

SiO₂ Takviyeli Etial 21 Esaslı Kompozit Malzemelerin Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemi İle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi

İbrahim KARADEMİR*, Serkan ATEŞ

Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ;Makina Mühendisliği Bölümü,
Bartın / Türkiye

Yayın Bilgisi

Yayın Geçmişi

Geliş

Tarihi:06.12.2013

Revizyon Tarihi:

19.02.2014

Kabul

Tarihi:03.03.2014

Anahtar Kelimeler

Basınçlı İnfiltrasyon

Al2014

SiO₂

Yoğunluk

Gözenek Miktarı

Sertlik

Aşınma

Keywords

Pressure infiltration

Al2014

SiO₂

Intensity

Porosity

Hardness

Wear resistance

Özet

İnfiltrasyon yöntemi kompozit malzeme üretiminde kullanılan basit ve hesaplı bir sıvı hal üretim yöntemidir. Bu çalışmada SiO₂ takviyeli Al2014 matrisli kompozit malzemelerin basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretilmesinde, infiltrasyon parametrelerinin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney numunelerinin üretimi (N₂) gazı ile basınç sağlanan bir ertitme ocağında gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesi olarak 300µm, 250µm ve 150µm boyutlarında SiO₂ tozları ve matris malzemesi olarak Al2014 alaşımı kullanılmıştır. Üretim parametreleri olarak sıcaklık, basınç ve matrise Mg ilavesi belirlenmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapıları, yoğunlukları gözenek miktarları, sertlikleri ve aşınma dayanımları incelenmiştir. Kompozitlerin mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde SiO₂ tozların matris içerisinde homojen bir dağılım gösterdikleri belirlenmiştir. İnfiltrasyon sıcaklığının yoğunluğu, sertliği ve aşınma dayanımını arttırdığı, gözenek miktarını düşürdüğü görülmüştür.

PRODUCTION AND CHARACTERISTIC ANALYSIS OF SiO₂-REINFORCED ETIAL 21 BASED COMPOSITE MATERIALS BY PRESSURE INFILTRATION METHOD

Abstract

Infiltration method is a simple and economic liquid state composite production method. In this study SiO₂ reinforced ETIAL21 based composite materials were produced by pressure infiltration method and investigated the effect of production parameters to mechanical properties. Specimens were produced with a furnace which used N₂ gas for applying pressure to liquid metal in. As the reinforcement element SiO₂ powder with 300µm, 250µm and 150µm particle size and as matrix material Al2014 aluminum alloy were used. The composite production parameters were determined as infiltration temperature, infiltration pressure and Mg addition to the matrix. Microstructure, intensity porosity relation, hardness and wear resistance of the composites were analyzed. It was identified by means of microstructure images that SiO₂ powders shows homogenous distribution. It was understood that infiltration temperature increases the intensity, hardness and wear resistance of composites but, decrease the porosity.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kullanılan malzemelerde aranan özellikler de artmış ve bu artışa paralel olarak da yeni mühendislik malzemeleri arayışı başlamıştır. Bu arayış iletkenlik, rijitlik, tokluk, mekanik sönümlenme vb. özellikleri yüksek; ağırlık sıvı ve gaz geçirgenliği, termal genişleme katsayısı ve maliyeti düşük malzemeler elde edebilme arayışıdır.

Metaller gibi klasik malzemelerin birçok özellikleri gelişen teknolojinin ihtiyaçları için yeterli olmayınca daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve bu konuda hızlı bir gelişme sürecine girilmiştir. Kompozit malzemelerin klasik malzemelere göre en belirgin özellikleri hafiflik ve sağlamlıktır. Yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları neticesinde, bu malzemelerin çekme, darbe, yorulma dayanımlarının artırılması, kimyasal direnç ve elektrik özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmuştur. Kompozit malzemeler yaygın bir şekilde havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, makine, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarında kullanılmaya başlanmıştır [1].

Kompozit malzeme iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılırlar. Karbon elyafı plastikler, otomobil lastikleri ve sermetler bunlara örnek olarak gösterilebilir. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmede amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir. Bir kompozit malzeme genelde düşük elastikiyet modülü ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içine dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanlarından oluşmaktadır. Ancak, molekül ve atomsal düzeyde

birleştirilen malzemeler alaşımlar mikroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmazlar. Çelikteki krom ve vanadyum bir karışım oluşturur ve bir kompozit değildir. Yapı mikroskobik olarak homojendir. Fakat karbür uçlu takımlar, yumuşak kobalt metal matris içine sert karbürlerin yerleştirilmesi parçacıklı bir kompoziti oluşturur [1].

Kompozit malzemeler XX. Yüzyılın ikinci yarısından beri mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Çeşitli metallerin alaşımlarıyla birlikte matris malzemesi olarak kullanılması ise son yıllarda hızla artış göstermiştir. Bu artış, metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler üzerinde yapılan araştırmaların yoğunlaşmasını da beraberinde getirmiştir.

MMK'ler, yüksek dayanıma sahip seramik partiküller ya da fiberlerin başta alüminyum olmak üzere, titanyum ya da magnezyum gibi hafif metal alaşımlarının içerisine takviye edilmesiyle elde edilen ve tek bileşenden oluşan malzemelerde elde edilmesi mümkün olmayan üstün özellikler gösteren malzemelerdir. MMK'ler yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastisite modülü/yoğunluk oranı, yüksek aşınma dayanımı, boyutsal kararlılık, ayarlanabilir ısıl genleşme katsayısı, yüksek yorulma dayanımı ve sıcakta dayanım gibi üstün özelliklere sahiptirler [2]. Partikül takviyeli MMK'ler, daha kolay üretilebilmeleri ve daha düşük maliyetli olmaları sebebi ile sürekli fiberlerle takviyelendirilen MMK'lerden daha çok ticari öneme sahiptirler [3]. Otomotiv ve havacılık endüstrisi tarafından oldukça iyi tanınan ve kullanılan, alüminyum alaşımları düşük yoğunluğa, kullanışlı mekanik özelliklere ve çevre dayanımına sahiptir ve MMK'lerde en çok tercih edilen matris alaşımıdır. Al matrisli kompozitlerde partikül halinde SiC ve Al₂O₃ takviye elemanı olarak en çok kullanılan malzemelerdir [4].

MMK'ler kompozit malzemedeki farklı özellikler elde etmemize olanak sağlayan matris ve takviye elemanı dediğimiz iki unsurun birleştirilmesiyle elde edilir. Kompozit üretirken elde etmeyi amaçladığımız düşük yoğunluk,

yüksek mukavemet, yüksek aşınma direnci, korozyon direnci, yorulma direnci, yüksek sıcaklık direnci, termal kararlılık, boyutsal kararlılık, termal iletkenlik, elektrik iletkenliği, akustik izolasyon, kırılma tokluğu ve süneklik gibi özellikler matris ve takviye elemanının seçimi ile yakından ilgilidirler. Farklı matris ve takviye malzemeleri kullanılarak, farklı takviye hacim oranları ile yukarıda bahsedilen özelliklere sahip malzemeler elde edebiliriz.

