleme sıcaklığı, çeliğin ergime sıcaklığının en az %75'i kadar (1155C°) olmalıdır (German, 2007). Tüm bu sebeplerden dolayı, kompozit malzemeler içerisinde,b70s30 malzeme en dayanımlı en sünek ve dolayısıyla en tok malzemedir. Tüm bu özellikler bakımından, b50s50 malzeme en düşük seviyede, b60s40 ise bu iki malzemenin arasında yer almaktadır.

Şekil 8.10, şekil 8.13, şekil 8.14 ve şekil 8.15'de görülen kompozit malzemelere ait kırılma yüzeyleri resimlerinde ve TEM görüntülerinde, artan bronz miktarı ile daha pürüzsüz ve de boşluksuz bir kırılma yüzeyi oluştuğu belirgin bir biçimde görülmektedir. Bunun sebebi, kayma olayının bronz üzerinden gerçekleşmesi ve bronzun kayma sırasında yapıdaki gözenekleri sıvayarak kapatmasıdır. Hacmen eşit kabul edilebilecek gözenek miktarına sahip kompozit malzemelerin farklı oranlardaki kırılmadan sonraki kısalma miktarlarına sahip olmaları bu şekilde açıklanmıştır. Kaymanın en çok gerçekleştiği malzeme olan b70s30'un kısalma miktarı %42 iken bu değer b60s40 ve b50s50'de sırasıyla %42, %36'dır.

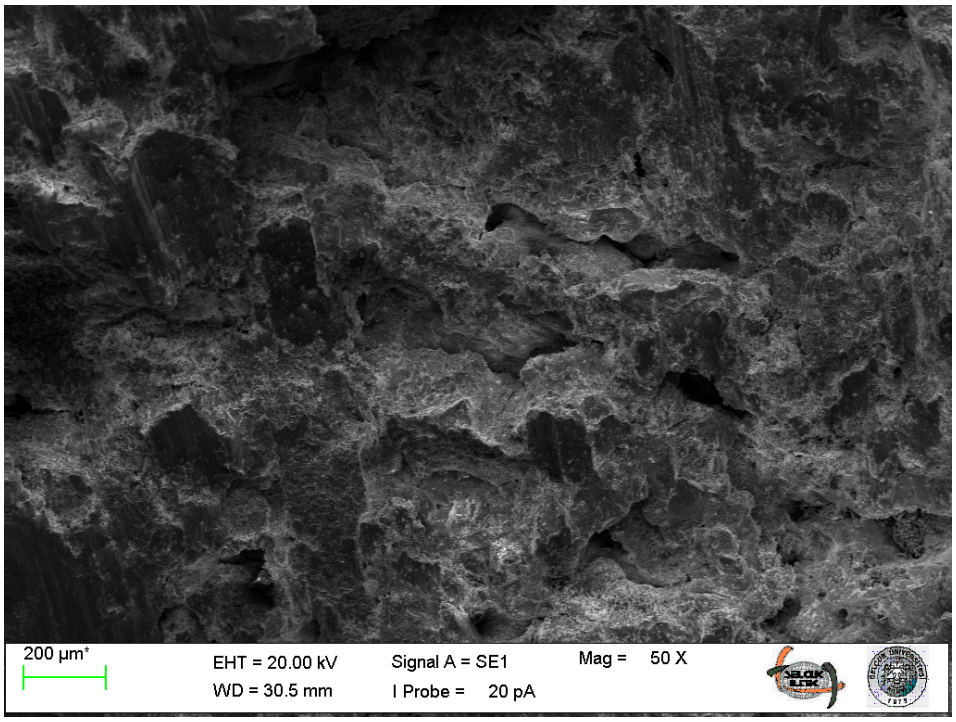
b70s30'da bulunan çelik talaşlar, yapıda çoğunluğu teşkil eden bronz bileşenle yoğun bir biçimde kuşatılmıştır. Uygulanan kuvvetle kayma olayı rahat bir biçimde bronz üzerinden gerçekleşmiştir. Bu sebepten b70s30'un kırık yüzey görüntüsü, kompozit malzemeler arasında, şekil 8.16'da gösterilen CuSn10'un kırık yüzeyine en çok benzeyen görüntüdür. b50s50 numune içerisinde ise, çelik talaşları arasına nüfuz etmiş bronz çok yoğun olmadığından, kayma olayı b70s30'daki kadar gerçekleşemeden malzeme kırılmıştır. Aynı sebepten b50s50 yüzeyinde nispeten büyük gözenekler gözlenmiş ancak herhangi belirgin bir kayma doğrultusu gözlenmemiştir. Bu durum b50s50'yi, b60s40 ve b70s30'a oranla neden daha gevrek bir davranış gösterdiğini açıklamaktadır.



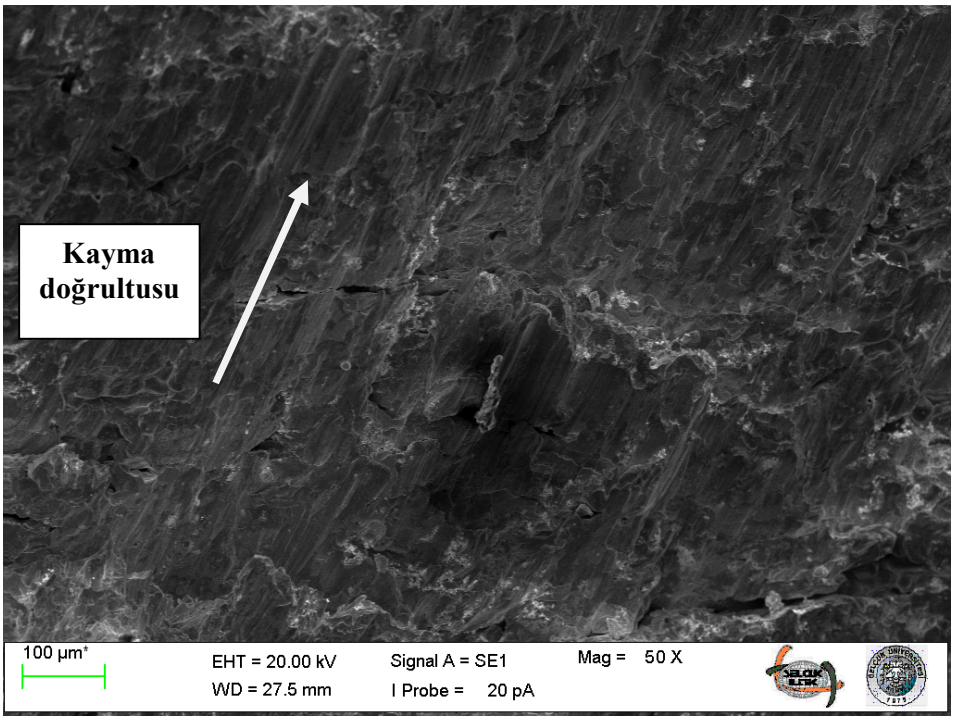
Şekil 8.13. b70s30 numunesi basma testi sonunda alınan kırık yüzey görüntüsü (TEM, 50X).



Şekil 8.14. b60s40 numunesi basma testi sonunda alınan kırık yüzey görüntüsü (TEM, 50X).



Şekil 8.15. b50s50 numunesi basma testi sonunda alınan kırık yüzey görüntüsü (TEM, 50X).

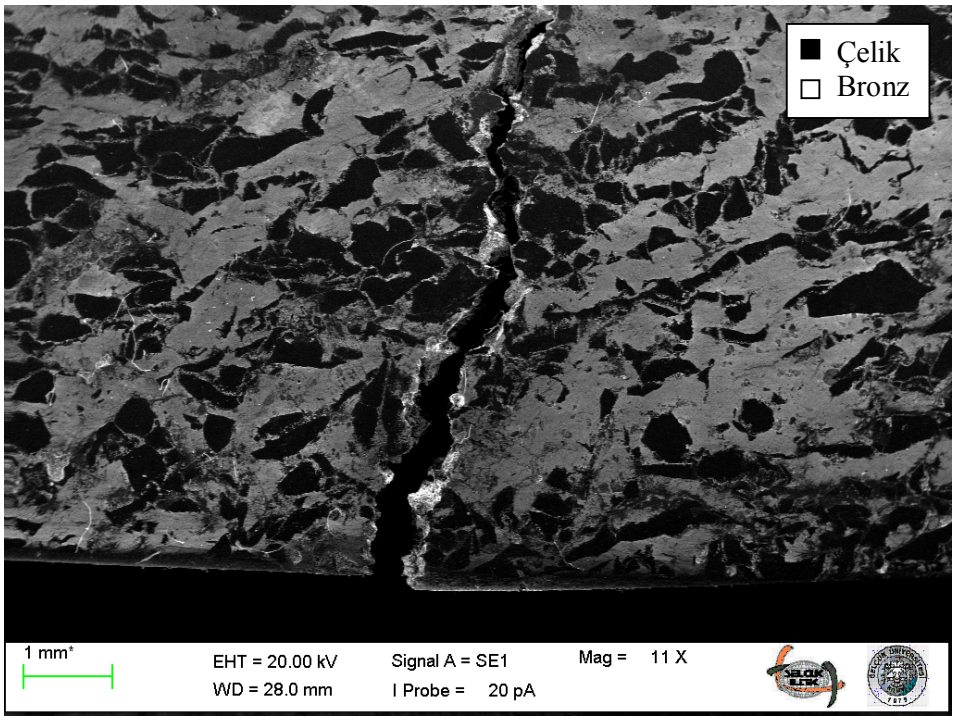


Şekil 8.16. CuSn10'nun basma testi sonunda alınan kırık yüzey görüntüsü (TEM, 50X).

8.2. Üç Noktadan Eğme Deneyi Sonuçları

8.2.1. Talaşların sıkıştırıldığı doğrultuda tatbik edilen eğme deneyi sonuçları

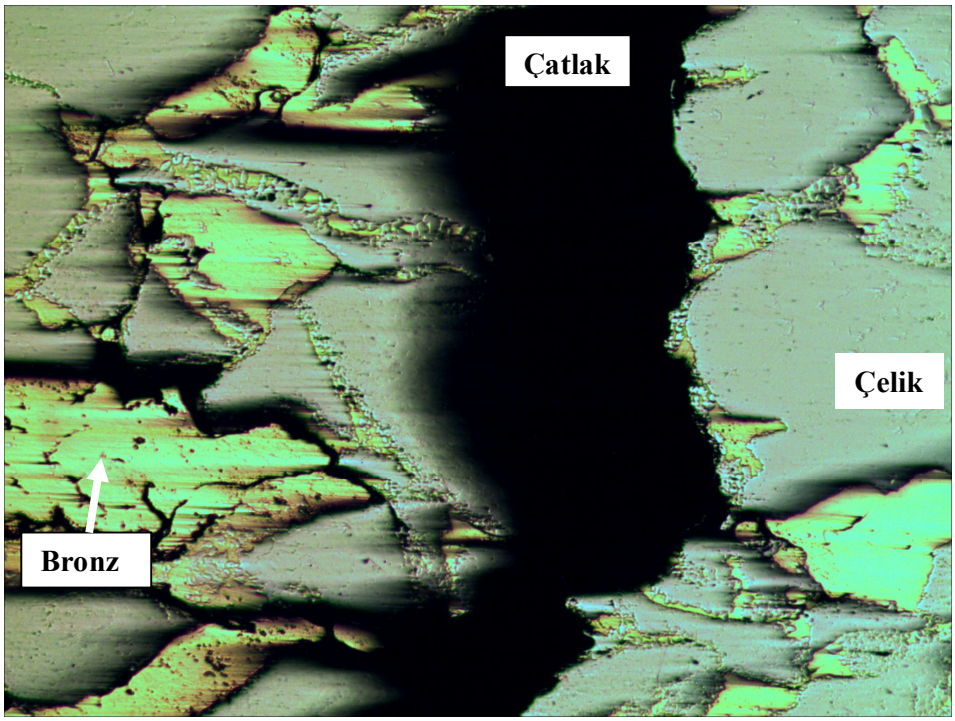
CuSn10'un ve kompozit malzemelerin eğme deneyleri esnasında, uygulanan kuvvetin artışıyla tüm numunelerin orta bölgelerinde, alt yüzeyden üst yüzeye doğru zikzaklar çizerek ilerleyen çatlak oluşumu gözlenmiştir. Eğme deneyi numunelerinin sahip olduğu çekme ve basma dayanımları arasındaki fark büyük olduğu için, numuneler daha çok çekme zorlamasına maruz kalacak şekilde kırılmaktadır. Bu durum şekil 8.17'de de görüldüğü gibi, çatlağın boydan boya açılma moduyla (mod-I) ilerlemesi sonucunu doğurmuştur.



Şekil 8.17. Eğme deneyi numunesindeki çatlağa ait TEM görüntüsü (11X).

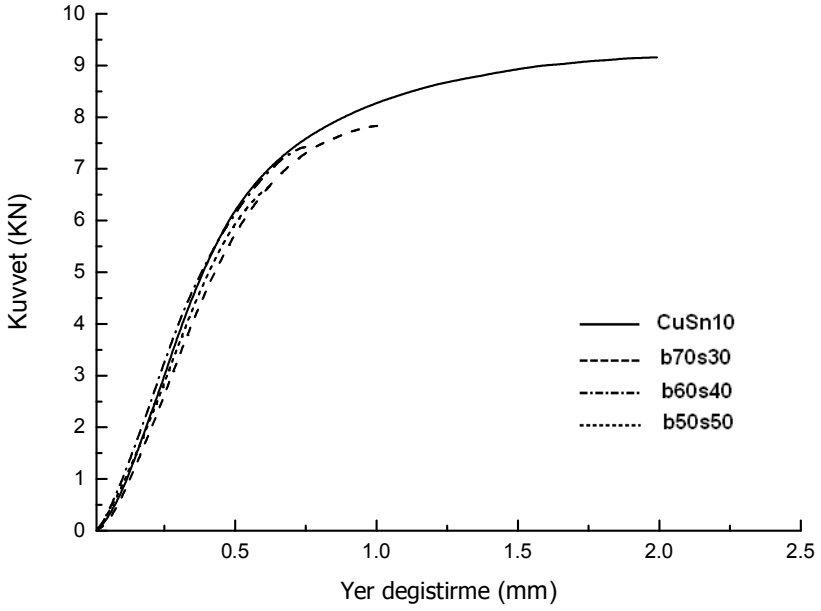
Deney sonunda tüm kompozit malzeme gruplarına ait numuneler optik mikroskopta incelenmiştir. Bu incelemelerde, çatlağın, bronzun eriyip içini tam olarak dolduramadığı gözenekler ile bunlara ek olarak bronz bileşen ve/veya çelikle bronz talaşların birleştiği yüzeylerden ilerlediği gözlenmiştir. Ancak oluşan çatlağın ve yer yer

bu çatlaktan dallanan daha küçük çatlak kollarının, çelik bileşen üzerinden ilerlemediği, bunun yerine çevresinden dolaştığı gözlenmiştir (Şekil 8.18.).



Şekil 8.18. Eğme deneyi sonunda kompozit numunede oluşan çatlak ve dallanmalar (50X).

Kompozit malzemelere ve CuSn10'a ait, üç noktadan eğme deneyinden elde edilen kuvvet-sehim verileri şekil 8.19.'de görülmektedir. Bu grafikte, kompozit malzemelerin, sıkıştırma doğrultusunda yapılan eğme deneyinde elde edilen kuvvet ve numunelerin orta noktalarının sehim değerleri ile CuSn10'a ait değerler bir arada gösterilmiştir.



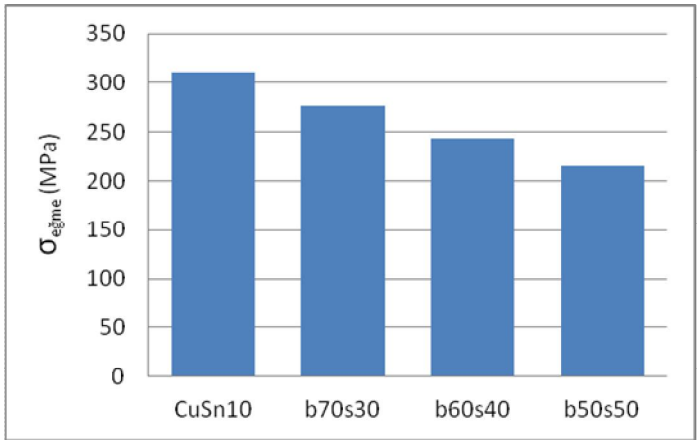
Şekil 8.19. CuSn10 ve kompozit malzemelerin kuvvet-sehim eğrileri.

Eğme deneyi sonucunda, CuSn10'nun, kompozit malzemelere oranla daha yüksek kuvvette kırıldığı ve özellikle kırılıncaya kadar sahip olduğu sehim miktarının kompozit malzemelere oranla çok yüksek olduğu gözlenmiştir. CuSn10'nun dayandığı maksimum eğme kuvveti $\mathbf{F_{CuSn10}=9,11\ kN}$'dur. Bu malzemenin sehim miktarı $\mathbf{\delta_{CuSn10}=1,92\ mm}$'dir. CuSn10 sahip olduğu bu değerle, kompozit malzemelere oranla çok daha fazla sünek bir malzeme olduğunu göstermiştir. CuSn10'a en yakın değere sahip kompozit malzeme b70s30'dur. b70s30'a ait kuvvet değeri $\mathbf{F_{b70s30}=8,13kN}$'dur. Bu değer, CuSn10'nun maksimum kuvvet değerinin yaklaşık %89,5'i kadardır. b70s30'un sehim miktarı $\mathbf{\delta_{b70s30}=0,99\ mm}$'dir. Bu değer kompozit malzemeler içerisinde en yüksek değerdir. Ancak CuSn10'la kıyaslandığında, bu malzemenin sehim miktarının yaklaşık olarak %51,5'ine tekabül etmektedir.

b60s40 grubunun sahip olduğu maksimum eğme kuvveti $\mathbf{F_{b60s40}=7,12\ kN}$'dur. Bu grubun sehim miktarı ise $\mathbf{\delta_{b60s40}=0,76\ mm}$ olarak ölçülmüştür. b60s40 grubu CuSn10 ile maksimum eğme kuvvetleri aşısından kıyaslandığında, CuSn10'un %78'i kadardır. b60s40 grubunun sehim miktarı, CuSn10'dan ve b70s30'dan daha az olduğu görülmüştür. Bu değer, $\mathbf{\delta_{b60s40}=0,76\ mm}$'dir. Bu değer CuSn10'un sehim miktarının % 40'ı kadardır.