Bu çalışmada temel amaç; hafifliği ve doğada bolca bulunması gibi avantajları bulunan Alüminyum'dan elde edilen Al₂O₃ alaşımını, klasik takviyeler olan SiC ve Al₂O₃ yerine yine doğada bol miktarda bulunan SiO₂ tozlar içine infiltre ederek Al 2014 alaşımının mekanik fiziksel ve ısıl özelliklerini iyileştirerek havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, makine, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarının ihtiyacı olan hafif ve sağlam hammadde gereksinimini karşılamak üzere kompozit malzeme üretmektir. Bu çalışmanın diğer bir amacı da mekanik fiziksel ve ısıl özellikleri geliştirerek birim maliyeti düşürmek ve kompozitin optimum üretim parametrelerini belirlemektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Maddenin birim hacminin kütesine yoğunluk denir. Birimi gr/cm³'tür. Yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. Ölçümlerde "RADWAG AS 220 / X" marka 1/10000 hassasiyete sahip hassas terazi kullanılmıştır. Bir malzemenin boşluk hacminin toplam hacmine oranına gözeneklilik denir. Teorik ve deneysel yoğunlukları belirlenen kompozitlerin gözenek miktarları da hesaplanmıştır.

Üretilen kompozitlerin yüzeyleri sırasıyla 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 grit (mesh) tane boyutuna sahip dairesel zımpara ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi tamamlanan numunelerin yüzey görüntüleri Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskopta alınmıştır.

Üretilen numunelerin sertlikleri Brinell Sertlik Deneyi ile ölçülmüştür. Bu deneyde sertlik, sertleştirilmiş çelik veya tungsten karbür bir çelik bilyenin, malzeme yüzeyine genellikle 30 saniye süre ve belli bir yükü bastırılması ile elde edilen izin çapı ölçülerek belirlenmiştir. Kompozitlerin sertlik ölçümleri "Manual Universal Hardness Tester CV-700" marka sertlik ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden 5'er adet ölçüm alınmıştır ve sertlik bu ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Abrasiv aşınma deneyleri torna tezgahında yapılmıştır. Numuneler, aşınma deneyleri öncesi yüzeyde herhangi bir kalıntı olmaması ve yüzeyin karşı malzemeye tam temas edebilmesi için 1000 mesh zımparaya tutularak, yüzeydeki kalıntılar basınçlı hava yardımıyla temizlenerek uzaklaştırılmıştır.

Aşındırıcının bağlı olduğu disk, torna tezgahının aynasına, aşındırılacak deney numunesi ise bir sistem bütünlüğü içerisinde torna tezgahının katerliğine tespit edilmiştir. Aşındırılacak malzemeye kuvvet uygulayacak mekanizma bir terazi yardımıyla 10 N'luk yük uygulayacak şekilde kalibre edilmiştir. Deney numunesi dıştan içe doğru 60 dev/dk ayna devri ve 0.653mm/s ilerleme hızıyla 100s spiral bir yol takip etmiştir. Deney numuneleri aşındırma aparatına bağlanmadan önce 10-4gr hassasiyetli elektronik terazi ile tartılmış ve aparata bağlanıp istenen aşınma yolu aldırıldıktan sonra sökülerek yüzeyindeki kalıntı metal partikülleri alkol yardımıyla temizlenerek tartma işlemi tekrarlanmıştır. Böylece numunenin başlangıç ve son durumu arasındaki ağırlık farkı tespit edilerek aşınmadaki ağırlık kaybı bulunmuştur. Bir numune ile yapılan aşınma deneyi aynı şartlarda her defasında yeni bir numune ve yeni bir zımpara kağıdı kullanılarak üç defa tekrarlanmış ve ortalama bir değer elde edilmiştir. Aşındırıcı olarak 60 mesh'lik silisyum karbür (SiC) zımpara kağıdı kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR

Deneyler sonucunda küçük tane boyutlarında düşük, büyük tane boyutlarında daha yüksek takviye hacim oranlarının elde edildiği görülmektedir (Tablo 1). Buna paralel olarak tekli modelde en yüksek takviye hacim oranı elde edilmişken, üçlü modelde en düşük takviye hacim oranı elde edilmiştir. Bunun sebebi küçük taneli takviyelerde ara yüzey alanlarının fazla olmasından dolayı taneler arası gözeneklerin bütün hacme dağılması ve gözenek miktarlarının fazla olmasıdır.

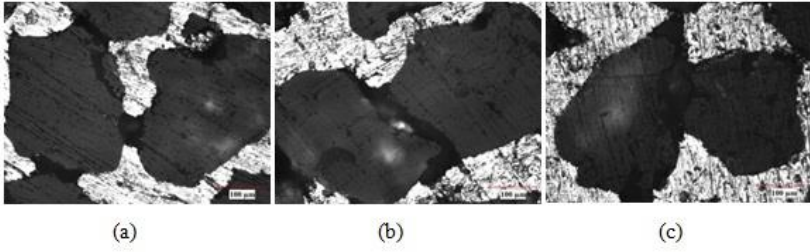
Tablo 1. İnfiltrasyon deneylerinde kullanılan SiO₂ tozlarının takviye hacim oranı

Takviye Tane Boyutu (µm)	300	250	150	Tekli Model	İkili Model	Üçlü Model
Takviye Hacim Oranı (%)	51,68	45,81	41,96	51,68	49,33	48,99

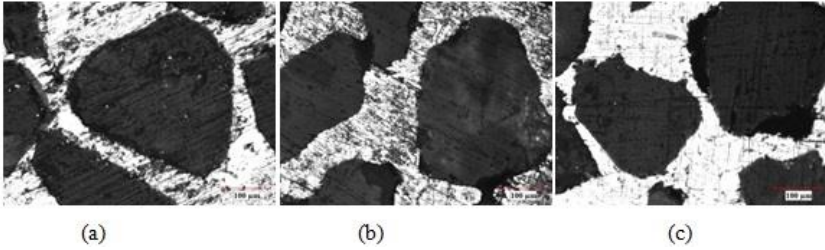
İnfiltrasyon sıcaklığının mekanik özelliklere etkisinin araştırılabilmesi için 700kPa sabit basınç altında, 700, 750 ve 800 C sıcaklıklarda, matrise Mg ilave edilmeden, her üç model için numuneler üretilmiştir.

İnfiltrasyon sıcaklığının artışının matrisin yüzey gerilimini azaltarak infiltrasyonu artırıcı etki yaptığı araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Benzer şekilde, Chong S.Y. [5] Al/SiC sisteminde, Contreras vd., [6] Mg/TiC sisteminde, Demir ve Altınok [7] Al-Al₂O₃/SiC sisteminde bu çalışmadakine benzer olarak, infiltrasyon sıcaklığının önemli bir parametre olduğunu ve artan sıvı matris sıcaklıklarında infiltrasyon davranışının arttığını belirtmişlerdir.

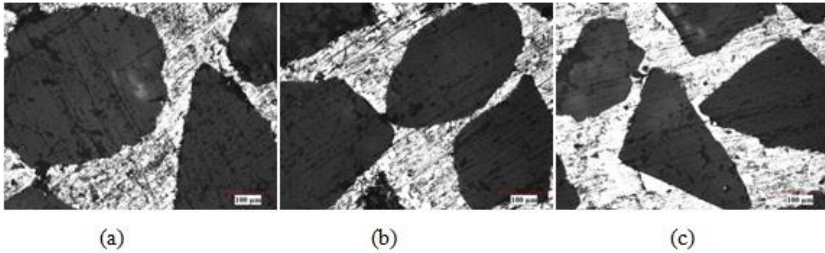
Şekil 1, 2 ve 3'te farklı infiltrasyon sıcaklıklarında üretilmiş kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. Tekli modelde farklı infiltrasyon sıcaklıklarında üretilen kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri a) 700°C b) 750°C c)800°C



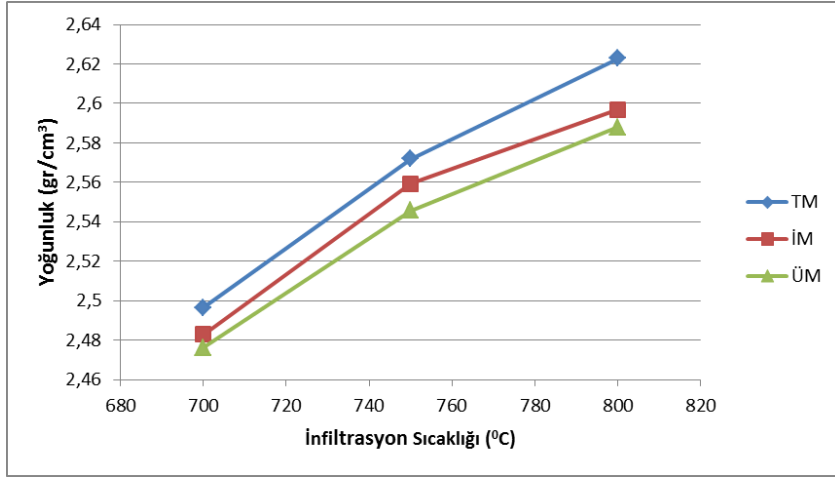
Şekil 1. İkili modelde farklı infiltrasyon sıcaklıklarında üretilen kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri a) 700°C b) 750°C c)800°C



Şekil 2. Üçlü modelde farklı infiltrasyon sıcaklıklarında üretilen kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri a) 700°C b) 750°C c)800°C

İnfiltrasyon sıcaklığının artmasıyla kompozitin yoğunluk değerinin arttığı, takviye hacim oranının azalmasıyla ise yoğunluğun azaldığı şekil 4' te

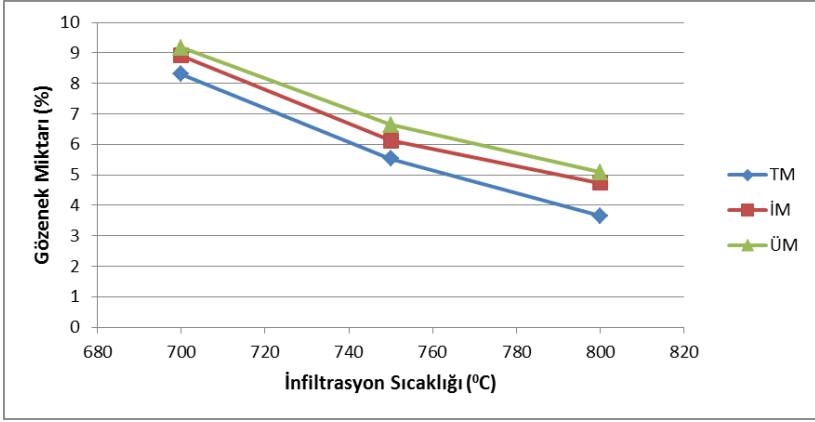
görülmektedir. Pek çok sistemde olduğu gibi SiO_2/Al 2014 sisteminde de sıcaklığın önemli bir parametre olduğu aşikârdır.



Şekil 4. Sabit basınçta (700kPa) SiO_2/Al 2014 kompozitin yoğunluk değerleri

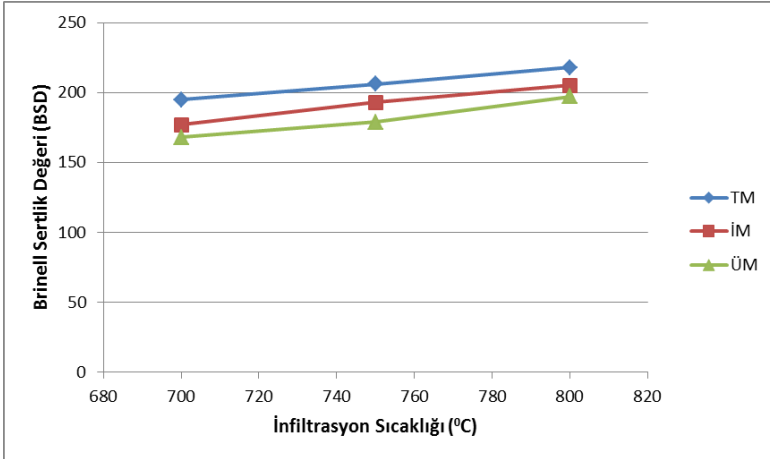
Sıvıların viskozitesi sıcaklığın artışı ile birlikte düşme eğilimindedir. Artan sıcaklık ile viskozite ve yüzey gerilimi azalacağından akıcılık artar ve sıvı matrisin SiO_2 tozlar arasındaki boşluklara dolması kolaylaşır. Sıcaklık aynı zamanda daha iyi ısıtma sağlamaktadır. Benzer sonuçlar Chong vd. [5] tarafından da belirtilmiştir. Grafiğe bakıldığında yoğunluk değeri en fazla tekli modelde, en az ise üçlü modelde elde edilmiştir. Bunun nedeni takviye hacim oranının tekli modelde en yüksek olmasıdır.

İnfiltrasyon sıcaklığının artması ile kompozitin gözenek miktarının azaldığı, takviye hacim oranının artmasıyla gözenek miktarının arttığı Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 3. Sabit basınçta (700kPa) SiO₂/ Al2014 kompozitin gözenek miktarı

İnfiltrasyon sıcaklığının artması ile kompozitin sertlik değerinin arttığı, takviye hacim oranının azalmasıyla sertliğin azaldığı Şekil 6'da görülmektedir.

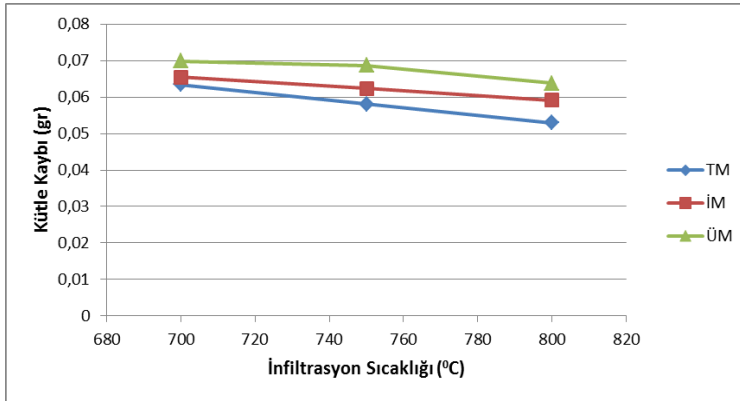


Şekil 4. Sabit basınçta (700kPa) SiO₂/ Al2014 kompozitin sertlik değeri

Artan infiltrasyon sıcaklığı ile kompozitin sertlik değerinin artışı kompozitin yoğunluğunun sıcaklıkla artması ile açıklanabilir. Şekil 6'da görüldüğü gibi takviye hacim oranı en yüksek olan tekli model en yüksek

sertliğe sahipken, takviye hacim oranı en düşük olan üçlü modelin en düşük sertliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Şekilden aynı zamanda artan takviye tane boyutu ile üretilen kompozitlerin sertliklerinin arttığı sonucuna varılabilir. Bunun nedeni büyük taneli tozlarda (tekli model) hacimce SiO₂ miktarının artmasıdır. Dolayısıyla yumuşak matris malzemesinin kompozit içerisinde daha az yer almasıdır. Ayrıca büyük taneli tozlarda, infiltrasyon öncesi boşlukların büyük olması daha az gözenekli ve daha sert kompozit üretilmesini sağlamıştır. Artan infiltrasyon sıcaklıklarında sıvı matrisin infiltrasyon öncesi boşlukları daha rahat doldurarak gözenek miktarını düşürdüğü böylece sertliği arttırdığı Durman [9] tarafından da belirtilmiştir.