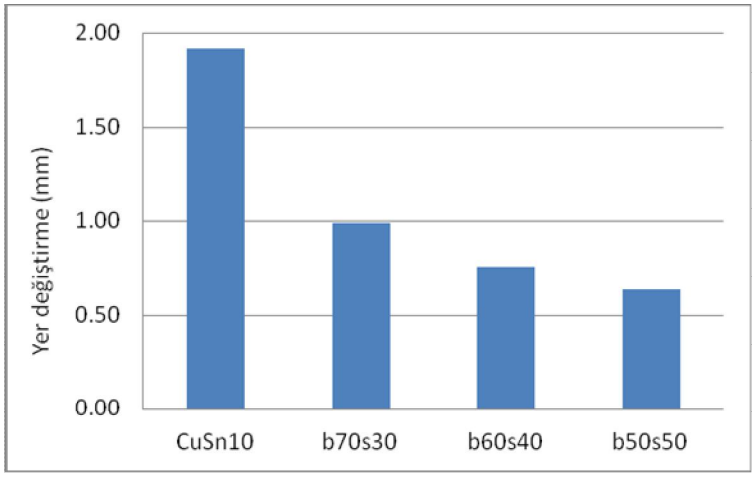
Tüm malzemeler içerisinde en düşük dayanım sergileyen malzeme b50s50 grubudur. Bu grubun sahip dayanabildiği maksimum eğme kuvveti değeri $\mathbf{F_{b50s50}=6,34\ kN}$'dur. Bu değer bronzun maksimum eğme kuvvetinin %70'i kadardır. Sehim miktarı açısından değerlendirildiğinde, yine en düşük değer sahip olan b50s50 grubudur. Bu grubun sehim miktarı $\mathbf{\delta_{b50s50}=0,63\ mm}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer CuSn10'la mukayese edildiğinde onun, %33'üne denktir.

Tüm bu veriler ışığında, CuSn10'un, kompozit malzemelere oranla daha dayanımlı, olduğu ancak özellikle b70s30 grubuyla arasında dayanım açısından çok büyük bir fark olmadığı görülmüştür (Şekil 8.20). Bu durum yapıdaki çelik talaşlar arasına yeterli miktarda bronz bileşen nüfuziyeti olduğunda sağlam bir yapı kurulabildiğini göstermektedir. b70s30 grubunun sahip olduğu kuvvet değeri ve sehim miktarı, bu grubun kompozit malzemeler arasında en dayanımlı ve en sünek malzeme olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 8.20. CuSn10 ve kompozit malzemelerin eğilme gerilmesi değerleri.

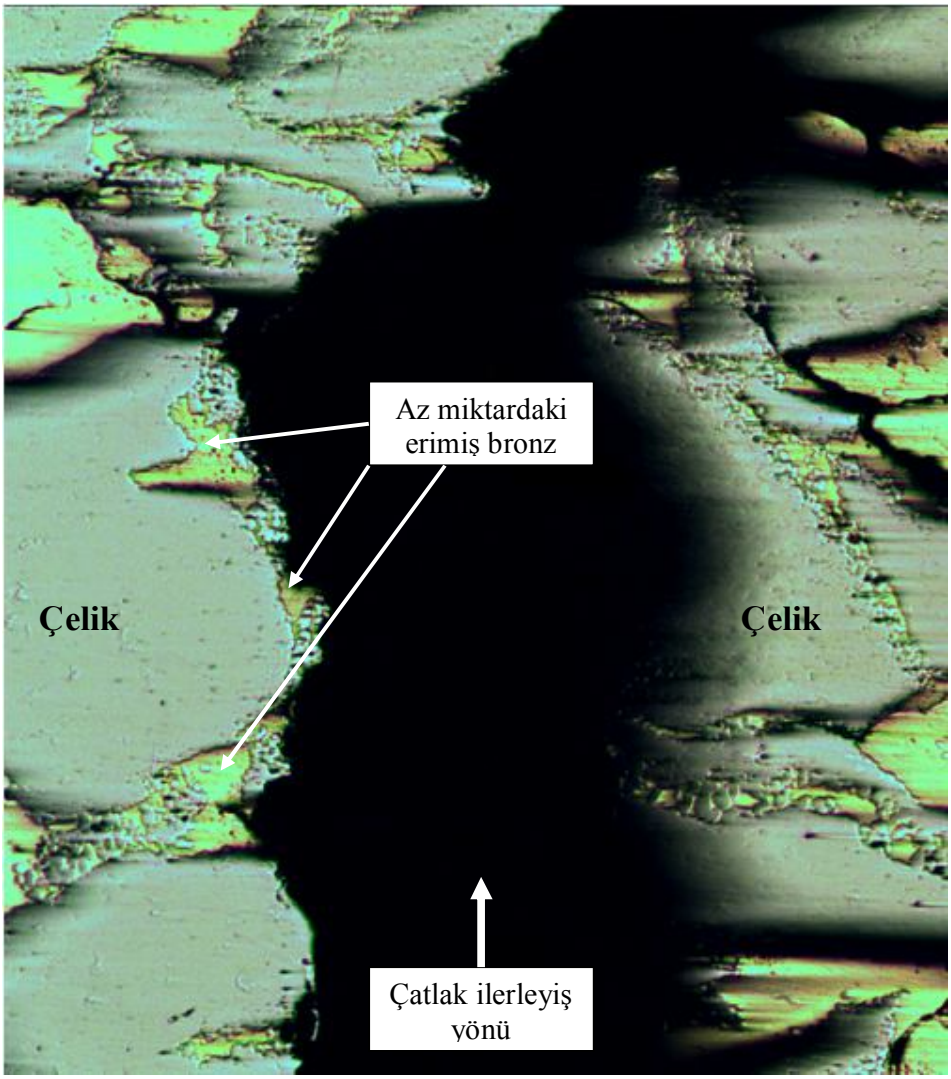
CuSn10 ile kompozit malzemelerin mukayesesinde en çarpıcı fark sehim miktarları arasındadır. Zira CuSn10'un, kompozit malzemeler arasında en büyük sehim miktarına sahip, en çok bronz bileşen içeren b70s30 grubunun sehim miktarının bile yaklaşık 2 katı sünekliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu oran, en az bronz bileşen içeren grup olan b50s50'de ise 3 katı kadardır (Şekil 8.21). Yapıdaki çelik oranının artışıyla, kompozit malzemelerin daha gevrek özellik sergiledikleri gözlenmiştir.



Şekil 8.21. CuSn10 ve MMK malzemelerin sehim değerleri.

Kompozit malzemelerin CuSn10'dan daha az sünekliğe sahip olmalarının en önemli nedeni, yapıları içerisinde hacmen %25 oranında bulunan ve çekme zorlamasında çentik etkisi gösteren, açık gözeneklerdir. Çatlak bu gözeneklerden çok daha hızlı ve etkili bir biçimde ilerlemektedir. Basma deneyinde kompozit malzemelerin, CuSn10'a göre çok fazla şekil değiştirebilmelerine olanak sağlayan bu gözenekler, test numunelerinin daha ziyade çekme zorlamasına maruz bırakıldıkları bu eğme deneyinde, buna aksi yönde tesir ederek onların daha gevrek davranış sergilemelerine sebep olmuşlardır.

Kompozit malzemelerin daha az sünek davranış göstermelerinin diğer bir sebebi de, talaşların oda sıcaklığında sıkıştırılması esnasında, çelik talaşlar arasında oluşan kapalı gözeneklerdir. Özellikle çelik-çelik talaşları arasına, onları kuvvetli bir biçimde bağlayacak miktarda bronzun eriyip nüfuz edememesi ya da çok az nüfuz etmesi, çatlağın gözeneklerden sonra en zayıf olan bu yapı üzerinden ilerlemesine sebep olmakta ve kompozit yapıyı daha da zayıflatarak gevrek davranış sergilemesine neden olmaktadır. Bu durum aşağıda şekil 8.22'da görülmektedir. Şekilde, orta kısmında çatlak ve çatlağın her iki yakasında çelik talaşlar görülmektedir. Çatlak tarafından ayrılan çelik talaşların uç kısımlarında yer yer erimiş bronz bileşen görülmektedir. Çatlak, ilerleyişini çelik talaşlar arasında yeter miktarda bronz bulunmayan bu zayıf bölge üzerinden sürdürmüştür.

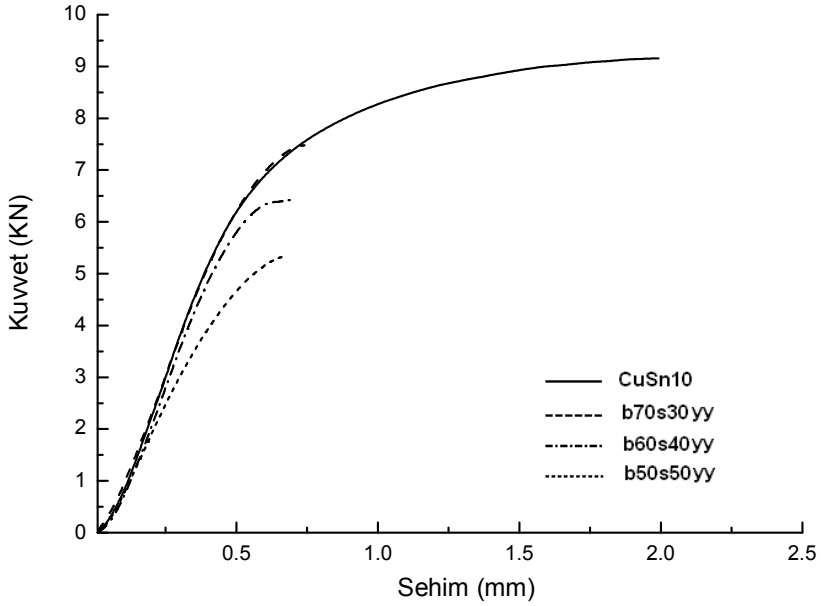


Şekil 8.22. Eğme deneyi numunesindeki çatlak (b50s50 malzeme- 50X).

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki bu olumsuz etki, yapıdaki çelik miktarının artışı ile daha etkin bir hale gelmektedir. Bu durum daha ziyade ağırlıkça en çok çelik bileşen içeren b50s50 grubunda gerçekleşmektedir. Bu nedenle kompozit malzemeler kendi aralarında mukayese edildiğinde, en dayanımsız ve en az sünek olan grup b50s50 grubudur.

8.2.2. Yan yüzeyden tatbik edilen eğme deneyi sonuçları

Talaşların oda sıcaklığında sıkıştırılması esnasında, sıkıştırma yönüne dik olarak yönelen talaşlar kompozit malzemelerin anizotropik olmasına sebep olmaktadır. Talaşların bu yöndeki oryantasyonunun, kompozit malzemelerin eğme zorlamasındaki mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş, yan yüzeylerden uygulanan kuvvet ile sehim miktarı verileri şekil 8.23.'deki grafikte gösterilmiştir.

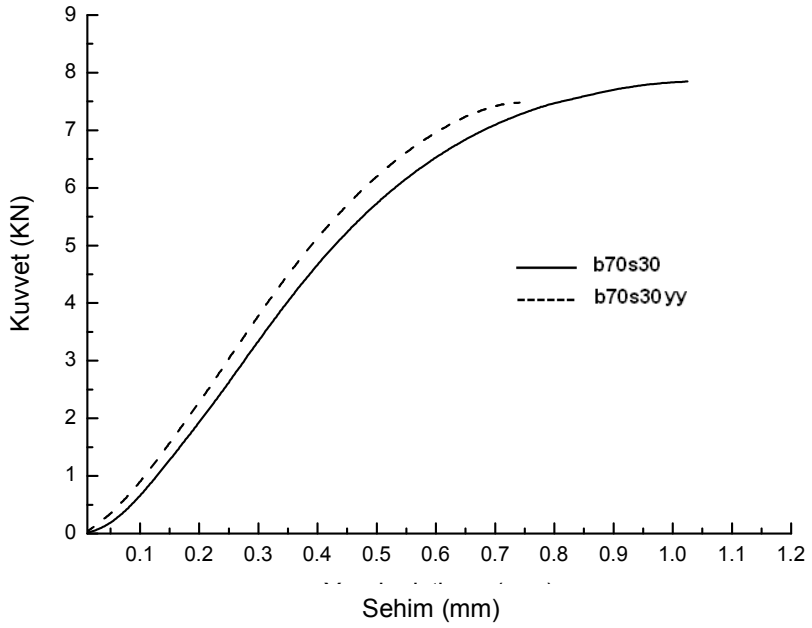


Şekil 8.23. CuSn10 ve kompozit malzemelerin yan yüzeydeki kuvvet-sehim eğrileri.

Kompozit malzemelerin bu yöndeki kırılmaya karşı koydukları maksimum kuvvet miktarlarının CuSn10'a kıyasla az olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin, talaşların sıkıştırma doğrultusunda tatbik edilen eğme deneylerinde gözlendiği gibi, kompozit malzemelerin çentik etkisi gösteren gözenekler ve buna ilave olarak, yer yer bronzun yeteri miktarda nüfuz edemediği çelikçe zengin bölgelerin varlığıdır. Sehim açısından irdelendiğinde de, kompozit malzemeler, sahip oldukları bu yapı nedeniyle CuSn10'a göre daha gevrek davranış sergilemektedirler.

Yan yüzeylerden icra edilen deney sonuçlarında da, kompozit malzemelerin kendi aralarında mukayeselerinde, yapıdaki çelik miktarının artışı ile kompozit malzemelerin kırılmaya karşı gösterdikleri kuvvet miktarının azaldığı görülmektedir.

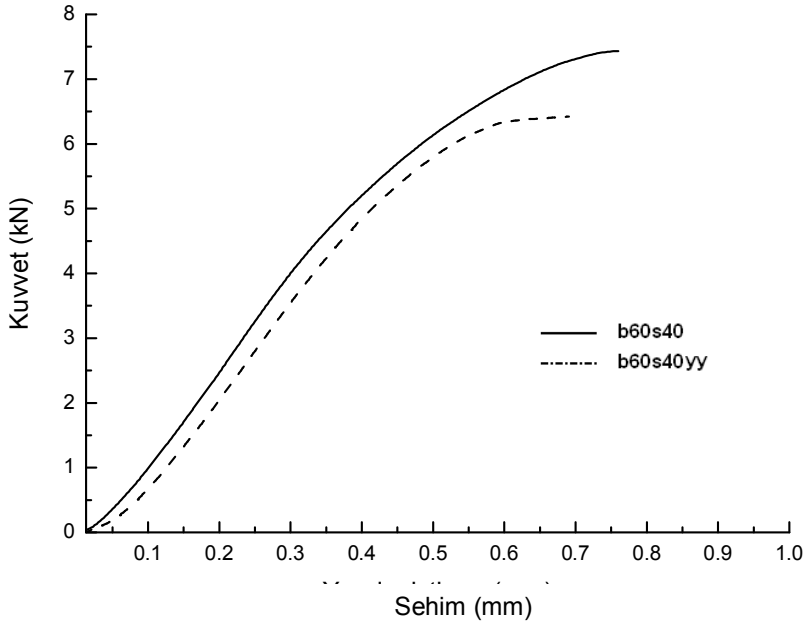
Kompozit malzemelerin anizotropi özellikleri, her bir grubun kendi içerisinde farklı yüzeylerinden tatbik edilen deneylerden edinilen verilerin karşılaştırılması ile ortaya çıkmıştır. Aşağıda şekil 8.24, 8.25 ve 8.26'de her bir kompozit grubunun kendi içerisinde, bu iki farklı yüzeylerinden tatbik edilen deneylerin sonuçları ikili olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.24. b70s30 malzemenin sıkıştırma ve yan yüzeyden tatbik edilen deneylerin kuvvet-sehim eğrileri.

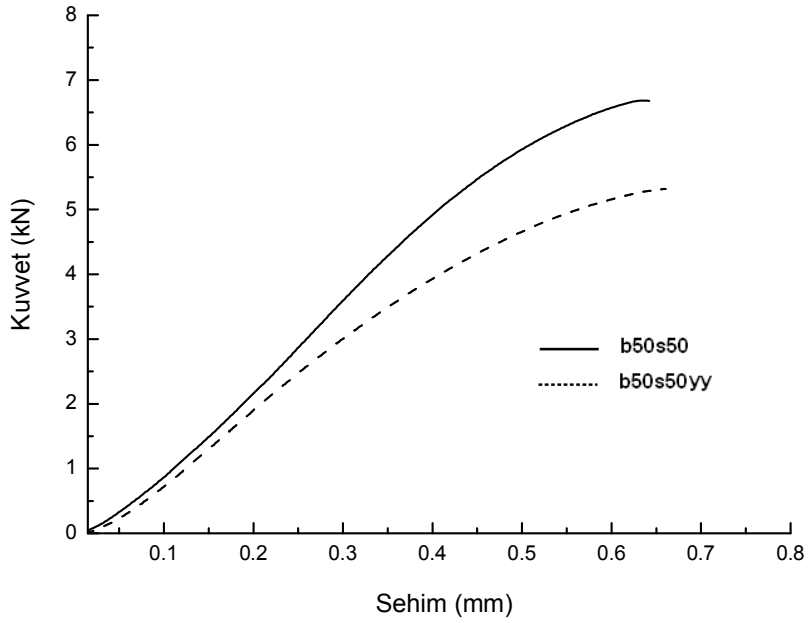
Şekil 8.24'de b70s30 grubuna ait numunenin yan yüzeyinden elde edilen kuvvet –sehim eğrisi kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Bu eğrinin maksimum değeri $\mathbf{F_{b70s30yy}=7,90\ kN}$'dur. Bu değer, b70s30 malzemede, talaşların sıkıştırıldığı yüzeyden elde edilen değerin (F_{b70s30}=8,13 kN), %97'si kadardır. Bronzun ağırlıkça oranının en fazla olduğu bu grupta, kırılmaya karşı gösterilen maksimum kuvvetler açısından mukayese edildiğinde çok ciddi bir farkın olmadığı gözlenmiştir. Ancak bu kompozit malzemenin yukarıdaki grafiğinde, en göze çarpan farkın sehim miktarları arasında olduğu görülmektedir. Yan yüzeylerden yapılan deneylerde sehim miktarının $\mathbf{\delta_{b70s30yy}=0,76\ mm}$ olduğu görülmüştür. Bu sehim değeri, talaşların sıkıştırıldığı yüzeyden elde edilen değerin (δ_{b70s30}=0,99 mm), %76'sı kadardır.

Aşağıda Şekil 8.25'da b60s40 grubuna ait numunenin yan yüzeyine uygulanan kuvvet ile bu kuvvet neticesinde meydana gelen sehim miktarı grafiği kesikli çizgiyle gösterilmiştir. Bu eğrideki maksimum kuvvetin değeri $\mathbf{F_{b60s40yy}=6,71\ kN}$'dur. Bu değer, yine aynı malzemenin talaşların sıkıştırıldığı yüzeyden yapılan deney sonucu ile (F_{b60s40}=7,12 kN) mukayese edildiğinde, onun %94'ü kadardır. Yan yüzeydeki sehim miktarı, $\boldsymbol{\delta_{b60s40yy}=0,70}$ mm'dir. Bu değer, δ_{b60s40} değerinin %92'si kadardır.



Şekil 8.25. b60s40 malzemenin sıkıştırma ve yan yüzeyden tatbik edilen deneylerin kuvvet-sehim eğrileri.