İnfiltrasyon sıcaklığının artışının kompozitin aşınma dayanımını arttırdığı, takviye tane boyutunun küçülmesinin ise aşınma dayanımını azalttığı Şekil 7'de görülmektedir. Aşınma deneyleri esnasında en fazla kütle kaybı, en küçük taneler içeren üçlü modelde meydana gelirken en az kütle kaybı, en büyük taneler içeren tekli modelde meydana gelmiştir.



Şekil 5. Sabit basınçta (700kPa) SiO₂/ Al₂O₃ kompozitinin aşınma dayanımı

Grafikten de anlaşılacağı gibi infiltrasyon sıcaklığının artması aşınma direnci üzerine olumlu etki yapmıştır. Yapılan araştırmalar göstermektedir ki artan infiltrasyon sıcaklıklarında sıvı matrisin viskozitesi düşmekte ve infiltrasyon kolaylaşmaktadır. Abrasiv aşınma esnasında malzemenin aşındırılmasında iki kuvvet rol oynamaktadır. Bunlardan biri abrasiv partikülün yüzeye batmasını sağlayan basma kuvveti diğeri ise numuneden partikül kopartan kesme kuvvetleridir. Matris ne kadar gözeneksiz bir yapıya sahip olursa sertliği ve bunun yanında mekanik özellikleri de iyileşeceğinden kendisine batmaya çalışan abrasiv partiküle karşı daha yüksek direnç gösterecektir. Ayrıca infiltrasyon sıcaklığının artması gözenek miktarının azalmasına ve matris ile takviye partiküller arasındaki bağ miktarının artmasını sağlayacağından aşınma direncini arttıracaktır. Diğer bir açıdan bakıldığında düşük infiltrasyon sıcaklıklarında elde edilen gözenekli yapı sonucunda matris ile takviye arasındaki bağ miktarı azalacağından abrasiv partiküllere karşı göstereceği direnç azalacaktır.

İnfiltrasyon sıcaklığının artması yüzey gerilimini düşürerek sıvı matrisin gözenekleri doldurmasını kolaylaştırmakta ve gözenek miktarı düşük kompozit üretmemizi sağlamaktadır.

Abrasiv aşınmada etkili diğer parametre olan kesme kuvvetlerine bağlı olarak değerlendirilelim. Üretilen kompozit malzemede abrasiv partiküllerin Kesme kuvvetine karşı koyan iki parametre vardır bunlardan biri matris diğeri ise takviye partiküllerdir. Düşen infiltrasyon sıcaklığına bağlı olarak kompozitin gözenek miktarı artmakta ve kompozit hacmin sertliği düşmektedir. Bunun sonucunda kesme kuvvetleri kompozit üzerinde daha fazla iş yapabilmektedir.

İnfiltrasyon sıcaklığının artmasıyla gözenek miktarında azalma meydana geleceği yukarıdaki paragrafta açık bir şekilde belirtilmiştir. Benzer durum

üretilen kompozit numunelerde görülmüştür. İnfiltrasyon sıcaklığını artmasıyla birlikte gözeneklilik azalmış ve sertlik artmıştır.

KAYNAKLAR

1. Yalçın, H., Gürü, M., “Malzeme Özellikleri”, Malzeme Bilgisi”, Palme Yayıncılık, Ankara, 1-42, (2002).
2. Foltz, J.V. (1990). Metal Matrix Composites, ASM Handbook, Volume 2, ASM International, USA.
3. Ellis, M.B.D. (1996). “Joining of Aluminium Based Metal Matrix Composites”, International Materials Reviews, 41:42-57.
4. Mortensen, A. And Cornie, J. A., “On the infiltration of metal-matrix composites”, Met. Trans., 18 (A): 1160-1163 (1987).
5. Chong, S. Y., Atkinson, H. V. and Jones, H., “Effect of ceramic particle size, melt superheat, impurities and alloy conditions on threshold pressure for infiltration on SiC powder compacts by aluminium-based melts”, Mat. Sci and Eng., 173 : 233-237 (1993).
6. Contreras, A., Lopez, V. H. And Bedolla, E., “Mg/TiC composites manufactured by pressureless melt infiltration”, Scripta Materialia, 51 : 249-253 (2004).
7. Demir, A., Altinkok, N., “Effect of gas pressure infiltration on microstructure and bending strength of porous Al₂O₃/SiC-reinforced aluminium matrix composites”, Composites Science and Technology, 64 : 2067-2074 (2004).
8. Kurnaz, S. C., Akbulut, H., ve Durman, M., “Saffil (δ - Al₂O₃) fiber çinkoalüminyum alaşımı (ZA.12) metal matriks kompozitlerin infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi”, 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 4-8 Mayıs, Ankara, 1155-1161 (1993).

7075 Alüminyum Alaşımının Tornalamasında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Analizi

Tugay DİŞBUDAK¹, Sadri ŞENSOY²

¹Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak/Türkiye

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak /Türkiye

Yayın Bilgisi	Özet
<p>Yayın Geçmişi Geliş T.: 11.03.2013 Revizyon T.: 25.03.2013 Kabul T.: 08.04.2013</p>	<p>Talaş kaldırma işlemlerinde nihai mamulün yüzey kalitesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, özellikle uçak sanayiinde çok kullanılan 7075 alüminyum alaşımının kaplamasız karbür kesici takımlarla işlenmesinde, ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde üç farklı ilerleme, kesme hızı ve talaş derinliği değerleri kullanılmıştır. Deney sonuçları incelenmiş ve en büyük etkiye sahip parametre belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliği olmuştur. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi varyans analizi ile yapılmıştır.</p>
<p>Anahtar Kelimeler</p> <p>7075 Alüminyum, Yüzey Pürüzlülüğü, İlerleme, Talaş Derinliği, ANOVA</p>	<p>Effects of Circulation on the Critical Submergence of an Intake Abstract</p> <p>Surface quality of the product is important in metal removal process. In the study, aluminium alloy 7075, which used widely in the aircraft, industry with uncoated carbide cutting tools for processing, feed rate, cutting speed and depth of cut on the surface roughness were investigated. In the experiments, three different feed rates, the cutting speed and cutting depth values were used. Experimental results have been examined and the most effective impact parameter was determined. The most effective parameters were found roughness, feed rate, cutting speed and depth of cut respectively. The effect of cutting parameters on surface roughness were made with analysis of variance.</p>
<p>Keywords:</p> <p>7075 Aluminium, surface roughness, feed rate, cutting depth, ANOVA</p>	

1. GİRİŞ

Talaşlı şekillendirme ile imalat, uzun senelerden beri yaygın kullanılan bir imalat yöntemidir. Genel olarak üretilen parçalar nihai kullanım alanı bulduğu için yüzey kalitesi önem arz etmektedir. Talaşlı üretim yöntemlerinden biri olan tornalama işlemi makine, otomotiv ve uçak endüstrisinde sıkça kullanılmaktadır. Tornalama işlemi bir bitirme işlemi olmasa da diğer işlemlere geçiş işlemi olduğundan; imal edilen parçaların yüzey kalitesine dikkat edilmesi gerekir. İş parçası çok hızlı ilerlerse kesme ucu kırılabilir veya yeterli talaş derinliği verilmezse işlemi tamamlamak için birkaç paso gerekecek, bu da daha çok zaman kaybettirecektir. Bu nedenle kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği her tornalama işleminde dikkate alınması gereken en önemli üç faktördür [1].

Alüminyumun endüstriyel çapta üretimi çok kolaylaşmış ve bu en genç metal, demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur. Alüminyum kullanımının hızla yaygınlaşmasının nedenleri; demir ve bakırdan 3 kez hafif olması ve ağırlık oranları dikkate alındığında bakıra nazaran daha iletken olmasıdır. Talaşlı imalat alanında kullanılan alüminyum malzemelerin birçoğu alaşımlıdır. Saf alüminyumun oldukça zayıf ve sünek bir malzeme olmasından dolayı kullanım alanı sınırlıdır [2].

Günümüzde artık otomotiv, uçak, silah, eşya, uzay, inşaat vb. sanayinin birçok alanında alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Dünyada ve ülkemizde birçok üstün özelliğinden dolayı alüminyum kullanımı giderek fazlalaşmaktadır. Artık sanayide alüminyum alaşımlarının kullanımı demir-çelik kullanımıyla yarışmaktadır. Alüminyumun eşsiz özellikleri bu metalin endüstrisinin hızlı büyümesine sebep olmuştur. Bu özellikler alüminyumu çok yönlü mühendislik ve yapı malzemelerinden biri yapmaktadır. Alüminyumun elektrik ve ısı iletkenliği yüksektir. Ayrıca yüksek bir ısı ve ışık yansıtmasına sahiptir. Korozyon direnci oldukça iyidir.

İşlenmiş yüzeylerde, işleme yöntemi ne olursa olsun yüzey pürüzlülüğünün oluşması kaçınılmazdır. İşleme metodu, kesicinin cinsi ve işlenen malzemeye bağlı olarak, işleme sırasında fiziksel, kimyasal ve ısıl faktörlerle, kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareketlerin de etkisiyle işlenmiş yüzeylerde, genellikle istenmediği halde bazı izler oluşur. Nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denir [3].

Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır [4-11]. Inconel 718 süper alaşımının CNC tornada işlenmesinde, kaplama malzemesi, kesici takım geometrisi ve kesme hızının işlenebilirlik özelliklerine etkisini incelemişlerdir [11]. İlerleme miktarı ve talaş derinliği sabit tutularak, beş farklı kesme hızı uygulanmıştır. Kesme hızı artınca kesme kuvveti azalmış, fakat yüzey pürüzlülüğü artmıştır. 6351-T6 alüminyum alaşımının tornada işlenmesinde, elmas kaplı karbür, sementit karbür ve çok kristalli elmas (PCD) olmak üzere üç farklı kesici takım kullanarak, bitirme yüzeyi kalitesi, kesme kuvvetleri ve işleme sıcaklığını araştırmışlardır [12]. Deneyler sonunda, kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin düştüğü, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin artmasıyla yükseldiğini tespit etmişlerdir. Korkut vd. [13] tarafından yapılan bir başka çalışmada ise; sinterlenmiş karbür esici takım kullanarak AISI 304 östenitik çeliğin tornalanmasında kesme hızının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırmışlardır. Çakır vd. [14] ise yaptıkları çalışmada, soğuk iş takım çeliğinin tornada işlenmesinde kaplama malzemesi ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerini değerlendirmek için matematiksel bir model oluşturmuşlardır.

Bu çalışmada, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve kesici takıma olan etkilerinin anlaşılması için, ilk önce farklı kesme parametreler içeren deneyler gerçekleştirilecektir. Bu parametrelerin etkisi analiz

yöntemleriyle irdelenip en çok etki eden parametre belirlenecek ve bu değişkenin takım aşınmasına olan etkisi araştırılacaktır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. İş Parçası Malzemesi

Talaş kaldırmada işlemlerinde iş parçası malzemesi olarak 7075 alüminyum alaşımı seçilmiştir. 7075 alüminyum alaşımının en önemli özelliği yüksek mukavemeti, korozyon direnci ile hafifliğidir. Mukavemetin önemli olduğu havacılık, gemi sanayii, otomotiv endüstrisi ve ordu donanım malzemesi olarak kullanılır. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Deneyde kullanılan 7075 Alüminyum iş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz (%Ağırlık)								
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
Ölçülen değerler	0,34	0,42	1,58	0,23	2,41	5,65	0,02	0,23

2.2. Kesici Takım ve Takım Tezgâhı

Kesici uç olarak Böhler firması tarafından üretilmiş TCGT 16T308-270 kodlu kaplamasız tungsten karbür uç kullanılmıştır. Kesici takım uç çapı 0.8 mm’dir. Deney çalışmalarında Tezsan firmasına ait SN50 üniversal torna tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 1). Bu çalışmada kullanılan parçalar 1000* Ø 80 mm ölçülerine sahip malzemelerdir.



Şekil 1. Universal torna tezgahı

2.3. Test Ekipmanları

Deney numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo SJ-301 marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Ra (ortalama yüzey pürüzlülük değeri) kullanılmıştır.

Ölçümden önce deney numunelerinin yüzeyi basınçlı hava ile temizlenmiş ve yüzey pürüzlülük cihazı kalibre edilmiştir. Ölçme işlemi işleme yönüne paralel olarak yapılmıştır. Her bir yüzey için 5 farklı bölgeden ölçüm yapılarak, sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır. İş parçası üzerinde dökümden kaynaklanan pürüzlülüklerin meydana getirdiği, aynı yüzey için diğer ölçümlerle paralellik göstermeyen sonuçlar yok sayılarak ortalamaya katılmamıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler takım tutucuya kesici uç bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Tornalama işlemlerinde, soğutma sıvısı kullanılmamıştır. Her bir parametrenin

etkisini belirlemek için toplam 36 adet deney yapılmıştır. Kesme parametrelerinin seçiminde, kesici takım firmasının tavsiye ettiği ideal kesme şartları, daha önce yapılmış deneysel çalışmalar ve tezgâh teknik bilgileri dikkate alınmıştır. Deneylerde üç değişik kesme hızı, talaş derinliği ve dört farklı ilerleme miktarı parametre olarak belirlenmiştir. Buna göre; ilerleme değeri (F_z): 0,1-0,15-0,2-2,25 mm/diş; talaş derinliği (ap): 0,3-0,6-0,9 mm; kesme hızı (V_c): 90-250-500 m/dak seçilmiştir.