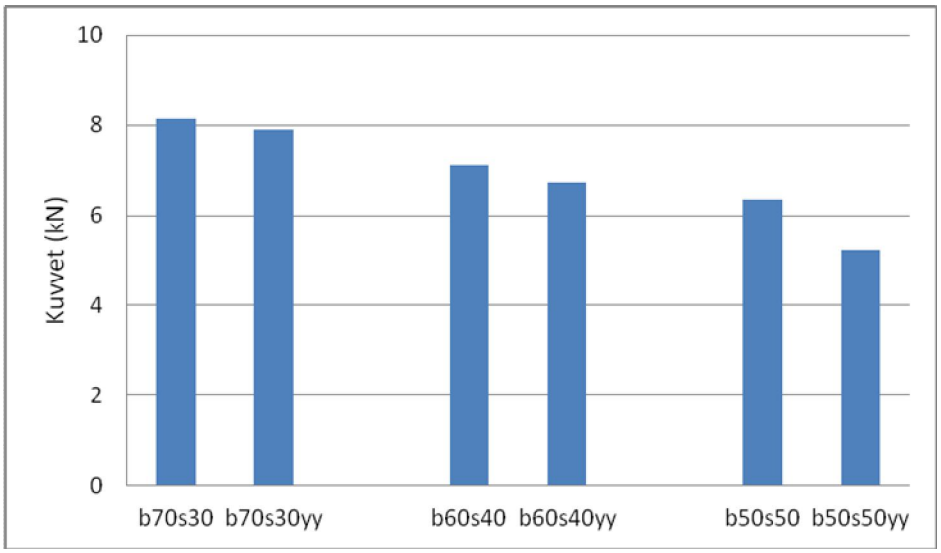
Aşağıda Şekil 8.26'de b50s50 grubuna ait veriler görülmektedir. Deneyin yan yüzeylerden yapıldığı durumda, kompozit malzemenin gösterdiği maksimum kuvvet değeri $\mathbf{F_{b50s50yy}=5,23\ kN}$'dur. Bu, sıkıştırma yüzeyinden yapılan deney sonucuna göre düşük bir değerdir. Yüzde olarak sıkıştırma yüzeyinden elde edilen sonucun(F_{b50s50}'nin) %82'sine tekabül etmektedir. Şekil 8.21'deki eğriler sehim miktarları açısından incelendiğinde, bu iki yüzeyden tatbik edilen deneyden, sehim miktarlarının hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bu değer $\boldsymbol{\delta_{b50s50yy}=0,61\ mm}$'dir ve δ_{b50s50}'nin %97'si kadardır.



Şekil 8.26. b50s50 malzemenin sıkıştırma ve yan yüzeyden tatbik edilen deneylerin kuvvet-sehim eğrileri.

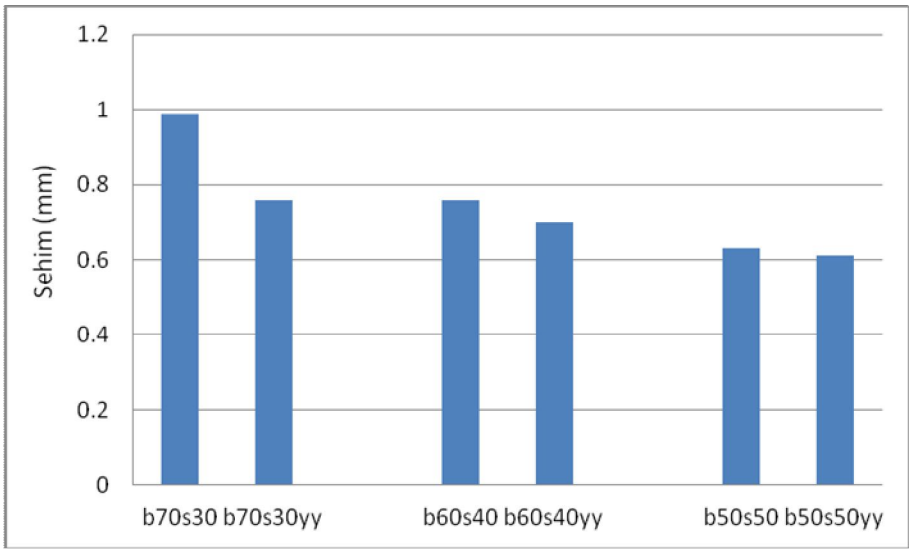
Her bir kompozit malzeme grubunun kendi içerisinde ve farklı yüzeylerinden tatbik edilen eğilme deneyi sonuçları toplu halde incelendiğinde, bütün malzemeler için yan yüzeylerden elde edilen kuvvet ve sehim değerlerinin, sıkıştırma yüzeyinden elde edilen değerlerden daha az olduğu gözlenmiştir. Talaşların yönelimi kompozit malzemeleri nispeten daha dayanımsız ve gevrek davranış sergilemelerine sebebiyet vermiştir

Aynı malzemelerin farklı yüzeylerinden tatbik edilen bu deney sonuçları kompozit malzemelerin kırılmaya karşı gösterdikleri kuvvet miktarı açısından kıyaslandığında, kuvvetler arasındaki farkın çelik oranın artıp, bronz oranının azalması ile büyüdüğü görülmüştür (Şekil 8.27).



Şekil 8.27. Kompozit gruplarının sıkıştırma ve yan yüzeyden kırılma kuvvetleri açısından mukayesesi.

Sonuçlar sehim miktarı açısından mukayese edildiğinde ise yapıdaki çelik bileşenin oranının artışı ile sehimler arasındaki farkın azaldığı gözlenmiştir (Şekil 8.28).

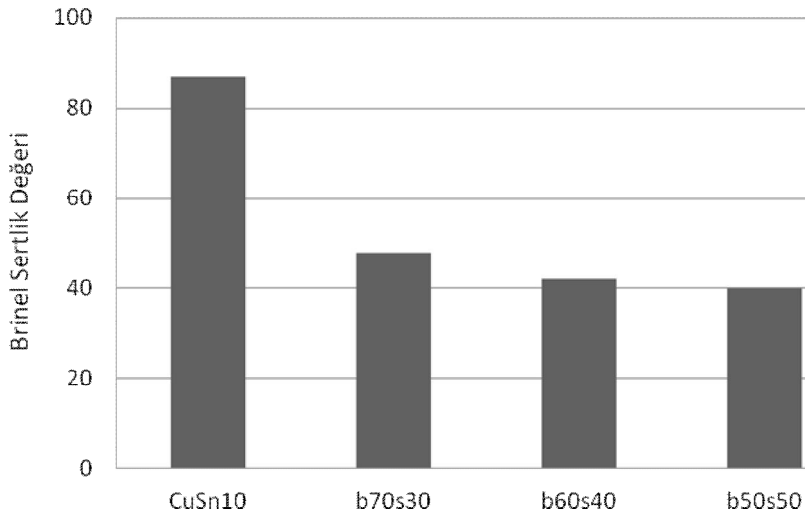


Şekil 8.28. Kompozit malzemelerin sıkıştırma ve yan yüzeyden sehim açısından mukayesesi.

8.4. Yüzey Sertlik Ölçümü Sonuçları

8.4.1. Brinell sertlik ölçümü sonuçları

Kompozit malzemelere ve CuSn10'a yapılan BSD sonuçları bir arada sütun grafik halinde aşağıda şekil 8.29'de gösterilmiştir.



Şekil 8.29. Ortalama BSD değerleri.

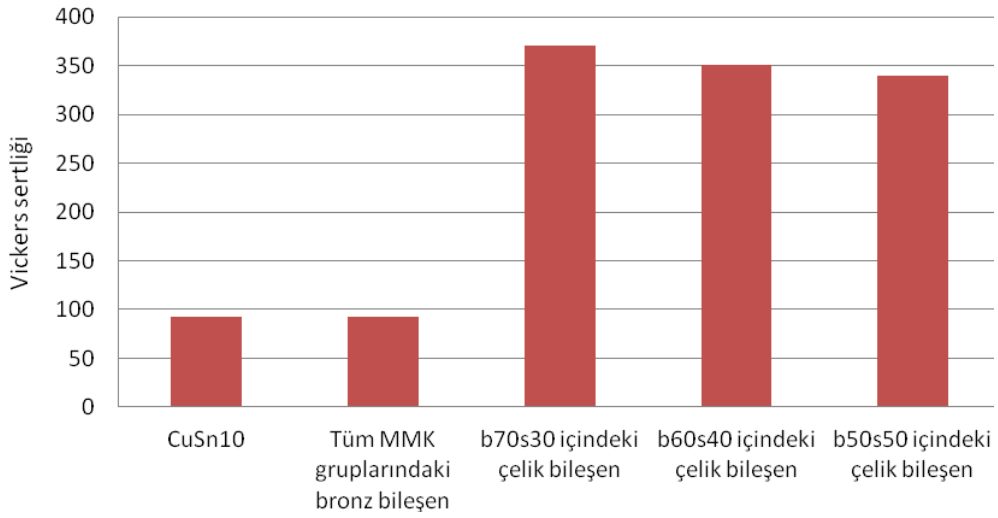
BSD sonuçlarında, CuSn10'nun kompozit malzemelerden çok daha yüksek yüzey sertliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu beklenen sonuç, kompozit malzemelerin yapılarında bulunan gözeneklerden kaynaklanmaktadır.

Kompozit malzemeler kendi aralarında mukayese edildiğinde, yapıdaki bronz bileşen miktarının artışı ile sertliğin biraz daha arttığı görülmüştür. Bu artış, yapıyı bir arada tutan bronz miktarının artışı ile kompozit malzemelerin daha sağlam bir yapıya kavuşması ile gerçekleşmektedir. Yapıdaki çelik bileşeni çevreleyecek ve aynı zamanda gözenekleri ergiyip doldurabilecek bronz miktarı en çok b70s30 malzemede bulunduğundan kompozit malzemeler içerisinde en yüksek BSD değerine sahip olmuştur. En az bronz bileşen içeren b50s50 malzemede ise birbirlerine nispeten daha zayıf bağlı çelik talaşları ve ergimiş bronz tarafından yeter düzeyde doldurulamamış gözeneklerin varlığı sebebiyle en düşük BSD değeri elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, önceden yapılmış basma deneyi sonuçları ile paralellik arz etmiştir.

8.4.2. Vickers sertlik ölçümü sonuçları

Kompozit malzemelere ve CuSn10'a yapılan VSD sonuçları bir arada sütun grafik halinde aşağıda şekil 8.30'de gösterilmiştir.



Şekil 8.30. Ortalama VSD değerleri.

Kompozit malzemelerin yapılarındaki çelik ve bronz bileşenlerin nihai sertliklerini ayrı ayrı belirlemek için icra edilen mikro sertlik test sonuçlarında, kompozit malzemelerin içerisinde matris görevini üstlenen bronz bileşenin sertliğinin (93 VSD) tüm kompozit malzemelerde aynı olduğu ve bu değerin kompozitin içerisindeki çelik bileşenin sertliğine nazaran oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bütün bunlara ek olarak kompozit yapısındaki bu bronz matrisin VSD değerinin, CuSn10'la aynı olduğu belirlenmiş ve üretim sırasında yağlayıcı olarak kullanılan toz grafitin, sinterleme esnasında bronz bölgesinde herhangi bir yapısal değişikliğe yol açmadığı sonucuna varılmıştır. Bronzun ağırlıkça %90'ını oluşturan YMK(Yüzey Merkezli Kübik) yapıdaki bakırın (Cu), sinterleme sıcaklığı (925°C) ve süresi boyunca karbon (C) ile herhangi bir etkileşime girmediği ve bu ikisi arasında herhangi bir faz oluşmadığı Cu-C faz diyagramından da teyit edilmiştir.

Kompozit malzemelerdeki çelik bileşenlere ait VSD değerleri kendi aralarında mukayese edildiğinde, aralarında çok büyük fark olmadığı görülmüştür. Ancak en sert çelik bileşene sahip malzemenin b70s30 olduğu (360 VSD), b60s40 malzemenin diğer

mekanik test sonuçlarında olduğu gibi orta değerde (350 VSD) ve en düşük çelik bileşen sertliğine sahip malzemenin b50s50 olduğu (340VSD) görülmüştür.

Kompozit malzemelerin üretimi esnasında yağlayıcı olarak yapıya katılan toz grafit, üretilen numunelerin ağırlıkça %1.5'i kadardır. Kompozit malzemenin sinterlenmesi sırasında sadece çelik bileşene difüze olan karbon, her kompozit grubunda farklı düzeyde emilmiştir. Bu fark, her bir kompozit grubunda ağılıkça farklı oranlarda çelik bileşen bulunması sebebiyle doğmuştur. Bu durum üç noktadan eğme deney numunesi için izah edilirse, her kompozit grubu için yaklaşık olarak yapıya 1.2gr toz grafit eklenmiştir. Bu miktarın yapıdaki çelik bileşene ağırlıkça oranı b50s50 malzemede %3, b60s40 malzemede %3,8, b70s30 malzemede ise %5'dir. En büyük grafit/çelik oranına sahip olan b70s30 grubundaki çelik bileşenin en sert, en küçük orana sahip b50s50 grubundaki çelik bileşenin ise nispeten daha yumuşak oluşu bu şekilde yorumlanmıştır.

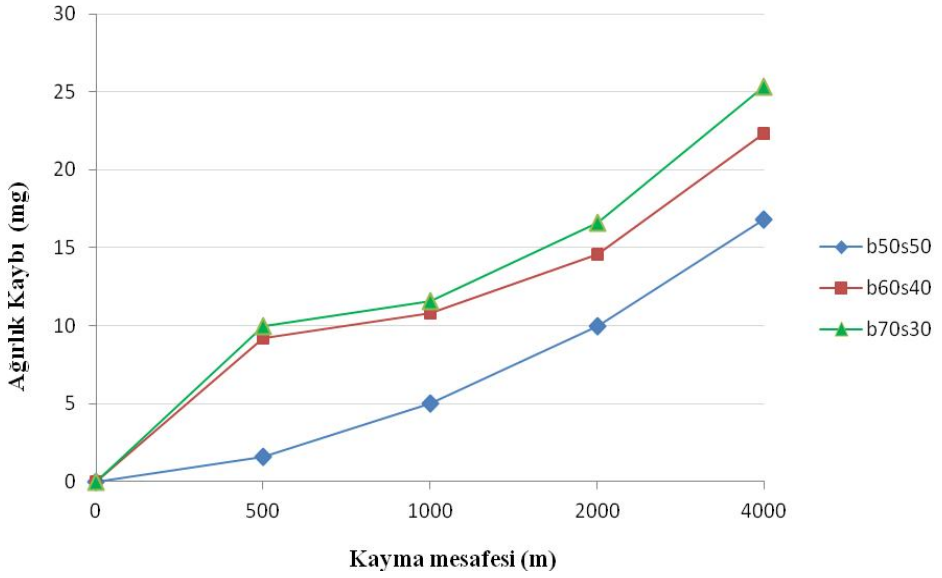
8.5. Aşınma Deneyi Sonuçları

Kuru ortamda, sabit hızda (v=0,5 m/s) yapılan bu aşınma testlerinde, hacmen %25 açık gözenek miktarına sahip ağırlıkça üç farklı oranda çelik-bronz talaşı içeren kompozit malzemelerin aşınma karakteristikleri incelenmiştir. Farklı kayma mesafeleri (500-1000-2000-4000 m) ve farklı yükler (5-10-20-40 N) altında, gerçekleşen ağırlık kayıpları ile sürtünme katsayıları grafikler yardımıyla ifade edilmiştir. Aşınma testi sonucunda aşınan yüzeyler üzerinden alınan TEM görüntüleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) analizlerinden de aşınan yüzeyin farklı noktalarından yapılan analizler yardımıyla bu noktalardaki bileşenlerin türü belirlenmiştir (Zeren 2007). Ayrıca, numunelerin aşınan yüzeyleri ile karşı aşındırıcı yüzeye (SEA1050) ait yüzey pürüzlülük değerleri (Ra), kat edilen her mesafe sonunda ölçülmüş ve bu değerler çizelge 8.1' de verilmiştir.

Çizelge 8.1 Numunelerin ve karşı diskin aşınma mesafesine göre yüzey pürüzlülük(Ra) değerleri.

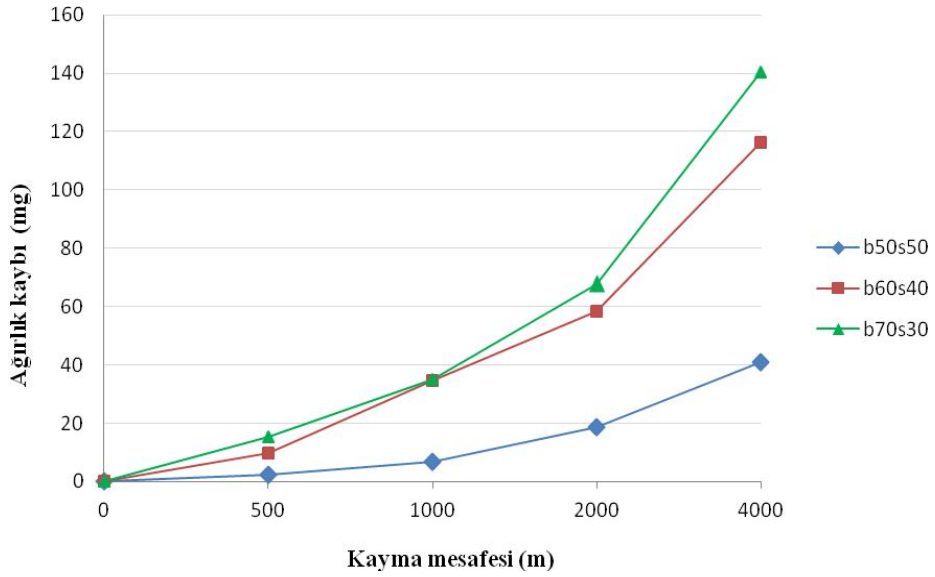
	b50s50		**b60s40**		**b70s30**	
Pürüzlülük Ra (µm)	Num.	Disk	Num.	Disk	Num.	Disk
Başlangıç	0,78	0,65	0,74	0,65	0,69	0,65
500m	2,97	1,25	2,75	0,95	2,61	1,01
1000m	3,28	1,29	2,86	1,15	2,41	1,11
2000m	3,31	1,31	2,72	1,19	2,47	1,12
4000m	3,34	1,35	3,15	1,22	2,57	1,13

Deneysel çalışmalarda, kompozit numunelerin ağırlık kayıplarının, kayma mesafesine göre değişimi, uygulanan her bir yük için Şekil 8.31, 8.32, 8.33 ve 8.34'da görülmektedir.



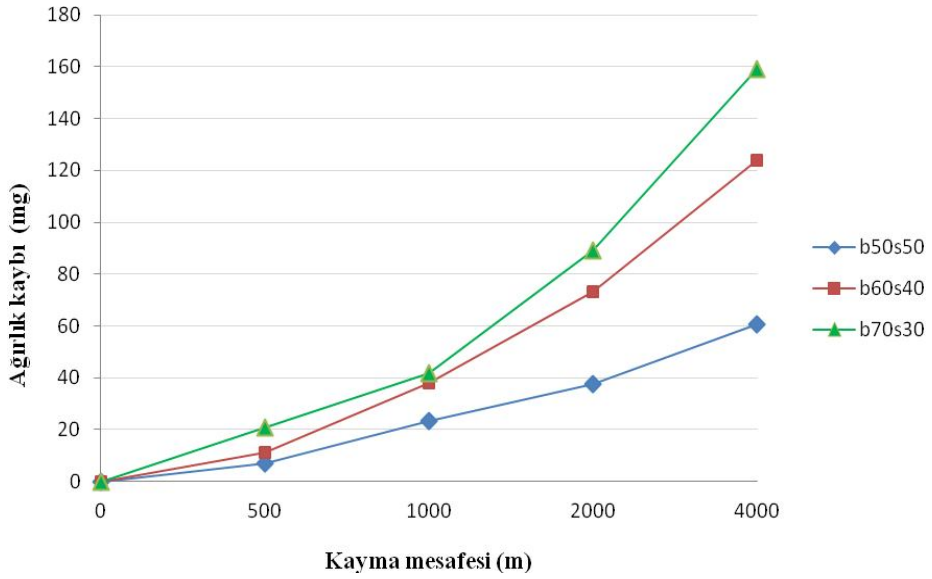
Şekil 8.31. Kompozit malzemelerin 5N yük altındaki kayma mesafesi-ağırlık kaybı grafiği.

Şekil 8.31'de 5 N yük altında en fazla ağırlık kaybının, b70s30 ve onun ardından b60s40 malzemelerinde gerçekleştiği görülmektedir. Kompozit malzemelerin yapısındaki bronz bileşen oranının artışı ile aşınmanın arttığı gözlenmiştir. 5 N yük altında, ölçüm yapılan her mesafe için, en fazla çelik bileşen içeren b50s50 malzemenin en az ağırlık kaybına uğradığı açıkça görülmüştür.



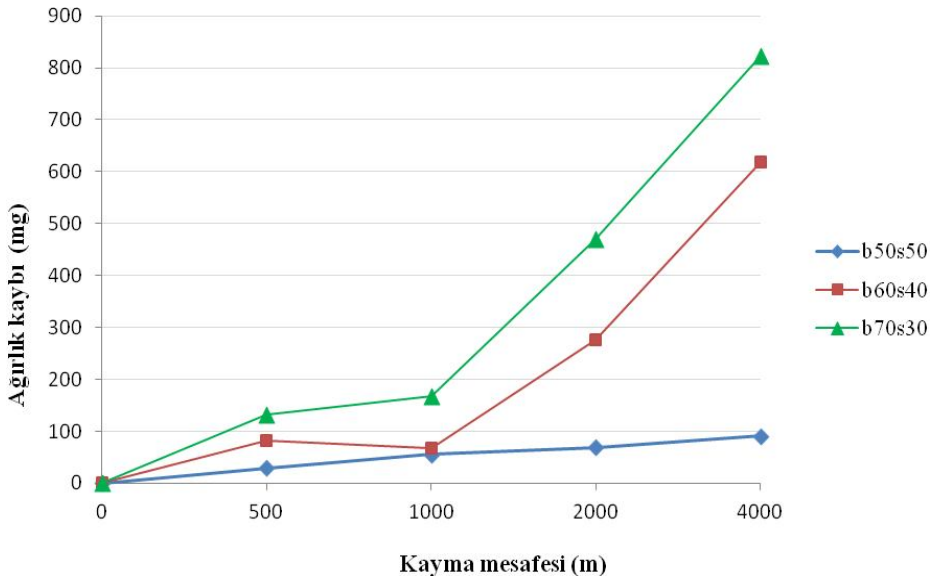
Şekil 8.32. Kompozit malzemelerin 10 N yük altındaki kayma mesafesi-ağırlık kaybı grafiği.

Şekil 8.32'de 10 N yük altında elde edilen eğride tüm kompozit malzemelerdeki ağırlık kaybının, kayma mesafesi arttığı gözlenmiştir. Ancak b70s30 ve b60s40 grubunda ise, özellikle 2000-4000 m arasında aşınmanın oldukça hızlı bir biçimde arttığı gözlenmiştir. 10 N yük altında, 4000 m sonunda en çok aşınan b70s30 grubundaki ağırlık kaybı, b50s50 grubunun aşınma miktarından 3.5, kat daha fazladır.



Şekil 8.33. Kompozit malzemelerin 20N yük altındaki kayma mesafesi-ağırlık kaybı grafiği.

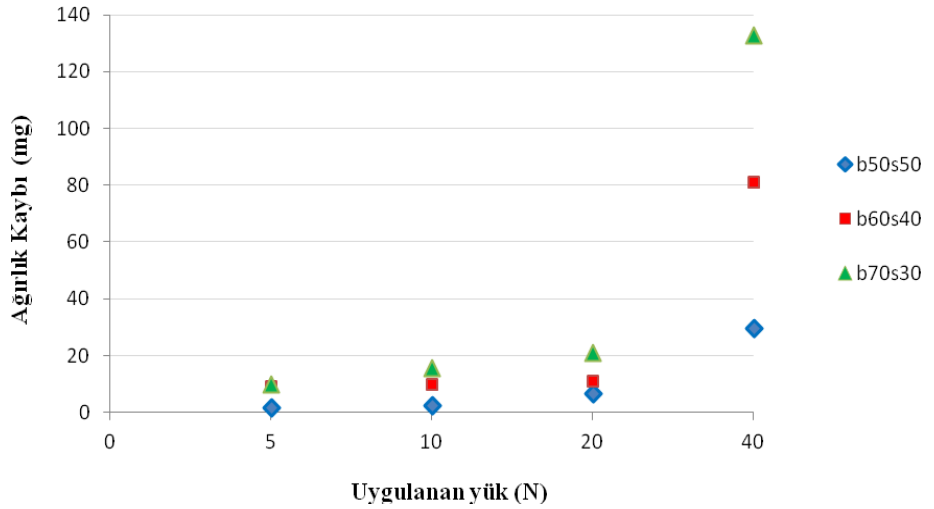
Şekil 8.33'de 20 N yük altında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sonuçlar verilmektedir. Bu deneylerde de en az çelik bileşen içeren kompozit malzeme b50s50'de en az aşınma olduğu, bu malzeme için aşınmanın kayma mesafesi ile doğrusal olarak arttığı görülmüştür. En fazla aşınma yine b70s30 grubunda, ardında b60s40 grubunda olmuştur.



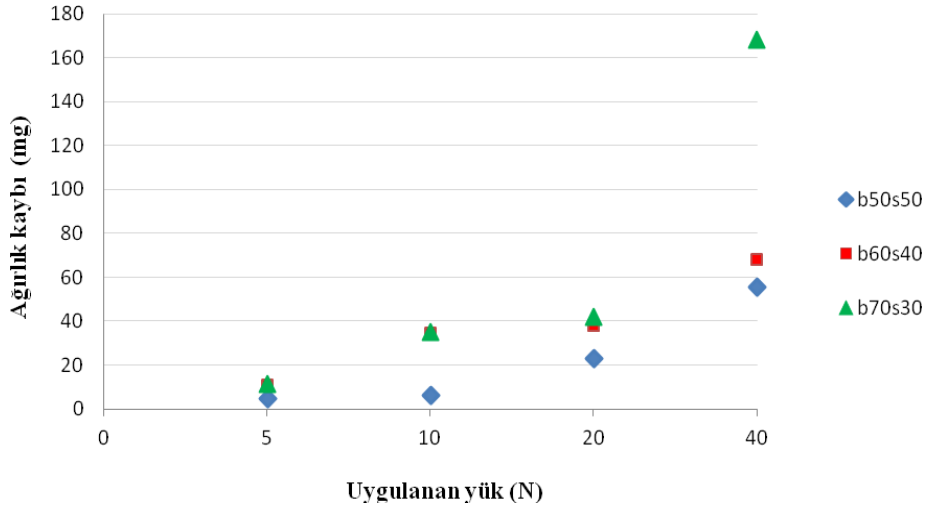
Şekil 8.34. Kompozit malzemeler ve CuSn10'un 40 N yük altındaki kayma mesafesi-ağırlık kaybı grafiği.

Şekil 8.34'da aşınma numunelerinin 40 N yük altındaki aşınma grafiği görülmektedir. Deneylerde kullanılan en büyük yük olan 40 N altında, kompozit malzemelerin sahip olduğu aşınma özelliklerindeki farklar daha belirgin bir biçimde görülmektedir. Zira bu yük altında icra edilen deney sonuçlarında en çok aşınan b70s30 grubunun ağırlık kaybı, en az aşınan b50s50 grubunun ağırlık kaybının yaklaşık olarak 8 katıdır. En çok aşınan b70s30 grubunu, diğer deneylerdeki gibi b60s40 grubu takip etmektedir. Bu iki kompozit malzemede, özellikle 1000 metreden sonra ağırlık kaybında çok hızlı bir artış görülmektedir. 40 N yük altında da b50s50 grubunun aşınma miktarının, diğer iki kompozit malzemeye oranla bir hayli az olduğu göze çarpmaktadır.

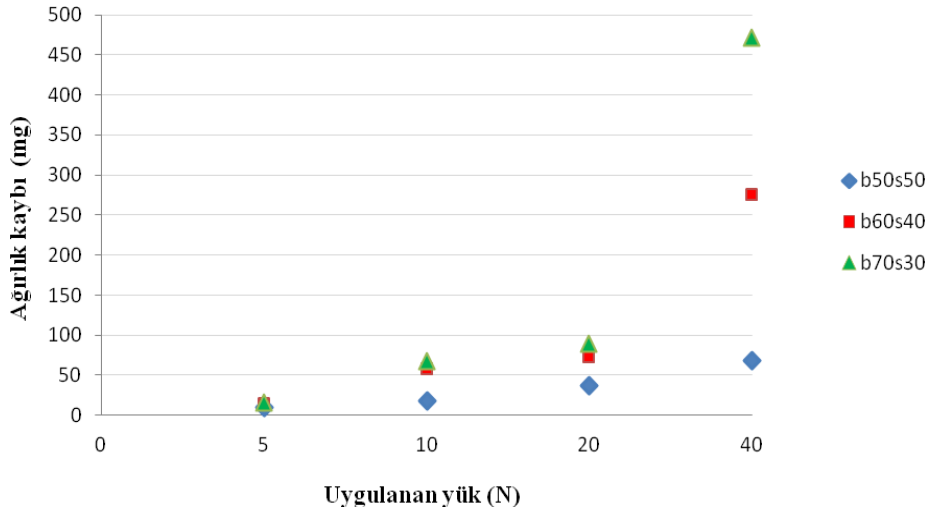
Aşınma numunelerindeki ağırlık kayıplarının, uygulanan yüke göre değişimi, numunelerin kat ettiği her bir kayma mesafesi için ayrı ayrı incelenmiş, aynı kayma mesafelerinde yükteki artışın aşınmaya etkisi grafik olarak ifade edilmiştir. Bu veriler şekil 8.35, 36, 37 ve 38'te görülmektedir.



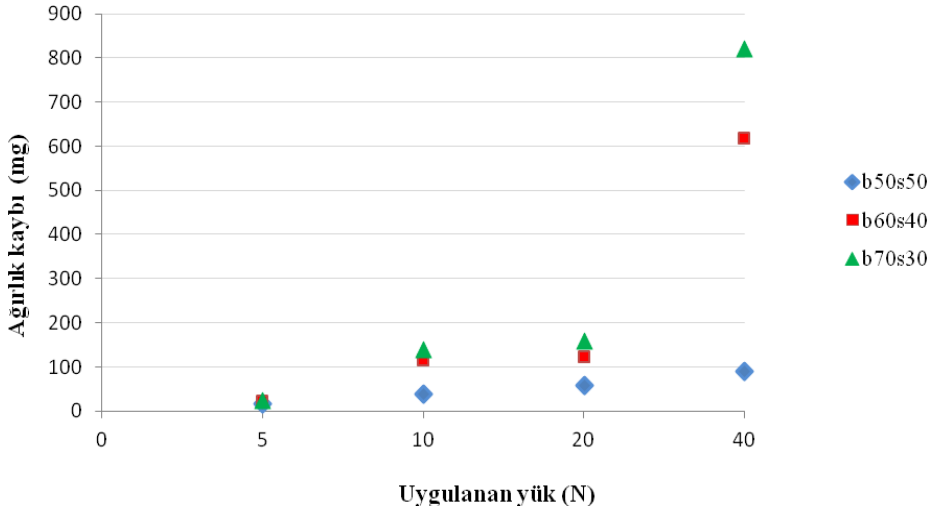
Şekil 8.35. Kompozit malzemelerin farklı yükler altında 500 m sonundaki ağırlık kaybı grafiği.



Şekil 8.36. Kompozit malzemelerin farklı yükler altında 1000 m sonundaki ağırlık kaybı grafiği.



Şekil 8.37. Kompozit malzemelerin farklı yükler altında 2000 m sonundaki ağırlık kaybı grafiği.



Şekil 8.38. Kompozit malzemelerin farklı yükler altında 4000m sonundaki ağırlık kaybı grafiği.

Şekil 8.35, 36, 37 ve 38'deki veriler birlikte değerlendirildiğinde, belirgin bir biçimde göze çarpan husus, 5, 10 ve 20 N yük altında tüm numunelerin birbirlerine yakın aşınma performansı sergilerken, uygulanan en büyük kuvvet olan 40 N'da özellikle b70s30'un ve ardından b60s40'ın çok hızlı bir biçimde aşındığıdır.

Dört faklı yük ve kayma mesafesinde icra edilen aşınma deneylerinde b50s50'nin ağırlık kaybı değerlerinin en az olduğu gözlenmiştir.

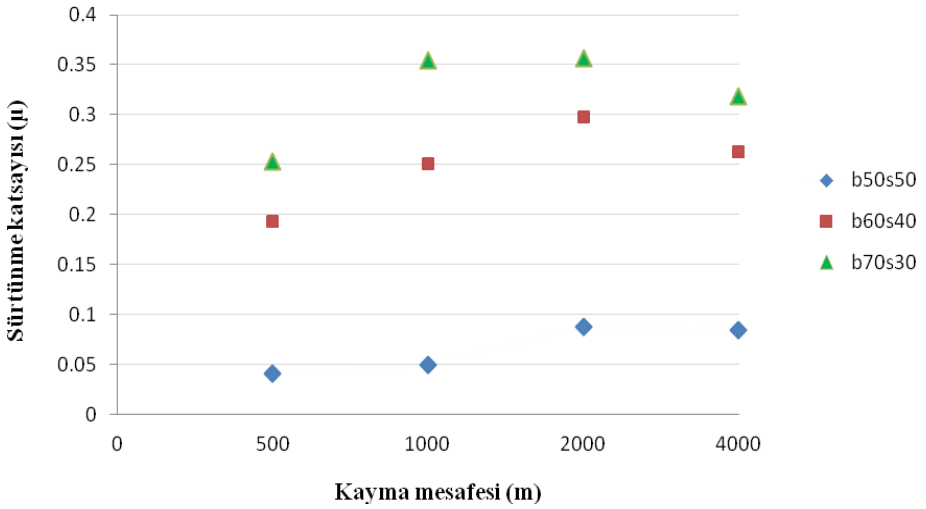
Kompozit malzemelerdeki yumuşak bileşen olan bronz bileşen oranının artışı ile ağırlık kaybının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, bronz bileşenden yaklaşık olarak dört kat daha sert olan çelik partiküllerin, aşınmaya daha dirençli olması ve daha yumuşak bronz bileşenin nispeten artan yük ve mesafenin artışıyla hızlı bir biçimde aşınıp ana yapıdan ayrılması olarak açıklanabilmiştir.

Bronz matrisin, çelikten çok daha yumuşak olması bu bileşenin ve dolayısıyla bronzca en zengin malzeme b70s30'un, b50s50'ye oranla daha hızlı bir biçimde aşınmasına sebep olmaktadır.

Farklı oranda üretilen kompozit malzemelerin sergiledikleri farklı aşınma davranışları, bu bileşenlerin yapı içerisinde birbirlerine oranlarındaki değişimleri ile açıklanabilir. Bunun yanı sıra kompozit malzemelerin yapısındaki gözeneklerin, bu kuru sürtünme ortamında, numunelerin aşınma dirençlerini oldukça zayıflattığı ve temas alanını azaltarak, birim alana düşen yükün varsayılandan daha büyük değerlere ulaşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Kompozit malzemede matrisi olan bronz bileşenin yer yer bu gözenekler tarafından kuşatılması, onun sanki çok daha yumuşak ve dolayısıyla aşınmaya daha hassas bir malzeme gibi davranmasına sebep olmaktadır. Bu da özellikle yüksek oranda bronz bileşen içeren b70s30 ve b60s40 grubunun, sert çelik bileşence zengin b50s50 grubuna nazaran neden daha hızlı aşındığını açıklamaktadır.

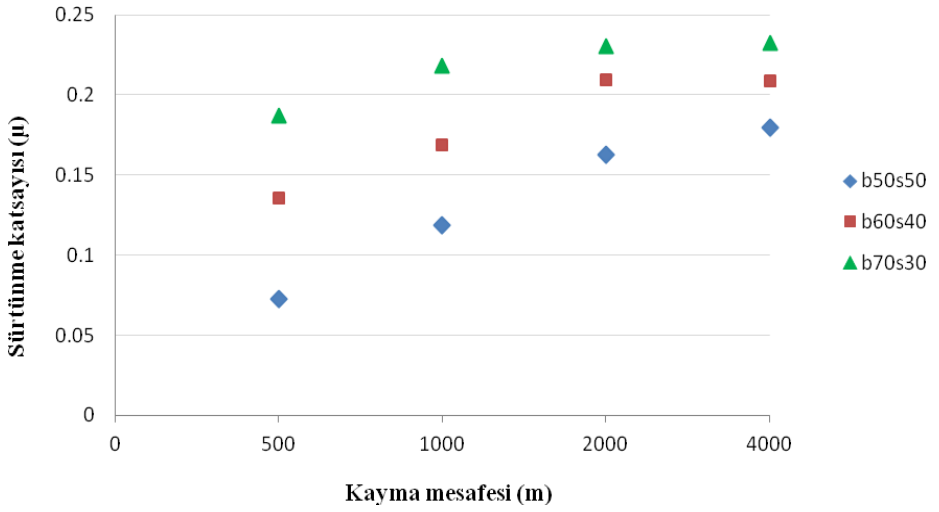
İncelenen TEM görüntülerinde özellikle b70s30 malzemenin aşınma yüzeylerinde b50s50'ye nispeten daha derin aşınma çiziklerinin oluştuğu, fazla miktarda bronz bulunmasından dolayı, yapıda bulunan gözeneklerin bu bileşence sıvanıp kapandığı gözlenmiştir. b50s50 yüzeyinde ise 4000 m kayma mesafesi sonunda yüzey üzerinde çoğunlukla çelik tepecikler ve bronzun aşınıp terk ettiği derin olmayan aşınma çizikleri gözlenmiştir. Bu görüntüler eşliğinde yapılan incelemelere "8.5.1. Aşınma yüzeylerinin incelenmesi" başlığı altında detaylı bir biçimde yer verilmiştir.

Aşınma deneylerinde elde edilen bir diğer sonuç belirtilen mesafelerde malzeme çiftleri arasındaki sürtünme katsayısıdır. Kompozit malzemelerin karşı yüzey SAE 1050 çeliği ile aralarındaki sürtünme katsayısı değerleri anlık olarak tespit edilmiş ve kat edilen mesafelere göre değişimi grafik olarak ifade edilmiştir. Uygulanan her yük için elde edilen bu değerler şekil 8.39, 40, 41 ve 42'de görülmektedir.