Tablo 2. Deneylerde kullanılan kesme parametrelerine göre elde edilmiş sonuçlar

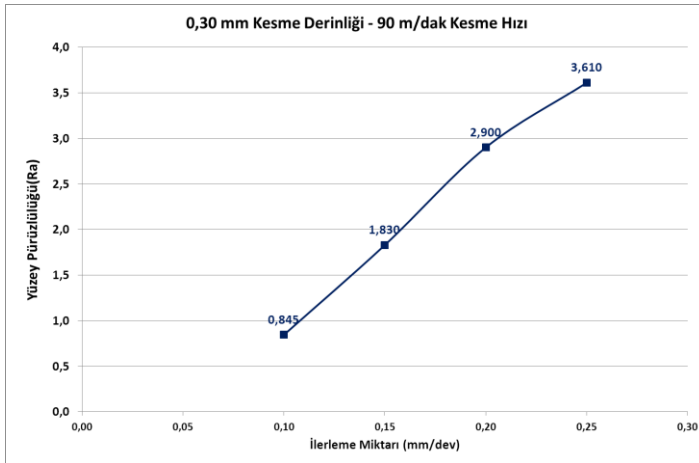
Deney No	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme Miktarı (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dak)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)
1	0,3	0,1	90	0,845
2	0,3	0,15	90	1,830
3	0,3	0,2	90	2,900
4	0,3	0,25	90	3,61
5	0,3	0,1	500	0,419
6	0,3	0,15	500	0,912
7	0,3	0,2	500	1,447
8	0,3	0,25	500	2,14
9	0,3	0,1	250	0,679
10	0,3	0,15	250	1,479
11	0,3	0,2	250	2,350
12	0,3	0,25	250	3,08
13	0,6	0,1	90	0,970
14	0,6	0,15	90	2,110
15	0,6	0,2	90	3,350
16	0,6	0,25	90	4,07
17	0,6	0,1	500	0,482
18	0,6	0,15	500	1,050
19	0,6	0,2	500	1,667
20	0,6	0,25	500	2,37
21	0,6	0,1	250	0,78
22	0,6	0,15	250	1,70
23	0,6	0,2	250	2,70
24	0,6	0,25	250	3,51
25	0,9	0,1	90	0,972

26	0,9	0,15	90	2,14
27	0,9	0,2	90	3,36
28	0,9	0,25	90	4,05
29	0,9	0,1	500	0,482
30	0,9	0,15	500	1,053
31	0,9	0,2	500	1,69
32	0,9	0,25	500	2,39
33	0,9	0,1	250	0,80
34	0,9	0,15	250	1,71
35	0,9	0,2	250	2,75
36	0,9	0,25	250	3,54

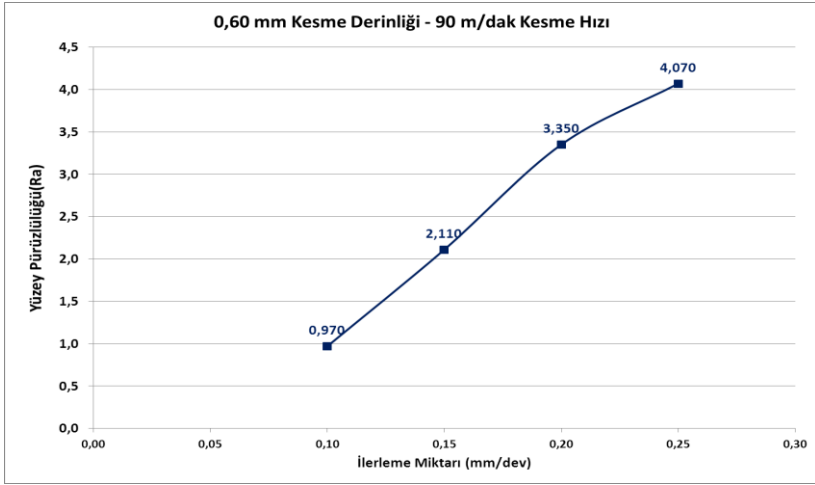
Yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin incelenmesi için toplamda 36 adet farklı deney gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Her bir parametrenin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

3.1 İlerleme Miktarının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

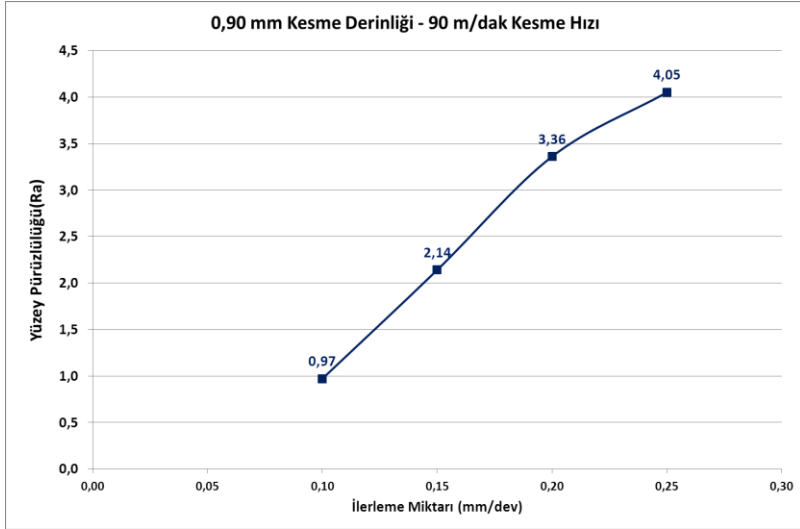
İlerleme miktarı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelendiğinde tüm kesme şartında yüzey pürüzlülüğü, ilerlemenin artmasıyla artmış, azalmasıyla azalmıştır. Değişik kesme şartlarında ilerleme miktarına bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri Şekil 2-5’de verilmiştir.



Şekil 2. İlerleme miktarıyla Ra değeri arasındaki değişim ($ap=0,3$ mm, $Vc=90$ m/dak)



Şekil 3. İlerleme miktarıyla Ra değeri arasındaki değişim ($ap=0,6$ mm, $V_c=90$ m/dak)



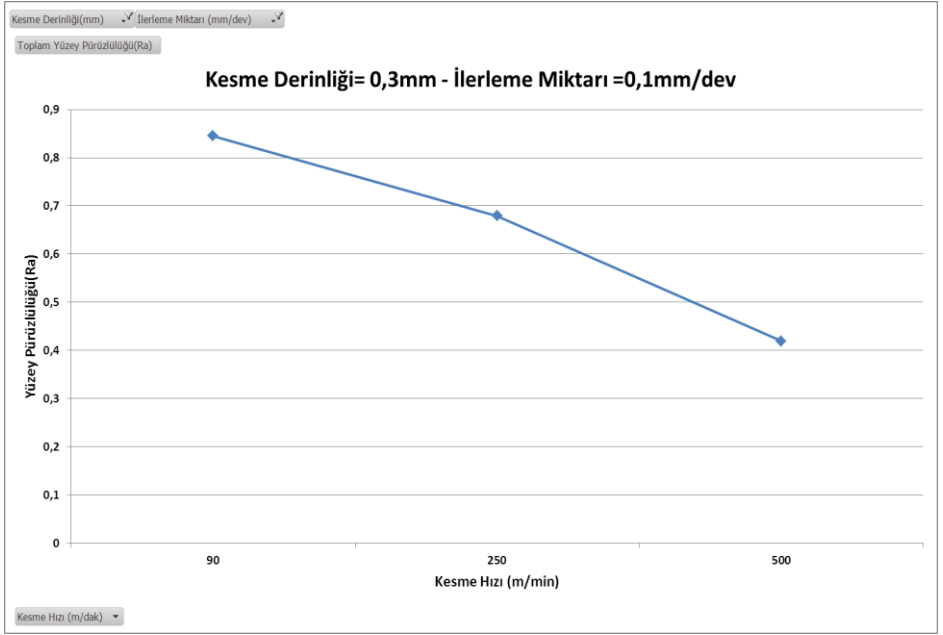
Şekil 4. İlerleme miktarıyla Ra değeri arasındaki değişim ($ap=0,9$ mm, $V_c=90$ m/dak)