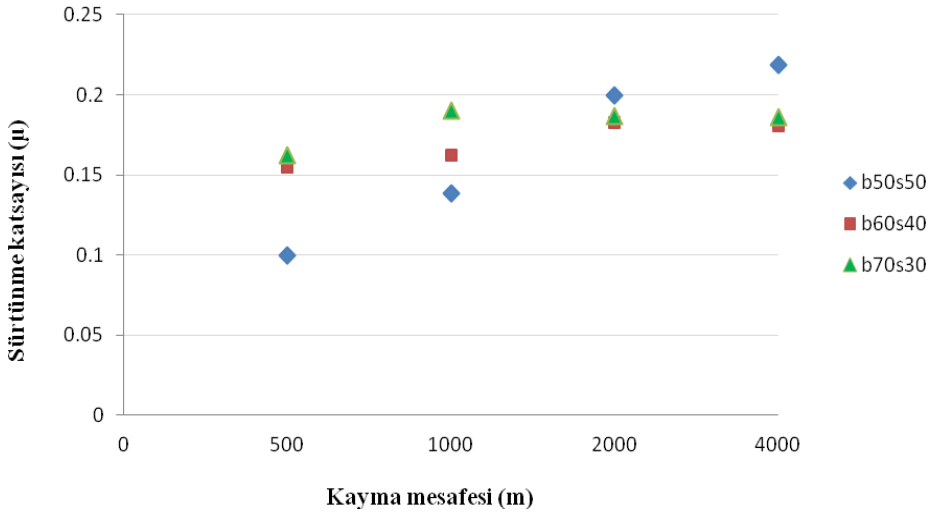
Şekil 8.39. Kompozit malzemelerin 5 N yük altında kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 8.39'da 5N yük altında, sürtünme katsayısının, kayma mesafesine göre değişimi görülmektedir. Testlerde uygulanan bu en hafif yükte, yüksek oranda bronz bileşen içeren kompozit malzemelerdeki sürtünme katsayılarının en az bronz bileşen içeren b50s50'ye kıyasla yüksek olduğu görülmüştür. b50s50'nin sürtünme katsayısı 2000 metreden sonra değişmezken, b70s30 ve b60s40 gruplarına ait numunelerin sürtünme katsayılarında bu mesafeden sonra bir miktar azalma gözlenmiştir.



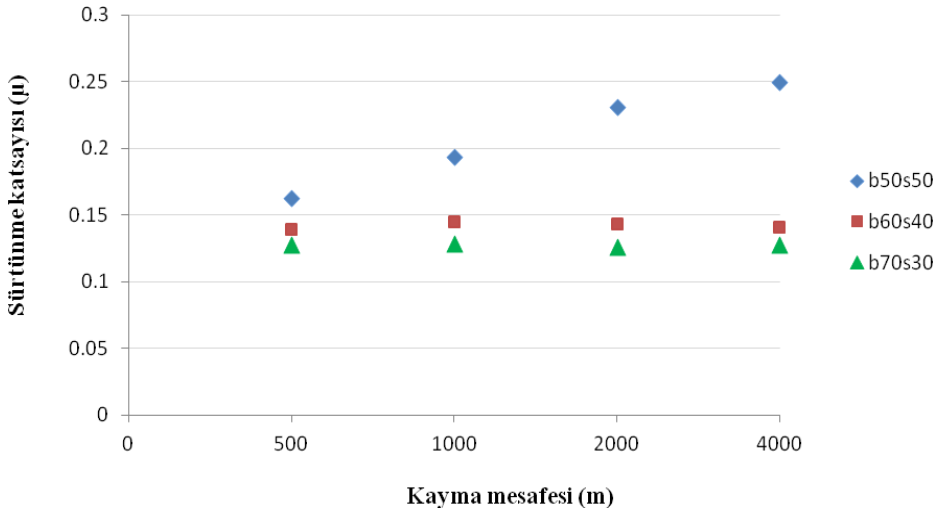
Şekil 8.40. Kompozit malzemelerin 10 N yük altında kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 8.40'de 10 N yükte, tüm kompozit numunelere ait sürtünme katsayılarının, kayma mesafesindeki artışla sürekli yükseldiği görülmüştür. Ancak 10N yük altında b50s50'nin sahip olduğu sürtünme katsayısı değerleri diğer iki kompozit grubuna kıyasla daha düşük olmakla birlikte, 5 N yük altında elde edilen verilerle kıyaslandığında bu malzemeye ait değerlerin diğer iki kompozit malzeme grubunun sahip olduğu değerlere yaklaştığı göze çarpmaktadır. 2000 m sonra b70s30 ve b60s40'ın sürtünme katsayılarında ciddi bir artış olmazken, bu mesafeden sonra b50s50'nin sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir. Ayrıca grafikten artan kayma mesafeleri ile malzemelerin sürtünme katsayıları arasındaki farkın azaldığı görülmektedir.



Şekil 8.41. Kompozit malzemelerin 20 N yük altında kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği.

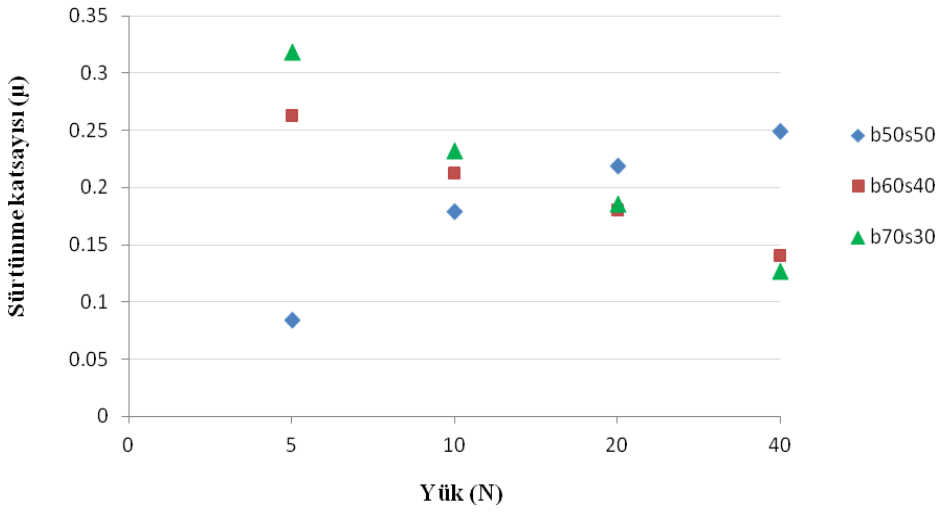
Şekil 8.41'de 20 N yükte, 1000 m sonra, b70s30 ve b60s40'ın sürtünme katsayılarında artış olmamıştır. Ancak, tüm bu malzemelerin aksine başlangıçta diğer malzemelerden daha az sürtünme katsayısına sahip olan b50s50'ye ait değerlerin, artan kayma mesafesiyle (1000-2000 m arasında) birlikte kararlı bir biçimde artmaya devam ettiği 4000 metreden sonra da en yüksek değer olduğu görülmektedir. b50s50'nin ilk defa 20 N yük altındaki testler sırasında diğer iki kompozit malzemeden daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8.42. Kompozit malzemelerin 40 N yük altında kayma mesafesi-sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 8.42'de 40N yük altında numunelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesi ile değişimi görülmektedir. Grafikte göze çarpan ilk husus, b50s50 malzemenin diğerlerinden farklı olarak, kat edilen kayma mesafesi ile birlikte sürtünme kuvvetinin artmasıdır. Bu yük altında kompozit malzemeler içerisinde en büyük bronz bileşen oranına sahip b70s30 malzemenin en az sürtünme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. b50s50 haricinde diğer iki kompozit malzemelerin sürtünme katsayılarının kayma mesafesi ile değişmediği gözlenmiştir.

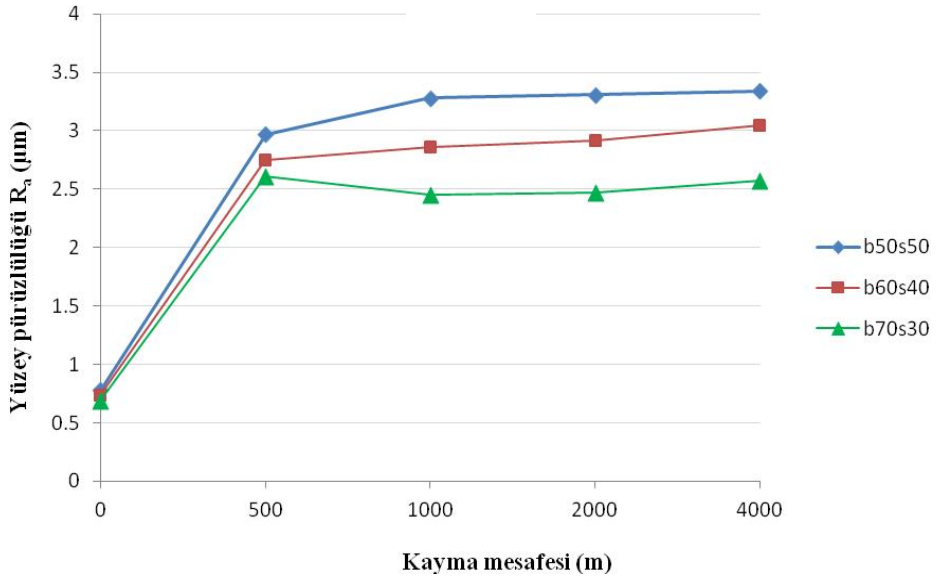
Aşınma testinde kat edilen maksimum kayma mesafesi olan 4000 metredeki sürtünme katsayılarının, uygulanan yüke göre değişimi şekil 8.43'de görülmektedir. Bu grafikle aynı kayma mesafesinde, numunelere uygulanan kuvvetteki değişiminin sürtünme katsayılarına nasıl etki ettiği gösterilmiştir.



Şekil 8.43. Kompozit malzemelerin 4000 m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı-yük grafiği.

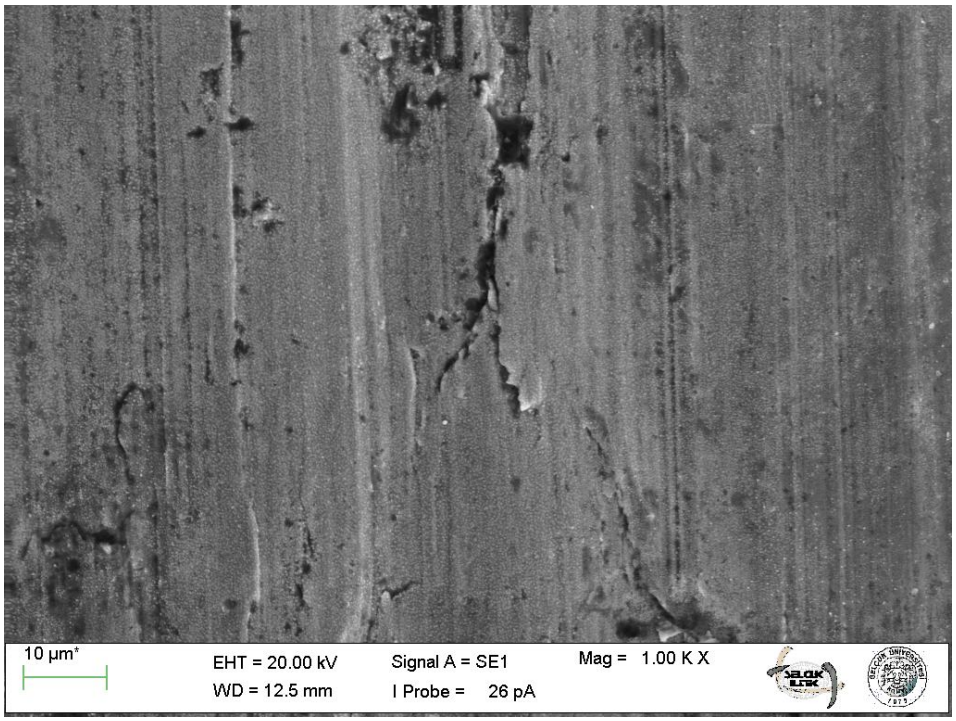
Şekil 8.43'de aşınma numunelerine uygulanan yükteki artış ile b70s30 ve b60s40 malzemelerinin sürtünme katsayılarının azaldığı görülmektedir. Ancak en çok çelik bileşen içeren b50s50'nin sürtünme katsayısının, diğer numunelerin aksine, artan yük miktarı ile arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi, sert çelik bileşenin hacmen en fazla b50s50'de bulunması ile izah edilebilmiştir. Özellikle yükteki artış ile yapıdaki çelik bileşenin karşı aşındırıcı çelik disk yüzeyini çizmesi ve onun yüzey pürüzlülüğünü artırması (Şekil 8.48), bu iki eş çalışan yüzey arasında nispeten daha yüksek sürtünme katsayılarının oluşmasına sebep olmaktadır.

Aşınma deneylerinde, aşınan yüzeylerin ve diskin her kat edilen mesafede, sahip oldukları yüzey pürüzlülük değerleri grafik olarak şekil 8.44 ve 8.47'de verilmiştir.

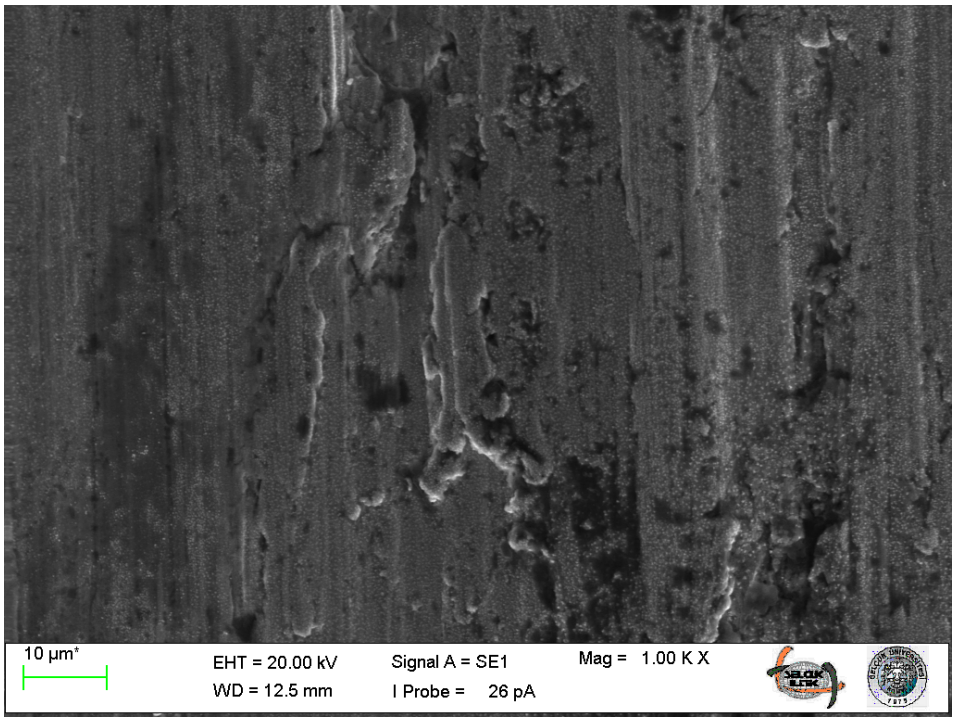


Şekil 8.44. Kompozit malzemelerin 40 N'daki kayma mesafesine göre yüzey pürüzlülük değerleri.

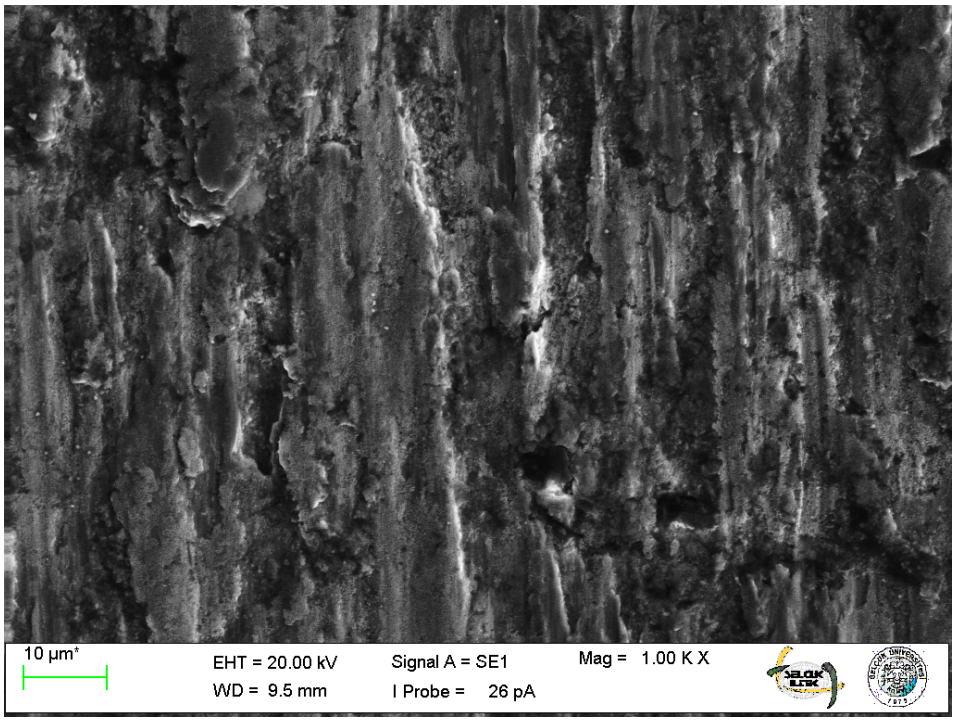
Şekil 8.44'de 500 m içerisinde alıştırma dönemi (rodaj) tamamlanmış, sonrasında tüm numuneler nispeten daha kararlı yüzey pürüzlülük değerlerine erişmişlerdir. Kompozit numuneler kendi aralarında kıyaslandıklarında yapısında en çok çelik bileşen içeren b50s50'nin en pürüzlü yüzeye sahip olduğu, kompozit malzemelerin yapılarındaki çelik bileşen miktarındaki artışa paralel olarak yüzey pürüzlülüğün de arttığı gözlenmiştir. Bu durum, içerisinde hacmen en az oranda bronz bileşen bulunan b50s50 malzemede bu bileşenin aşınarak ana yapıdan uzaklaşmasıyla geride sert çelik bileşence zengin bir yüzey bırakması olarak yorumlanmıştır. Bronz bileşenin en fazla olduğu b70s30'da ise bu yumuşak fazın deney sırasında aşınma yüzeyine sıvanıp, yapıda bulunan gözenekleri kısmen kapattığı düşünülmektedir. Zira TEM'den alınan aşınma yüzeyine ait mikroyapı görüntüleri de bu iddiayı teyit etmektedir. Esasen hacmen aynı oranda gözenek içeren b70s30 ve b50s50 numunelerin aşınma yüzeylerine ait görüntüler karşılaştırıldığında b50s50 malzemeye ait aşınma yüzeyinin daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir (Şekil 8.45, 46 ve 47).



Şekil 8.45. Kompozit b70s30 malzemenin 40 N yük altında ve 4000 m sonundaki aşınma yüzey morfolojisi (TEM-1000X).

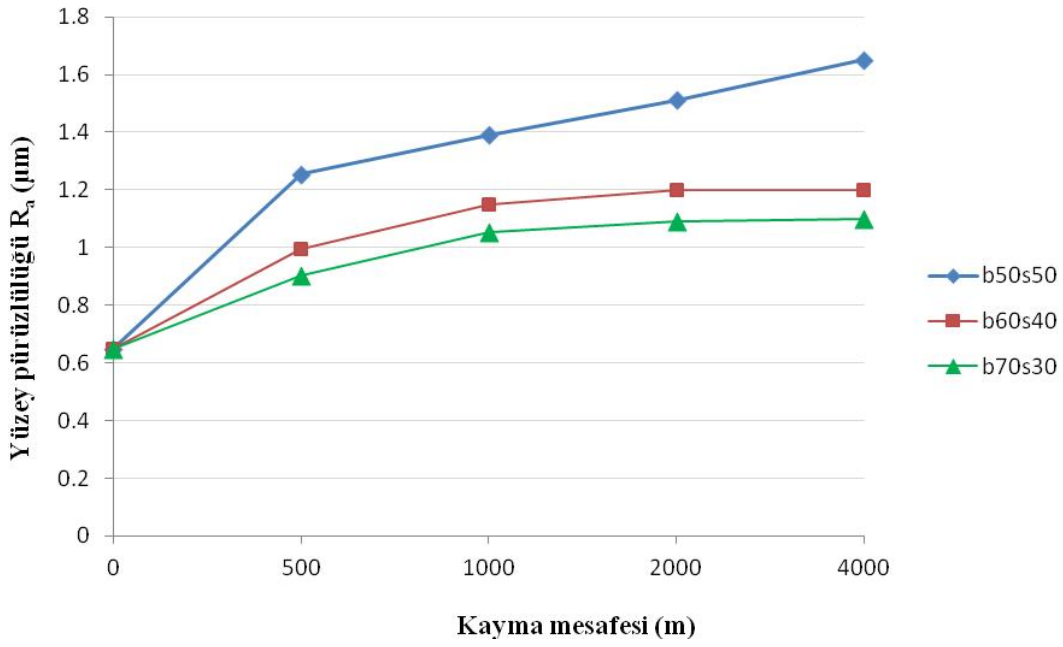


Şekil 8.46. Kompozit b60s40 malzemenin 40 N yük altında ve 4000 m sonundaki aşınma yüzey morfolojisi (TEM-1000X).



Şekil 8.47. Kompozit b50s50 malzemenin 40 N yük altında ve 4000 m sonundaki aşınma yüzey morfolojisi (TEM-1000X).

Test numunelerindeki aşınma miktarı ve yüzey pürüzlülükleri kadar karşı aşındırıcı diskteki aşınma miktarı ve yüzey pürüzlülük değeri de kompozit malzemelerin aşındırıcılığının incelenmesi adına bir diğer önemli husustur. Şekil 8.48'de aşındırıcı diskin yüzeyinde, kompozit malzemeler ile eş çalışması sonucu oluşan pürüzlülük değerlerinin kayma mesafesiyle değişimi görülmektedir.



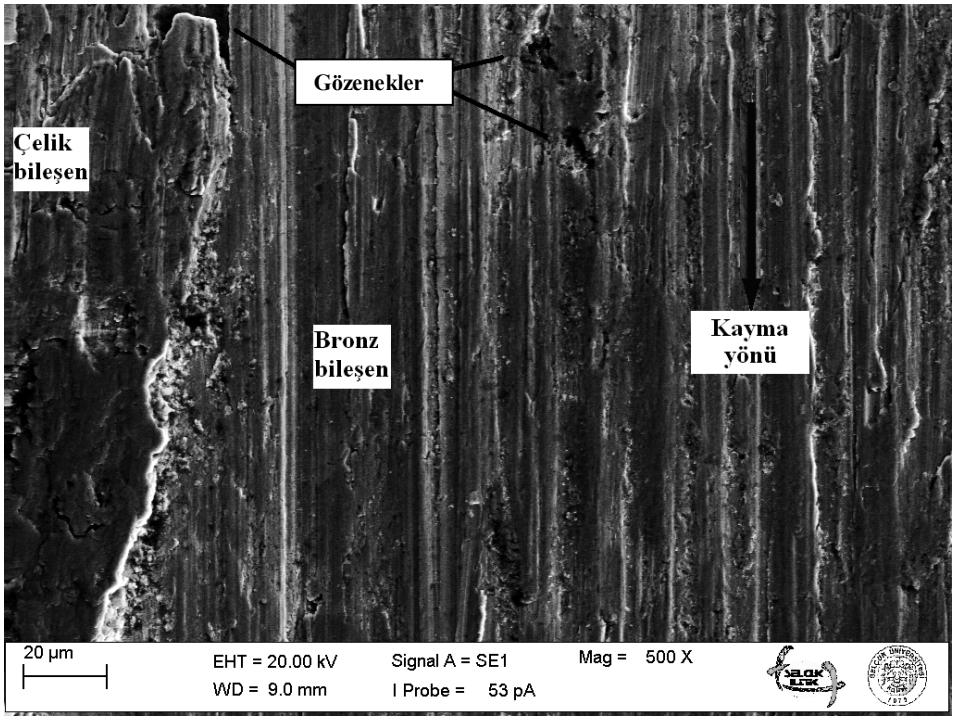
Şekil 8.48. SAE 1050 aşındırıcı disk yüzeyin pürüzlülük değerinin kayma mesafesiyle değişimi (40N yük altında).

Kuru ortamda yapılan bu deneylerde, bütün aşınma numunelerinin kayma mesafesinin artışı ile karşı disk SAE 1050 yüzeyinin pürüzlülüğünü artırdığı söylenebilir. Bu karşı diskin homojen olarak aşınmadığını göstermektedir. İlk ölçümün yapıldığı 500. metrede disk pürüzlülük değerinde tüm numuneler için hızlı bir artışın olduğu söylenebilir. Ancak, kayma mesafesiyle artan tüm bu değerler arasında disk pürüzlülük değerini en az artıran numune b70s30 olmuştur. Disk yüzeyini en çok aşındıran malzemenin çelik bileşence en zengin olan b50s50 olduğu görülmektedir. 4000 m kayma mesafesi tamamlanınca son bulan deneylerde, kayma mesafesinin artırılması durumunda muhtemelen b50s50 malzeme diskin yüzeyini artan bir biçimde daha derin bir şekilde çizmeye devam edecektir. Bu kompozitin en çok aşındıran malzeme olmasında ana unsurun yapısında bulunan çelik bileşence en zengin malzeme olması söylenebilir.

Kompozit malzemeler arasında karşı yüzeyi en az aşındıran malzeme ise en az çelik bileşen ihtiva eden b70s30'dur. b70s30 ve b60s40 numunelerinin, özellikle 2000. metreden sonra karşı disk yüzey pürüzlülüğünü artırmadığı göze çarpan bir diğer önemli husustur.

8.5.1. Aşınan yüzeylerin mikro yapısı

Aşınan numunelerin yüzey görüntüleri TEM cihazı vasıtasıyla elde edilmiştir. Bu görüntüler ışığında, aşınma numunelerinin ne tür ve hangi boyutlarda aşınmalara maruz kaldıkları incelenmiştir. Kompozit malzemelerin aşınma yüzeyleri ve bu yüzeylerde kayma yönünde oluşan aşınma çizikleri Şekil 8.49, 50 ve 55'de görülmektedir.

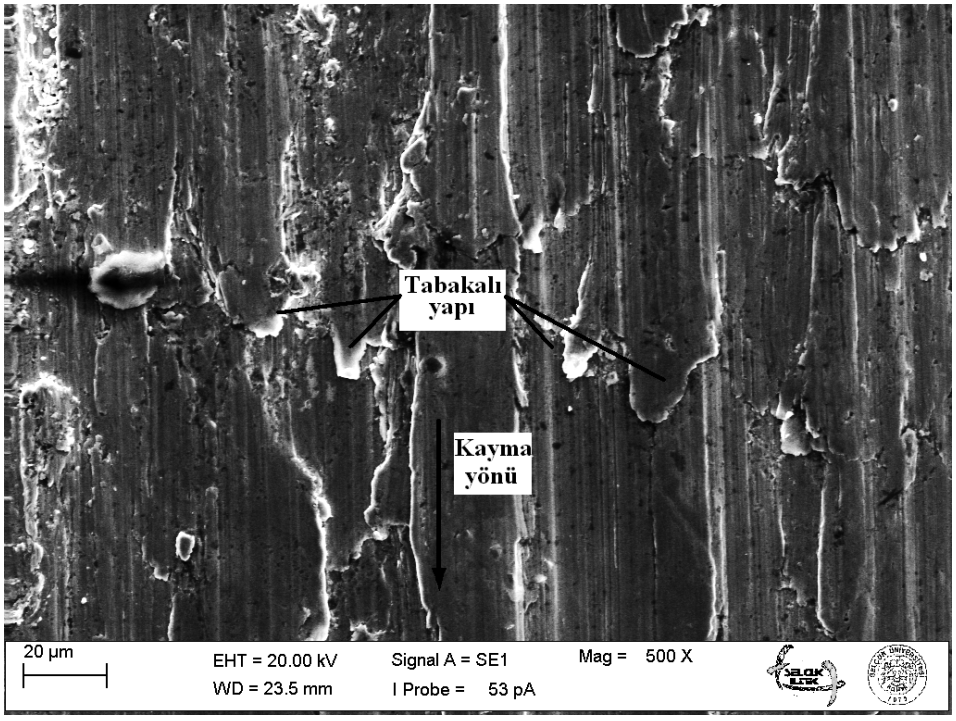


Şekil 8.49. b50s50 numunesinin 40 N yük ve 4000 m kayma mesafesi sonunda alınan aşınma yüzeyi görüntüsü (TEM-500X).

Kompozit malzemeler ile SAE 1050 aşındırıcı diskin sertlik değerleri arasında oldukça büyük fark bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin yüzey sertlik değerleri 40-45BSD'dir. Karşı aşındırıcı yüzeyin sertlik değeri ise yaklaşık 460BSD'dir. Eş çalışan yüzeylerin sertlik değerleri arasındaki büyük fark yumuşak malzeme yüzeyinde ikili abrasif aşınmaya sebep olmaktadır (Hutchings, 1996). Yüzey görüntülerinde, sert disk yüzeyinin, kompozit malzeme yüzeylerinden, basınç altında parça kopardığı ve çizdiği tespit edilmiştir, bu sebeple kompozit malzeme yüzeylerinde abrasif aşınmanın baskın olduğu düşünülmektedir.

Kompozit malzemelerden b50s50'nin aşınma yüzeyi incelendiğinde, sürtünme doğrultusunda bariz aşınma çizikleri göze çarpmaktadır. Bu çiziklerin, bazı lokal bölgelerde derinleşirken, bazı bölgelerde ise belirsizleştiği görülmektedir. Bunun, kompozit malzeme içerisindeki bileşenlerin farklı sertliklere sahip olmalarından kaynaklandığı, bronz bölgelerde aşınma izleri derinleşirken, çelik bölgeler üzerinde ise bu derinliğin azaldığı düşünülmektedir. b50s50'nin aşınan yüzeyinde çiziklerin yanı sıra, boşluklar da göze çarpmaktadır (Şekil 8.49).

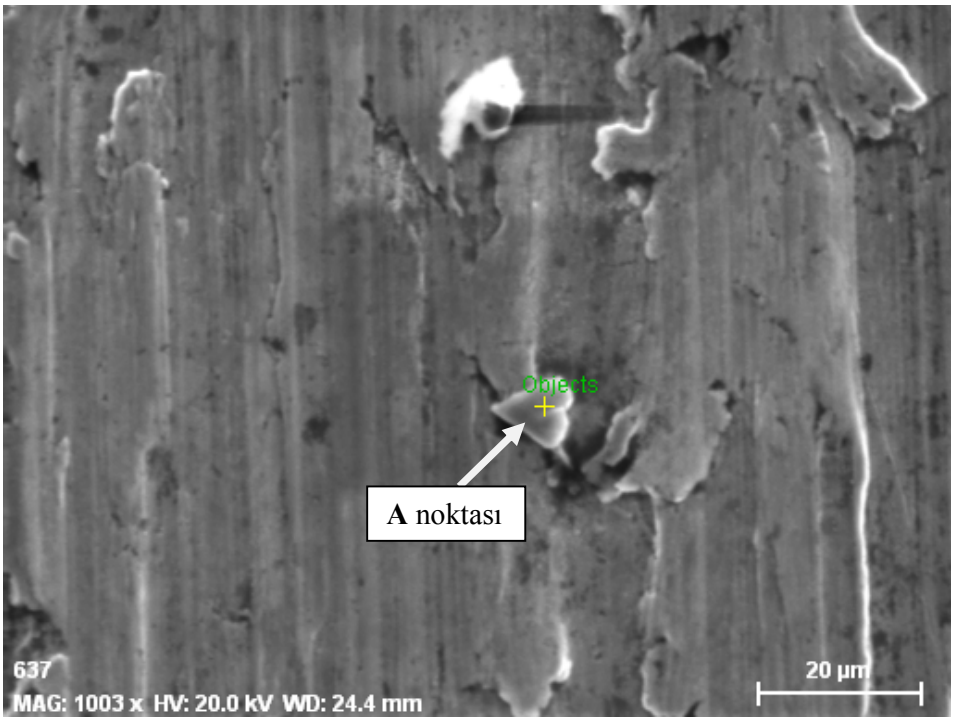
b60s40'ın aşınma yüzeyinde de b50s50'dekine benzer aşınma çizikleri görülmektedir (Şekil 8.50). Ancak, b50s50'den farklı olarak bu malzeme yüzeyinde yer yer tabakalı yapılar göze çarpmaktadır.



Şekil 8.50. b60s40 numunesinin 40 N yük ve 4000 m kayma mesafesi sonunda alınan aşınma yüzeyi görüntüsü (TEM-500X).

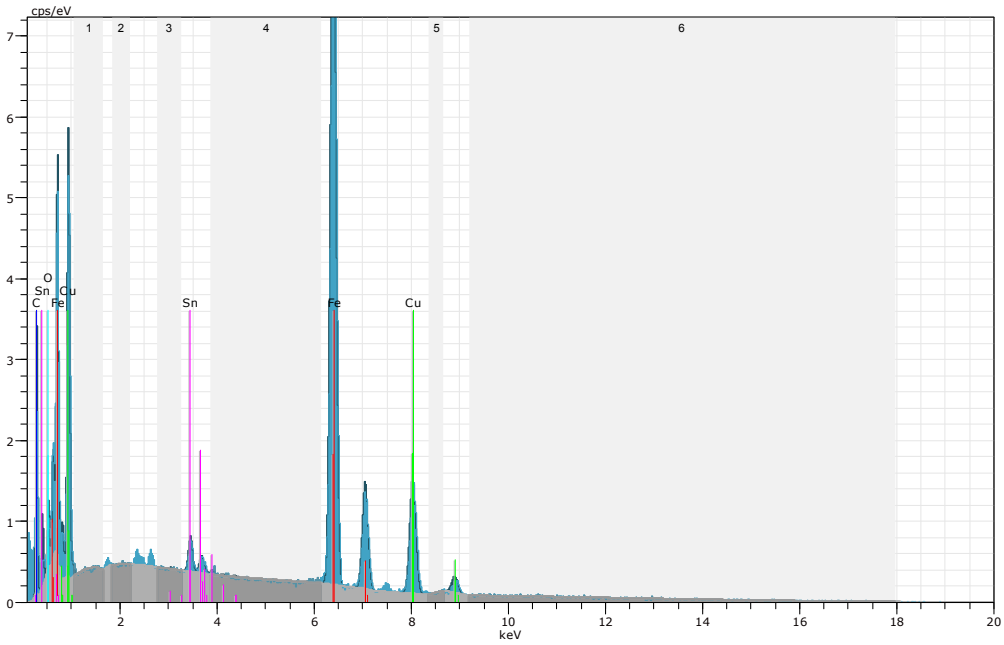
Bu yapıların, aşınma yüzeylerinin izafi hareketiyle, bronzun ana yapıdan ayrılması (plastic flow) ve geride kalan sert çelik bileşenin, yüzeyde bu şekilde yüksek adacıklar-tabakalar meydana getirmesi olarak yorumlanmıştır. Sözü edilen tabakalı yapılar üzerinde, özellikle uzun kayma mesafelerinde, yüksek kayma gerilmelerinin oluştuğu ve böylece bu tabakaların daha sonra yapıdan koparak ayrıldığı düşünülmektedir. Çalışmanın sonraki aşamalarında yapılan Enerji Dağılımlı X-Işını

Spektroskopisi (EDX) analizlerinde de b60s40'daki bu tabakaların Fe, C ve O elementleri bakımından oldukça zengin bölgeler olduğu tespit edilmiştir (Şekil 8.51-52).



Şekil 8.51. b60s40 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan tabaka üzerinden EDX analizi için seçilen A noktası.

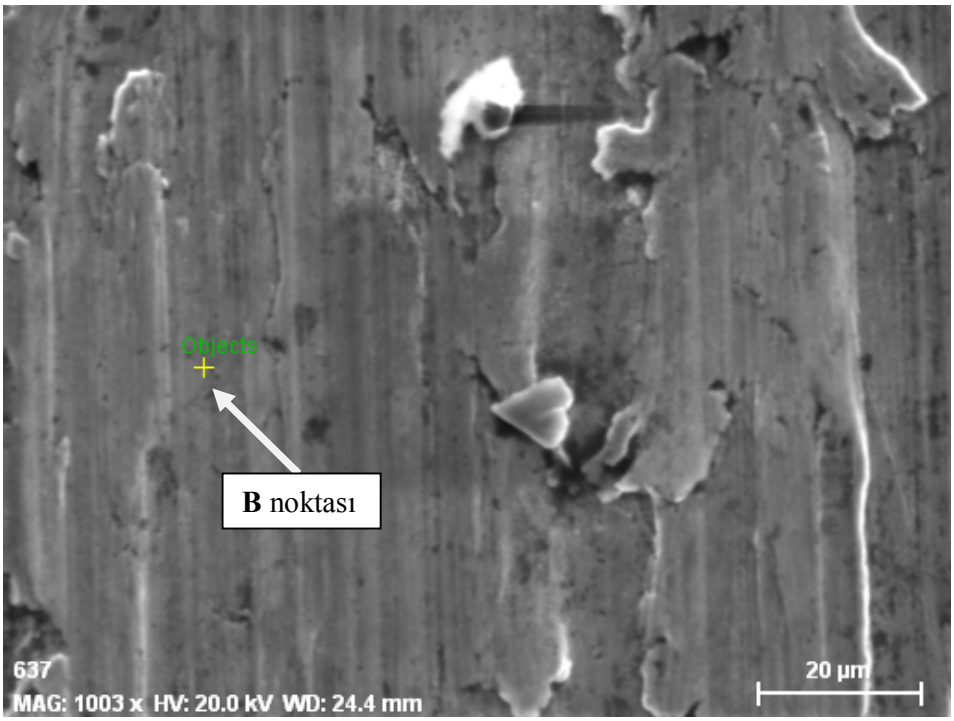
Şekil 8.51'de b60s40'ın aşınma yüzeyindeki tabakalanmış yapı üzerinde, EDX analizi için seçilmiş nokta görülmektedir. Bu noktaya ait analiz sonuçlarında tespit edilen elementler Fe, C ve O'nin ve bunların şekil 8.52'de gösterilen yüzde oranları, bu tabakanın, çelik bileşene ait olduğunu doğrulamaktadır.