İlerleme hızı 0.1 mm/dev olduğunda yüzey pürüzlülüğü en düşük değerini almıştır. İlerleme değeri %50 artırıldığında yüzey pürüzlülüğünde %118'e varan artışlar olmuştur. İlerleme değeriyle ortalama yüzey pürüzlülüğü arasında lineer bir artış söz konusudur (Şekil 2-5). Yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,845 ile 4,05 μm arasında değişmektedir. İlerleme değeriyle yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki tüm grafikler için aynıdır. İlerleme değeri arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Elde edilen en düşük yüzey pürüzlülük değeri ilerleme hızı 0,1 mm/dev için elde edilmiştir. 0,25 mm/dev ilerleme hızı için en büyük yüzey pürüzlülük değeri gözlemlenmiştir. Fakat bu parametrenin etkisinin diğer kesme parametrelerine göre nasıl değiştiği irdelenmelidir. Kesme parametrelerinin etkileri ileriki bölümlerde analiz yöntemleriyle gerçekleştirilecektir.

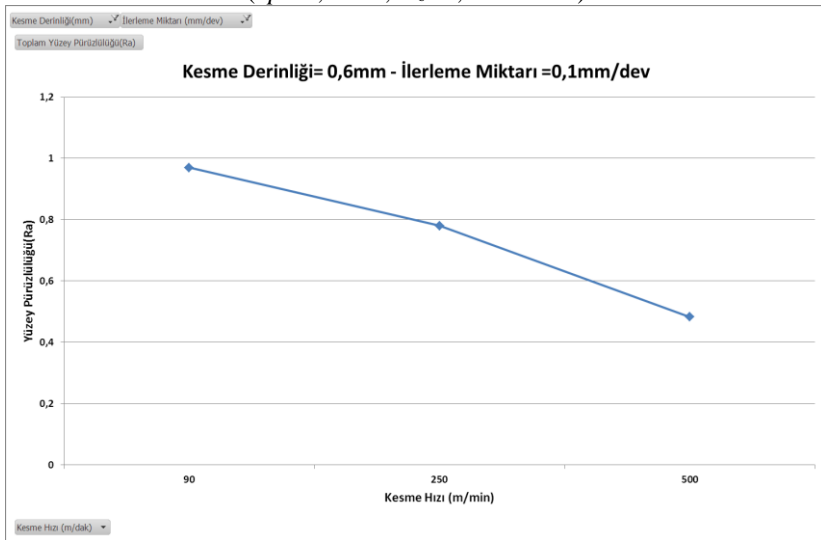
3.2 Kesme Hızının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Yapılan deneysel çalışmalarda, 90 m/dak, 250 m/dak ve 500 m/dak olmak üzere üç farklı kesme hızı kullanılmıştır. Değişik kesme şartlarında elde edilmiş, kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri Şekil 5-7'de görülmektedir. Kesme hızıyla yüzey pürüzlülüğü arasında ters orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü azalmıştır.

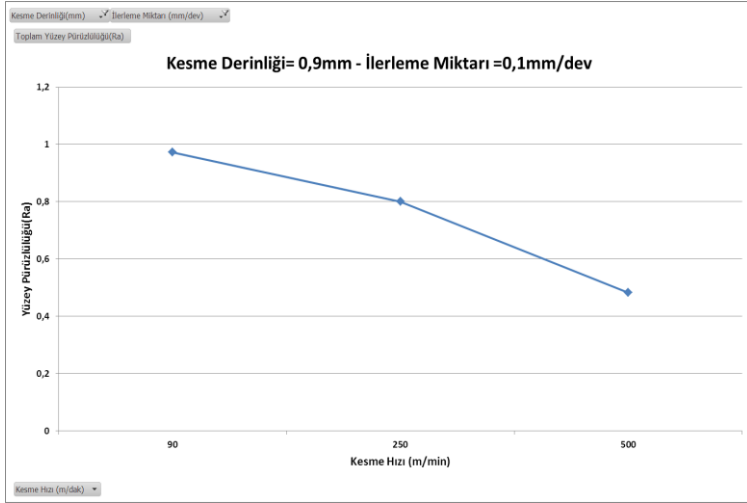
Araştırmacılar artan kesme hızıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerinin azalmasını, hız artışıyla birlikte takım talaş temas uzunluğunun kısılmasına ve kesme kuvvetlerinin azalmasına, bu yüzden de deformasyonların küçülmesine bağlamışlardır. Ghani ve Choudhury [9] ise yaptığı çalışmada, farklı olarak kesme hızının artırılmasıyla yan kenar aşınmasının hızlandığını ve böylece yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmiştir.



Şekil 5. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün kesme hızına bağlı olarak değişimi ($ap=0,3$ mm, $F_z=0,1$ mm/dev)



Şekil 6. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün kesme hızına bağlı olarak değişimi ($ap=0,6$ mm, $F_z=0,1$ mm/dev)



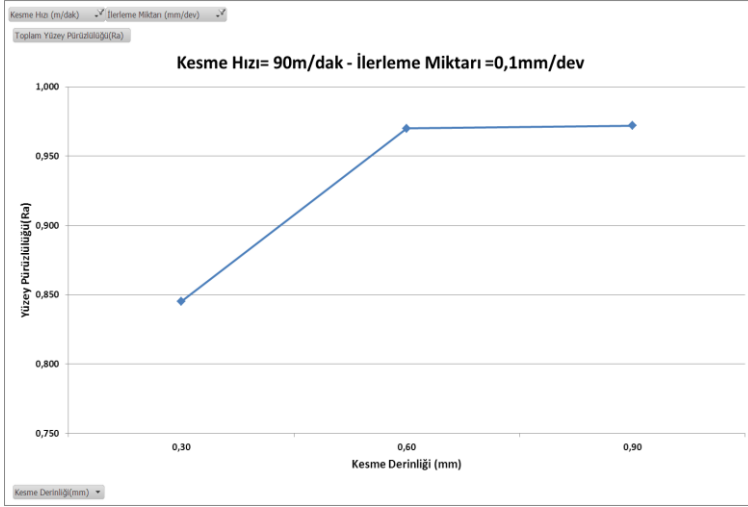
Şekil 7. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün kesme hızına bağlı olarak değişimi ($ap=0,9$ mm, $F_z=0,1$ mm/dev)

Kesme hızındaki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmektedir. Bu azalma seçilen tüm kesme derinliği ve ilerleme değerlerinde görülmüştür. En küçük kesme ve ilerleme değerleri varken kesme hızında 90 m/dak'dan 250 m/dak'ya artışta yüzey pürüzlülüğü %20 oranında azalmaktadır. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne olan etki oranı ileriki bölümlerde irdelenecektir.