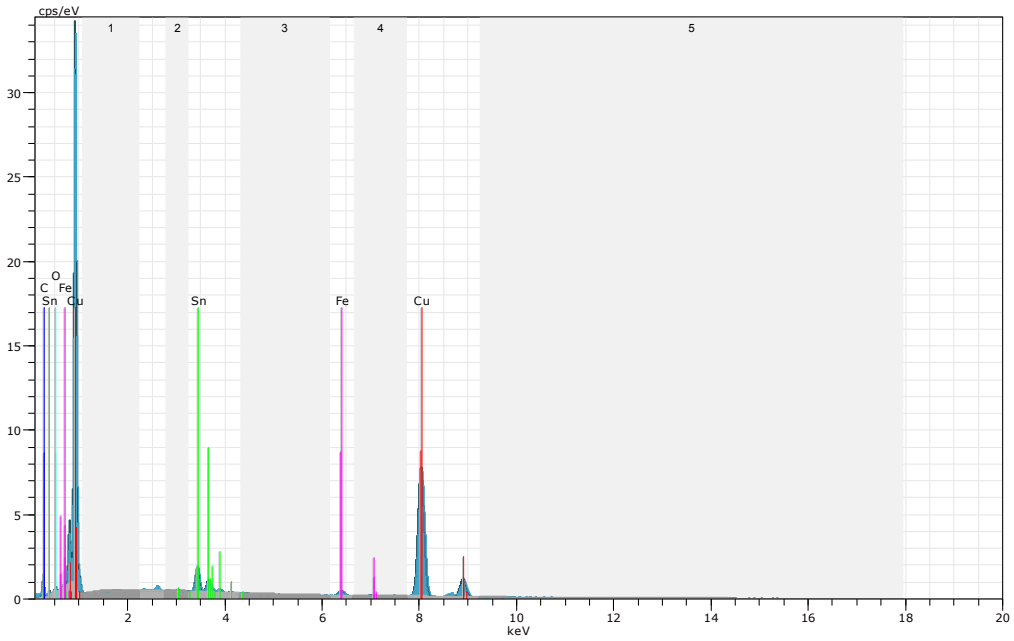
Element	Dağılım [% ağ.]	Atom sayısı [% at.]
Demir (Fe)	71,31	49,30
Karbon (C)	9,90	31,83
Bakır (Cu)	11,35	6,90
Oksijen (O)	4,23	10,20
Kalay (Sn)	1,75	0,57
Total:	100,00	100,00

Şekil 8.52. b60s40 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan tabaka üzerindeki **A** noktasına ait EDX analiz sonuçları.

Şekil 8.53'de aynı yüzeyde aşınma çiziklerinin daha bariz biçimde görülebildiği diğer bir noktada görülmektedir. Bu noktada yapılan EDX analizi sonuçları şekil 8.54'de görülmektedir. Oluşan tabakaların hemen yanından alınan bu sonuçlarda ise, bir önceki analizden farklı olarak Cu ve Sn yüzde oranının oldukça yüksek olduğu, görülmüştür. Bu sonuçtan, analiz yapılan noktanın bronz bölgeye ait olduğu anlaşılmıştır.



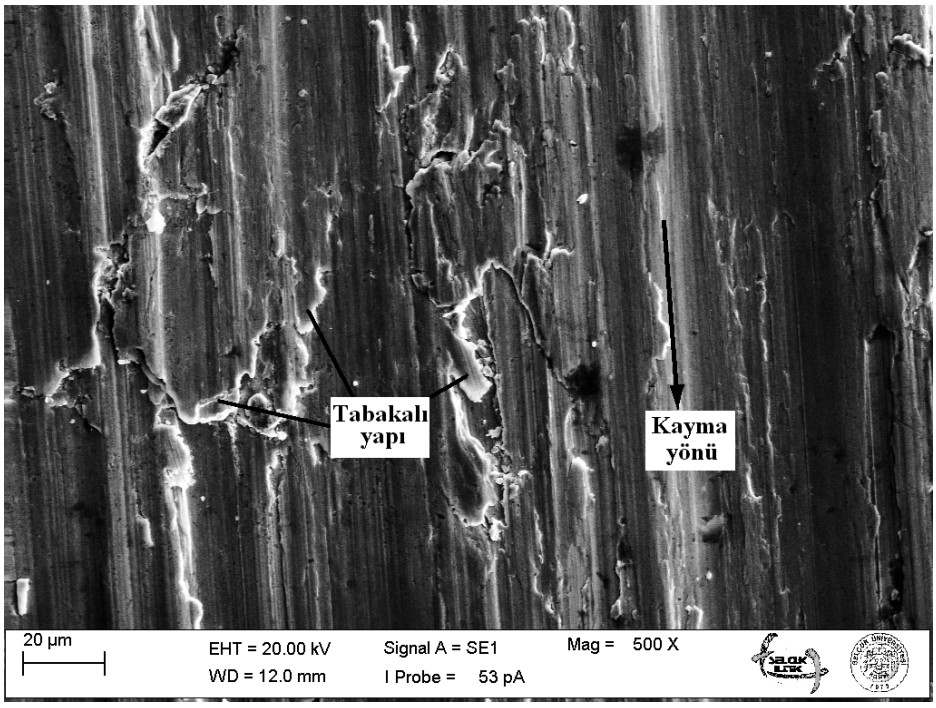
Şekil 8.53. b60s40 numunesinin yüzeyindeki aşınıp çukurlaşan bölge üzerinden EDX analizi için seçilen **B** noktası.



Element	Dağılım [% ağ.]	Atom sayısı [% at.]
Demir (Fe)	1,50	1,42
Karbon (C)	4,32	19,08
Bakır (Cu)	84,14	70,23
Oksijen (O)	1,67	5,53
Kalay (Sn)	8,38	3,74
Total	100,00	100,00

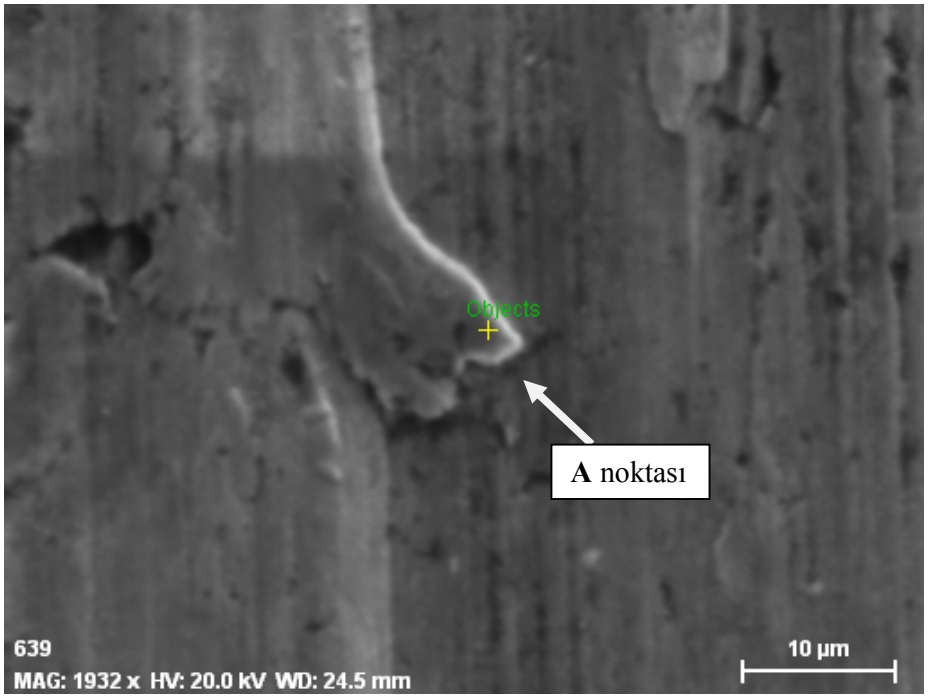
Şekil 8.54 b60s40 numunesinin yüzeyindeki aşınıp çukurlaşan bölgeden seçilen B noktasına ait EDX analiz sonuçları.

Kompozit malzemeler içerisinde en çok bronz bileşene sahip b70s30'un aşınma yüzeyi, b60s40'ın aşınma yüzeyine benzemektedir. Burada da tabakalı yapı görülmektedir. Ancak buradaki aşınma izlerinin nispeten daha derin olduğu ve boşlukların hemen hemen tamamının bronz tarafından, yüzeylerin izafi hareketi ile sıvanarak doldurulduğu düşünülmektedir (Şekil 8.55).

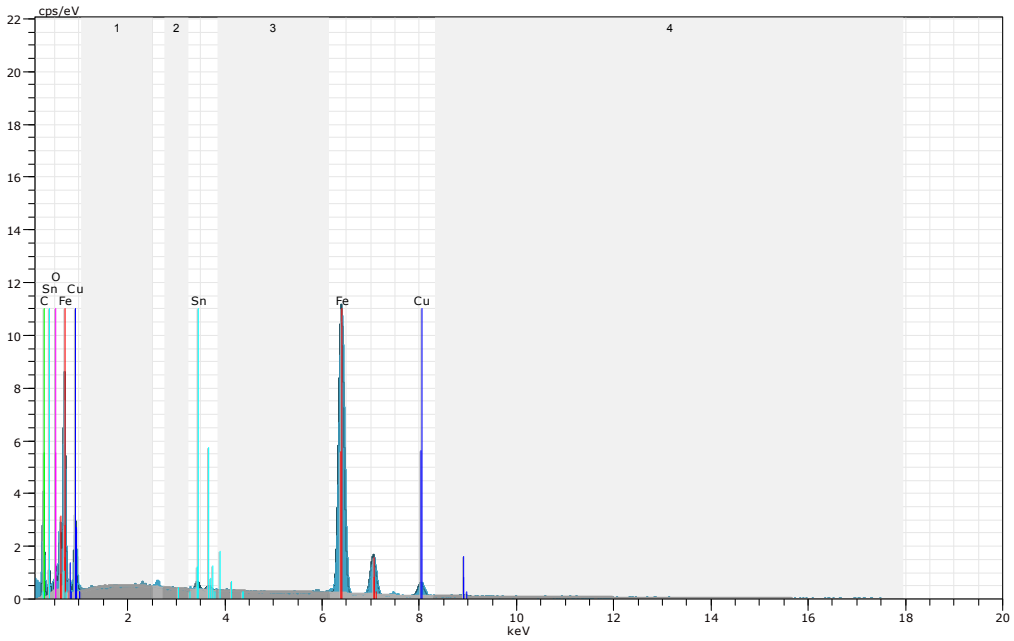


Şekil 8.55. b70s30 numunesinin 40 N yük ve 4000 m kayma mesafesi sonunda alınan aşınma yüzeyi görüntüsü (TEM-500X).

b70s30 aşınma test numunesinde de gözlenen tabakalı yapılar üzerinden EDX analizi yapılmıştır. Bu yapılar üzerinde A ile gösterilen nokta şekil 8.56'de görülmektedir.



Şekil 8.56. b70s30 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan tabaka üzerinden EDX analizi için seçilen A noktası.



Element	Dağılım [% ağ.]	Atom sayısı [% at.]
Demir (Fe)	66,40	38,11
Karbon (C)	15,55	41,49
Bakır (Cu)	7,84	3,95
Oksijen (O)	7,90	15,83
Kalay (Sn)	2,32	0,63
Toplam	100,00	100,00

Şekil 8.57. b70s30 numunesinin aşınma yüzeyinde oluşan tabaka üzerindeki **A** noktasına ait EDX analiz sonuçları.

Şekil 8.56'de b70s30 aşınma numunesi yüzeyindeki tabakalı yapı üzerinden seçilen A analiz noktası üzerinden alınan EDX sonuçlarında da, tabakanın Fe ve C atomları bakımından zengin olması münasebeti ile bu tabakaların b60s40'da olduğu gibi çelik bileşen olduğu saptanmıştır.

Tüm kompozit malzemelerin aşınma yüzeylerinde izafi hareket sebebiyle abrasif aşınmanın baskın olduğu, numunelerin aşınması esnasında, çelik bileşene göre oldukça yumuşak olan bronz bileşenin hızlı bir biçimde aşınarak, geride yüksek sert çelik tepe noktaları bıraktığı yapılan EDX analizi sonuçları ile tespit edilmiştir.

Kompozit malzemelerdeki bronz bileşenin oranının artışı ile aşınma izlerinin daha derinleştiği ve boşlukların bronz bileşence daha kolay bir biçimde sıvanarak kapandığı görülmüştür.

9. MALİYET ANALİZİ

Bu bölümde, S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Atölyesi ve malzeme laboratuarında bir dizi ön deney sonrasında üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemenin maliyet analizi yapılmıştır. Hurda bronz/çelik talaşların elendikten sonra oda sıcaklığında preslenip, sinterlenmesiyle üretilen kompozit malzemenin üretimindeki her bir işlem basamağı için kullanılan sarf malzemeler (metal talaşları, kalıplar) ile tüketilen enerji, işçilik maliyetleri çıkarılmıştır.

Kompozit malzemenin ham maddesi olan atık hurda talaşların (bronz ve çelik talaşları) güncel (2012 yılı için) birim fiyatları, aşağıdaki firmalarda çalışan yetkililer ile yapılan ikili görüşme ve bu firmalara ait internet sayfalarındaki bilgilerden elde edilmiştir.

- Çolakoğlu Metalurji A.Ş (İstanbul), (www.colakoglu.com.tr, erişim tarihi 07.05.2012 ve telefon ile yapılan görüşmeler yardımıyla),
- İçdaş A.Ş. (Çanakkale), (www.ıcdas.com.tr, erişim tarihi 07.05.2012 ve telefon ile yapılan görüşmeler yardımıyla),
- Geçgel Makine A.Ş. (Konya-yüz yüze yapılan görüşmeden).

Bronz ve çelik talaşların birim fiyatları Çizelge 9.1'de verilmiştir.

Çizelge 9.1 Hurda bronz talaşı ve çelik talaşların birim fiyatları (2012)

Malzeme	Birim Fiyatı (TL/kg)
Hurda bronz talaşı	7-8,5
Hurda çelik talaşı	0,19-0,20

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan diğer sarf malzemeler ile preslemede kullanılan kalıp giderine ait güncel fiyatlar Geçgel Makine A.Ş. (Konya), Kurşunel Kalıp A.Ş (Konya), Gümüştop Kalıp Ltd.Şti. (Konya), Teknik Kimya A.Ş (Konya), firmaları ile yapılan görüşmeler neticesinde belirlenmiş ortalama değerler aşağıda Çizelge 9.2'de gösterilmiştir.

Hesaplamalar, laboratuarda hâlihazırda üretimi gerçekleştirilmiş 100 g. ağırlığındaki silindirik kompozit malzeme için yapılmıştır.

Çizelge 9.2 Malzeme birim fiyatları (2012)

Sarf malzeme cinsi	**Birim fiyatı**
Toz Grafit	0.14 TL/Kg
Preslemede kullanılan kalıp malzemesi (13 cm çap-18 cm yüksekliğindeki ortalama 1000 defa sıkıştırma işlemi yapabilen)	190 TL
Kalıbın işlenme bedeli (Merkezde 19 mm çapında delik açma)	150 TL
Aseton	10 TL/litre
V-Karıştırıcı	4 TL
Elek (800 Mesh)	3 TL/m^2

Çalışmada kullanılan presleme makinesinin gücü 6 kW, sinterleme fırını gücü 4 kW, talaşları karıştırmak için kullanılan torna tezgâhının gücü ise 4 kW olarak okunmuştur. Elektrik birim fiyatı Meram Elektrik Dağıtım Şirketi verilerine göre 1kWh için 0.355 TL'dir.

Bir adet kompozit için hazırlanan maliyet tablosu aşağıda Çizelge 9.3'te verilmiştir.

Çizelge 9.3. Parça başına üretim maliyet tablosu

Malzeme ve/veya İşlem	Kullanılan malzeme, süre ya da enerji miktarı	Yaklaşık işlem tutarı (TL)	Toplam tutar (TL)
Bronz ve çelik talaş temini	50 g bronz- 50 g çelik talaşı	0,4 + 0,01	0,401
Talaşların asetonla yıkanması (1 Kg talaş için 0,5 Kg aseton kullanılmıştır)	50 g aseton	0,5	0,5
Talaşların Karıştırılması (Torna tezgâhında karıştırılması) Karıştırmada kullanılan V karıştırıcının maliyeti (40 mm çapında 40 cm uzunluğunda)	0,25 h karıştırıcı	0,25h*4*0,355 İhmal edilebilir	0,355 İhmal edilebilir
Talaşların Preslenmesinde kullanılan kalıp maliyeti (1000 parça için)	Kalıp	0,34	0,34
Pres enerji sarfiyatı (bir parçanın preslenmesi için)	0,05 h	0,3 h *6*0,355	0,11
Sinterleme fırını enerji sarfiyatı (10 adet parça aynı anda fırında sinterlenebilmektedir)	0,75 h (ısınma) 1 h (sabit sıc. Bekleme)	1,75 h* 4*0,355/10	0,248
TOPLAM BEDEL			**1,954 TL/adet**

Çizelge 9.3'te görülen bir adet kompozit numuneye ait maliyet analizi, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi laboratuar ve atölye imkanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemenin endüstride seri bir biçimde üretiminin gerçekleşmesi durumunda belirtilen maliyetlerin, tasarlanan üretimin kapasitesi, üretim yöntemi, üretim yeri gibi koşullara bağlı olarak çok daha düşük fiyatlarda üretilebileceği aşikârdır.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

10.1. Sonuçlar

Çelik ve bronz malzemelere ait testere talaşlarının ağırlıkça üç farklı oranda karıştırılıp, oda sıcaklığında sıkıştırılması ve ardından sıcaklık kontrollü fırında sinterlenmesi ile üretilen kompozit malzemelere ait mekanik ve aşınma özellikleri standartlara uygun yapılan mekanik testlerle belirlenmiştir. Bu test sonuçlarının yanı sıra, çalışma esnasında alınan metal mikroskobu ve TEM görüntüleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Kompozit malzemelerin yapısındaki çelik ve bronz bileşen arasında herhangi bir ara faz oluşmadığı, bu iki bileşenin bir birbirleri içerisine difüze olmadıkları, mikro yapı görüntüleri yardımıyla tespit edilmiştir.
- Talaşların oda sıcaklığında sıkıştırılması sırasında katı yağlayıcı olarak kullanılan ve yapıya ağırlıkça %1,5 oranında katılan toz grafitin bronz bileşen içerisinde herhangi bir yapısal değişeme uğramadığı ancak sinterleme kademesinde neredeyse tamamen çeliğe difüze olduğu görülmüştür.
- Kompozit malzemelerin basmadaki dayanımlarının, hadde CuSn10'un dayanımına yakın olduğu, özellikle en fazla bronz bileşen içeren b70s30 malzemenin CuSn10'a (σ_{CuSn10}=431 MPa) oldukça yakın bir basma dayanımına sahip olduğu (σ_{b70s30}=398 MPa) tespit edilmiştir. Ancak yapıdaki bronz bileşen oranının azalıp, çelik oranının artışı ile bu dayanımın azaldığı görülmüştür.
- Basma deney sonuçlarında, tüm kompozit malzemelerin, kırılmadan sonraki kısalma miktarlarının (ε_{b70s30}=0,45, ε_{b60s40}=0,42 ve ε_{b50s50}=0.36) CuSn10'dan (ε_{CuSn10}=0,33) çok daha yüksek olduğu görülmüştür .
- Üç noktadan eğme deneyi sonuçlarında, CuSn10' ait sehim miktarının (δ_{CuSn10}=1.92mm) kompozit malzemelerden (δ_{b70s30}=0.99mm, δ_{b60s40}=0.76 mm, δ_{b50s50}=0.63mm) fazla olduğu, bu malzemenin daha sünek kırıldığı gözlenmiştir.
- Üç noktadan eğme deneyi sonuçlarında, kompozit malzemelerin CuSn10'a (F_{CuSn10}=9,11kN) yakın eğme kuvveti değerlerinde (F_{b70s30}=8.13kN, F_{b60s40}=7.12kN, F_{b50s50}=6.34kN) kırıldıkları gözlenmiştir. Kompozit malzemeler içerisinde en fazla bronz oranına sahip olan b70s30'un kırıldığı kuvvet değeri,

CuSn10'un %90'ı kadardır. Bu oranın kompozit malzemedeki çelik oranındaki artış ile azaldığı tespit edilmiştir.

- Kompozit malzemelerin sıkıştırma doğrultusuna dik olarak tatbik edilen eğme deneyi sonuçları ile sıkıştırma yüzeyinden yapılan deney sonuçları mukayese edilmiş, yapı içerisindeki talaşların yönelimleri, kompozit malzemelerin bu yöndeki dayanımlarının nispeten daha düşük olmasına ve daha gevrek davranış sergilemelerine sebep olduğu görülmüştür (δ_{b70s30}=0.99mm-$\delta_{b70s30yy}$=0.76mm, δ_{b60s40}=0.76mm-$\delta_{b60s40yy}$=0.70mm, δ_{b50s50}=0.63mm-$\delta_{b50s50yy}$=0.61mm)
- Çalışmada tüm kompozit malzemeler ile CuSn10'un yüzey sertlik değerleri Brinell sertlik ölçme metoduyla ölçülmüştür. CuSn10'un yüzey sertlik değerinin (BSD_{CuSn10}=87), hacmen %25 gözenek içeren kompozit malzemelerden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Kompozit malzemelerin yüzey sertlik değerleri kendi aralarında mukayese edildiğinde ise bağlayıcı bronz bileşen miktarındaki artışa paralel olarak yüzey sertliğinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir (BSD_{b70s30}=48, BSD_{b60s40}=42, BSD_{b40s40}=40).
- Vickers mikro sertlik ölçüm sonuçlarında, talaş karışımına ağırlıkça %1.5 oranında ilave edilen toz grafitin çelik bileşene sinterleme işlemi sırasında difüze olarak bu bileşeni sertleştirdiği görülmüştür. Ancak bronz bileşen ile herhangi bir etkileşime girmediği, bu bileşen içerisine difüze olmadığı tespit edilmiştir.

Pim-disk test cihazında, kuru ortamda, 0,5 m/s sabit hızda gerçekleştirilen aşınma deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kompozit malzemelerdeki çelik bileşen artışı ile sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Numuneler üzerine uygulanan yük miktarı artırıldığında, en çok çelik bileşen içeren b50s50 malzeme ile aşındırıcı disk yüzey arasındaki sürtünme katsayısının hızlı bir biçimde arttığı gözlenmiştir. b70s30 ve b60s40 malzemelerde ise sürtünme katsayıları artan yük miktarı ile azalmıştır.
- Ağırlıkça çelik bileşen miktarı arttıkça, sürtünme katsayısına paralel olarak, kompozit malzemelerin aşınan yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

- Kompozit malzemelerdeki çeliğin artışı, aynı zamanda karşı disk yüzeyinin pürüzlülüğünü artırmıştır. b50s50'de, kayma mesafesi arttıkça, disk yüzeyinin pürüzlülük değeri artmaya devam etmiş, ancak b70s30 ve b60s40 malzemelerin, diskin yüzeyinde oluşturduğu pürüzlülük değerlerinin sabit kaldığı, kayma mesafesi ile artış göstermediği görülmüştür.
- Kompozit malzemeler içinde en çok ağırlık kaybı, bronzca en zengin olan b70s30'da gerçekleşmiştir. Bunu b60s40 takip etmiş ve en az ağırlık kaybına uğrayan b50s50 olmuştur.
- Kompozit malzemelerin aşınma yüzeylerine ait TEM görüntüleri incelenmiş, kompozit malzemelerin yüzeylerinde çoğunlukla abrazif aşınmanın olduğu görülmüştür. Homojen bir görünüm arz eden bu abrazif çiziklerin, kompozitin yapısındaki bronz oranının artışı ile daha da genişlediği ve derinleştiği görülmüştür.
- Yüksek oranda bronz bileşen içeren b70s30 ve b60s40 numunelerinin aşınan yüzeylerinde sürtünme doğrultusunda oluşan tabakalı yapılar gözlenmiştir. Bu tabakalar üzerinde seçilen noktalardan yapılan EDX analizlerinde, bunların çelik bileşene ait olduğu saptanmıştır.

10.2. Öneriler

Çelik ve bronz talaşların kullanıldığı bu çalışma kapsamında, ileriki zamanlarda yapılabilecek diğer işlemler aşağıda sıralanmıştır.

1. Metal talaşların kalıp içerisinde veya ekstrüzyon metodu ile oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda sıkıştırılması bazı avantajlar sağlayacaktır (Fogagnolo 2003). Özellikle, sıcaklığın etkisiyle kalıp içerisinde ısınan metal talaşlarının iç gerilmeleri ve sertlikleri azalacak, böylece belirlenen yoğunluk değerlerine erişim daha düşük basınçlarda sağlanabilecektir. Ayrıca yüksek sıcaklıkla birlikte uygulanan basınç, partiküllerin birbirlerine daha iyi bir biçimde yapışmasını sağlayacaktır. Bu, üretilen kompozit malzemenin daha üstün mekanik özellikler taşıyabileceği anlamına gelmektedir. Sıcak preslemede kazanılabilecek bir diğer husus, talaşların preslenmesi sırasında oksitlenmeden korumak

için gerekli önlemler alındığı takdirde, sinterleme işlemi için fırınına gerek kalmayacak, üretim nispeten daha hızlı ve ucuz bir biçimde gerçekleştirilebilecektir.

2. Bu çalışmada belirtilen metot ile endüstride kolaylıkla bulunabilen dökme demir ve çelik talaşlarının birlikte kullanıldığı bir kompozit malzemenin üretimi düşünülebilir. Bu iki bileşen arasında, sinterleme sırasında difüzyon etkisi ile sağlam bir birleşme oluşabileceği düşünülmektedir. Yeterli mekanik özelliklerde, boşluklu yapıya sahip, yağlı ortamlarda çalışabilecek bir yatak eleman üretimi mümkündür. Hali hazırda dökme demirler yapılarındaki grafit nedeniyle, bakır esaslı alaşımlardan sonra, yatak elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.
3. Bu çalışmada metal talaşlar kullanılarak üretilen kompozit malzeme ile SAE 1050 çelik malzeme yüzeyi arasında oluşan sürtünme katsayısının, yapı içerisindeki çelik bileşen miktarındaki artış ile yükseldiği görülmüştür. Bu bağlamda, kompozit malzeme içerisindeki çelik bileşen oranı değiştirilerek ve sürtünme katsayısını artırıcı malzemelerin yapıya katılmasıyla, sürtünme elemanı üretimi gerçekleştirilebilir.
4. Çelik bronz talaş kompozit malzemelerdeki boşluk oranı, uygulanan basınç ve sinterleme sıcaklığıyla ayarlanabilmektedir. Bu iki parametre yardımı ile oluşturulan farklı boşluk oranına sahip kompozit malzemelerden, darbe sönümleyici üretimi mümkündür.
5. Bu çalışmada matris eleman olarak kullanılan bronz bileşen yerine, yine bakır esaslı olan CuZn30 gibi başka malzemeler de tercih edilebilir.
6. Çalışmada üretilen MMK malzemelerin yapısında hacmen %20 oranında bulunan boşlukların yağ depolama kapasiteleri, standartlarda belirtilen test metotları ile belirlenebilir ve bu malzemelerin yağlı ortamlarda aşınma performansları incelenebilir.

11. KAYNAKLAR

ASTM- E 290-97a, Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, American Society for Testing and Materials.

ASTM- E 9-89a, Standard Test Methods for Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, American Society for Testing and Materials.

Atik, E., Ünlü, B.S., Meriç, C., 2001, Design of radial journal bearing wear test rig, Conference of Machine Materials and Technology, Manisa, 98-103

Blau, P.J, 2001, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives – USA, 19-20.

Babalık, F.C., 2000, Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri Cilt-2, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı No 169, Bursa, 255-256.

Chmura, W., Gronostajski, Z., 2006, Bearing composites made from aluminium and aluminium bronze chips, Journal of Materials Processing Technology, 178, 188–193

Çakır, M.C., Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı No 16, Bursa, 43-45.

Fogagnolo, J.B. Ruiz-Navas, E.M., Simón, M.A. Martinez M.A., 2003, Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion, Journal of Materials Processing Technology 143–144, 792–795.

Feyzullah, E., Zeren, A., Zeren, M., 2007, A study on tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding, *Materials and Design, 28*, 318–323

Dieter, G.E., 1988, Mechanical Metallurgy, *McGraw-Hill Series in Metarials Science and Engineering,* London-UK, 8-21.

Donald, R.A. (Ed.), 1988, Composite Metarials, The Science and Engineering of Metarials, SI Edition, Van Nostrand Reinhold.Co.Ltd., 507-546.

George, S.B., Henry, R.C., Vaccari, J.A., 1997, Materials Handbook-Fourteenth Edition, *McGraw-Hill,* Newyork-USA, 125-127.

Gronostajski, J.Z., Kaczmar, J.W., Marciniak, H. and Matuszak, A., 1997, Direct recycling of aluminium chips into extruded products, *Journal of Materials Processing Technology,* 64, 149-156.

Gronostajski, J., Matuszak, A., 1999, The recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloy chips*, Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, 35-41.

Gronostajski, J., Marciniak, H., Matuszak, A., 2000, New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling, *Journal of Materials Processing Technology*, 106, 34-39.

Gronostajski, J., Marciniak, H., Matuszak, A., Samuel, M., 2001, Aluminium-ferro-chromium composites produced by recycling of chips, *Journal of Materials Processing Technology*, 119, 251-256.

Gronostajski, J., Chamura, W., Gronostajski, Z., 2002, Bearing materials obtained by recycling of aluminium and aluminium bronze chips, *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126,483-490.

Gronostajski, J., Gronostajski, Z., 2003, Sintering criterion in metal working processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 99-102.

German, R.M., 2007. Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri, Sarıtaş-Türker-Durlu, *Türk Toz Metalurjisi Derneği,* Ankara, 2-197.

Hale, R., 2003. Powder Metallurgy Process and Applications, *AE 510 Research Project*, University of Kansas, Lawrance, 34-35.

Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., 1999, Metal matrix composites production by stir method, *Journal of Material Process Technology*, 1, 92-93.

Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., 2002, Particle Distribution in Cast Metal Matrix Composites-Part 1, *Journal of Materials Processing Technology,* 123, 251-257.

Hu, M., Ji, Z., Chen, X., Zhang, Z., 2008, Effect of chip size on mechanical property and microstructure of AZ91D magnesium alloy prepared by solid state recycling, *Materials Characterization*, 59, 385-389.

Hutchings, I.M., 1996, Tribology, friction and wear of engineering materials, *St.Edmundsbury Press* .London, 78-93.

Kayalı, E., Ensari, C., Dikeç, F., 1983, Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, *İ.T.Ü. Matbaası,* İstanbul.

Kestursatya. M., 2003. Wear performance of copper_ graphite composite and a leaded copper alloy, Material Science & Engineering, A339, 150-158

Kurt. A., 1992. Toz Metal Bronz Yatak Malzemelerinin Özellikleri, Y.Lisans Tezi*, G.Ü.F.B.E.,* Ankara, 2-34.

Kurt. A., 2001. Kendi kendini yağlayan toz metal yataklar,*Türk Toz Metalurjisi Derneği Bülteni*, Ankara, 17, 4.

Kuş, R., 2007, Düşük karbonlu çelik tel takviyeli kır dökme demir kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 11-12.

Küçükömeroğlu. T., Pürçek. G., Saray. O., and Kara. L., 2008, Investigation of Friction and Wear Behaviours of CuSn10 Alloy in Vacuum, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering,*30, 172-176.

Lienert, T., Lane, C.T., Gould, J.E., 1993, Selection and weldability of aluminum metal matrix composites, Welding, Brazing, and Soldering, *ASM Handbook*, 6, 554-559.

Muller, F., Monaghan, J., 2000, Non-conventional Machining of Particle Reinforced Metal Matrix Composite, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 1351-1366.

Mindivan, H., Kayalı, E.S., Çimenoğlu, H., 2008, Recycling Of Aluminum Machining Chips, *12th International Materilas Symposium (IMSP'2008),* Denizli, 109-113.

Ludema, K.C., 1996. Friction, Wear, Lubrication, *A Textbook in Tribology*, USA, 3-100.

Özçelik. S., 2007. Cu ve Fe esaslı T/M yatak malzemelerinin aşınma özelliklerinin deneysel incelenmesi, Y.Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 14.

Öveçoğlu. M.L., 1997. Toz Metalurjisi, Tarihsel gelişim, Üretim Aşamaları ve Son Eğilimler *9. Uluslararası Makine ve Malzeme Sempozyumu*, İstanbul, 449-475.

Sarıtaş. S. 1994. Toz Metalürjisi, Makine Mühendisleri El Kitabı, *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara, 65-82.

Schatt, W., Wieters, K.P., 1997. Powder Metallurgy, Processing and Materials, EPMA, Shrewsburg, U.K., 492.

Smith, W., 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür yayıncılık, İstanbul, 350-355.

Tavakoli, A., Liu, R., Wu, X.J., 2008, Improved mechanical and tribological properties of tin-bronze journal bearing materials with newly developed tribaloy alloy additive, *Materials Science and Engineerin,*A 489, 389-402.

Taha, M.A., Mahallaawy, N.A., 1993, Advances in metal matrix composites, *Trans Teach Publications,* Switzerland, 72.

Türk Standardı, Sert Metaller Dışında Sinterlenmiş Metal Malzemeler - Sinterlenmiş Geçirgen Malzemeler – Yoğunluk, Yağ Muhtevası ve Açık Gözeneklilik Tayini, TS 2350 EN ISO 2738, 2002.

Upadhyaya, A., Sethi, G., 2007, Effect of heating mode on the densification and microstructural homogenization response of premixed bronze, *Scripta Materialia volume,* 56, 469–472

Ünlü. B.S., Atik. E., Meriç. C., 2002, Wear mechanisms in journal bearings, *Mechine and Metal Technology*, 27, 45-50.

Ünlü. B.S., Atik., 2005, Determination of friction coefficient in journal bearings, Materials and Design, 28, 973-977.

Ünlü. B.S., Yılmaz, S.S., Varol, R., 2005, T/M yatak malzemelerinin aşınma ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi,* 2, 31-37.

Ünlü. B.S., Atik. E., Meriç. C., 2005, CuSn10 yatakların tribolojik özelliklerinin belirlenmesi, *C.B.Ü.Fen Bilimleri dergisi*, 1.1, 45-51.

Ünlü. B.S., Atik. E., Meriç. C., 2007, Effect of loading capacity (pressure–velocity) to tribological properties of CuSn10 bearings, *Materials and Design,*28, 2160-2165.

Ünlü. B.S., Atik., 2008, Investigation of tribological properties of boronized Fe-based SAE 1020 and TS DDK 40 journal bearings at high loads, *12th International Materilas Symposium (IMSP'2008),* Denizli, 631-639.

Ünlü. B.S., Yılmaz, S.S., Kurgan, N., 2009, Bronz-demir, T/M-döküm yatakların mikro yapı, aşınma ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09),* Karabük.

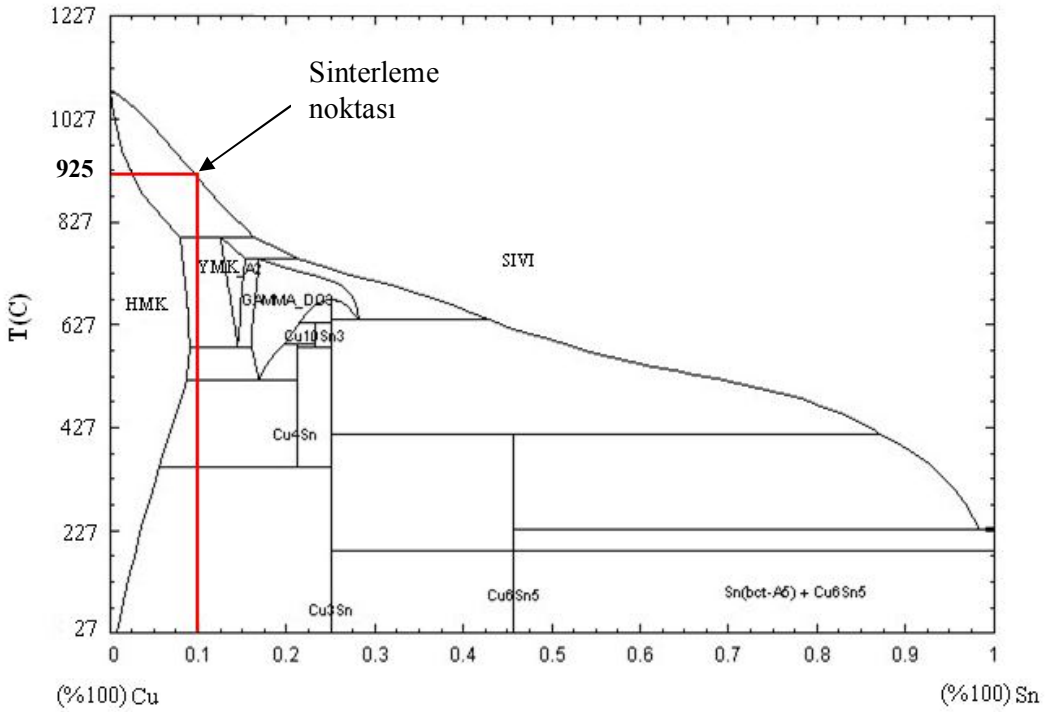
Ünlü. B.S., Atik. E., 2010, Investigation of tribological properties of boronized Fe-based SAE 1020 and TS-DDK 40 journal bearings at high loads, *Materials and Design,* 31, 2690–2696.

Ünlü. B.S., Atik. E., 2010, Evaluation of effect of alloy elements in copper based CuSn10 and CuZn30 bearings on tribological and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds,* 489, 262–268.

Zeren, A., 2007, Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding, *Materials and Design, 28*, 2344–2350.

12. EKLER

Ek-1 Cu-Sn Denge diyagramı (Smith, 2001)



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hakan Burak KARADAĞ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Seydişehir-22.10.1979
Telefon : 0 533 439 85 35
Faks :
e-mail : hbkaradag@selcuk.edu.tr.

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Meram Gazi Lisesi	1996
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Makine Müh.Böl.	2001
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniv.Fen Bilimleri Enstitüsü.	2005
Doktora	:	Selçuk Üniv.Fen Bilimleri Enstitüsü.	2005-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2001-	S.Ü.Müh.Mim.Fak.Makina Müh.Böl.	Arş.Gör.

YABANCI DİLLER

İngilizce