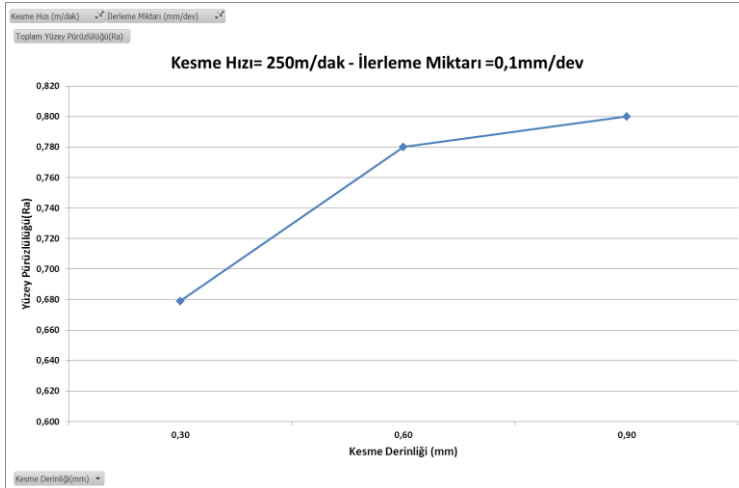
3.3 Kesme Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Kesme derinliği tormalama işlemlerinde üç önemli işlem parametresinden bir tanesidir. Bu çalışmada 0,3, 0,6 ve 0,9 mm olmak üzere üç farklı kesme derinliği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı Şekil 8-10'da görülmektedir. Bu nedenle, yapılan işleme göre kesme derinliği seçilmelidir. Genelde kesme derinliği %100 artırıldığında yüzey pürüzlülüğü %14 artmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğü, 0,3 mm kesme derinliği için bulunmuştur. Ancak kesme

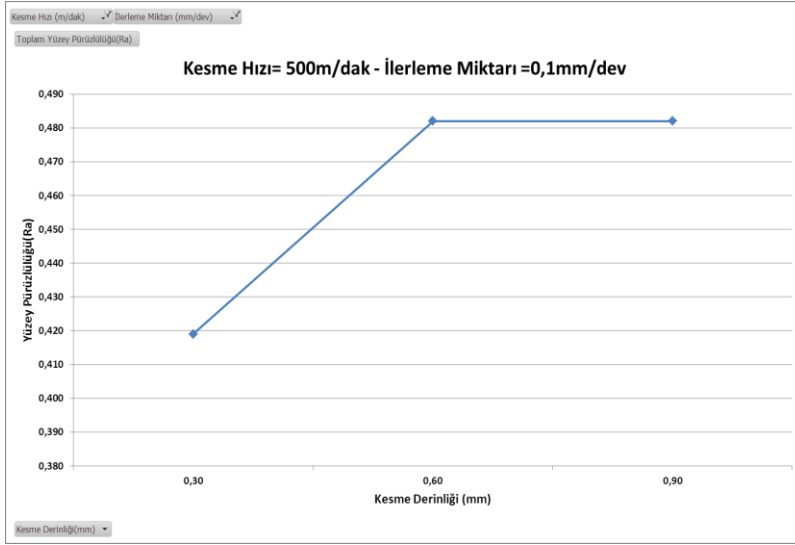
derinliğinin etkisi ilerleme hızı kadar yoktur. İşleme zamanını azaltmak ve dolayısıyla talaşlı imalat işleminin maliyetini düşürmek için diğer faktörlerin müsaade ettiği durumlarda yüksek kesme derinliği seçilmelidir.



Şekil 8. Kesme derinliğine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değişimleri ($V_c=90$ m/dak, $F_z=0,1$ mm/rev)



Şekil 9. Kesme derinliğine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değişimleri ($V_c=250$ m/dak, $F_z=0,1$ mm/rev)



Şekil 10. Kesme derinliğine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değişimleri ($V_c=500$ m/dak, $F_z=0,1$ mm/rev)

3.4 Deney Sonuçlarının Analizi

Deney sonuçlarının analizi ANOVA (Varyans Analizi) ile yapılmıştır. ANOVA istatistik bilim dalında, gözlemlenen varyansı çeşitli kısımlara ayırma yöntemiyle, bazı değişkenlerin başka bir değişken üzerindeki etkisini incelemeye yarayan bir grup modelleme türü ve bu modellerle ilişkili işlemlere verilen genel isimdir. Bu tür modeller gözlemlenen varyansın çeşitli açıklayıcı değişkenlerin etki parçalarına bölmesini incelerler.

Varyans analizi ile hangi işlem üzerinde hangi faktörlerin ne derecede etkili oldukları istatistiksel olarak ortaya konur. Varyans analizinde amaç, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerlerini ne oranda etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe neden olduklarını ortaya koyabilmektir.

Deneyler sonucunda kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri için Design Expert programını kullanılarak ANOVA

analizleri yapılmıştır. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Dependent variable:	Ra				
Factors:					
	ilerleme				
	kesme derinligi				
	kesme hizi				
Number of complete cases:	36				
Analysis of Variance for Ra					
Source	Sum of Square	Df	Mean Square	Var. Comp.	Percent
TOTAL	42,0882	36			
ilerleme	31,4953	3	10,4984	1,12049	73,02
kesme derinligi	0,655302	8	0,0819128	0,0	0,0
kesme hizi	9,93761	24	0,414067	0,414067	26,98

Tablo 3 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrenin en önemlisinin ilerle değeri olduğu görülmüştür. İlerle değerinin yüzey kalitesine etkisi %73,02 olarak bulunmuştur. Kesme hızının etkisi ise %26,98’dir. Kesme derinliğinin etkisi ise yoktur. ANOVA analizinde anlaşılacağı gibi yüzey pürüzlülüğüne etkileyen en büyük parametre ilerleme değeridir. Etki oranı kesme hızına göre yaklaşık üç kattır. Bu analiz sonucuna göre kesme derinliğinin yüzey kalitesine olan etkisi ihmal edilebilir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, karbür takımlarla tormalama işlemi ile 7075 alüminyum alaşımı iş parçası malzemesi işlenmiştir. İlerle miktarı, kesme hızı ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisini belirlemek amacıyla toplam 36 adet deney yapılmıştır. Kesme parametrelerin etki analizi ise ANOVA analizi yapılmıştır. Genel olarak elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Bütün kesme şartlarında ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Elde edilen verilere göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre ilerleme miktarı olmuştur. Bitirme işlemlerinde düşük yüzey pürüzlülüğü elde etmek için en etkili yöntem ilerleme miktarının azaltılmasıdır.
- Kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Kesme hızı artışıyla birlikte kesme kuvvetleri küçülmüş ve işlenen yüzeydeki deformasyonlar azalmıştır.
- Talaş derinliği ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmüştür. Talaş derinliğinin artmasıyla bütün kesme şartlarında yüzey pürüzlülük değerinde artış olmuştur. Yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkiyi yapan parametreler sırasıyla ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliği olmuştur.
- ANOVA analizi sonucu yüzey pürüzlülüğüne etki yapan en büyük parametre ilerleme değeri olarak bulunmuştur. Bu analiz sonucuna göre kesme derinliğinin etkisi ihmal edilebilir.
- İş parçası yüzey kalitesi için kesme hızını arttırmak gerekmektedir. Bu sayede kesici takımındaki yapışma oranı azalmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Şahin, Y.,Talaş Kaldırma Prensipleri 1, Nobel Yayın Dağıtım, 2000,196, 562s.
2. Çakır, M.C., Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Nobel Yayın Dağıtım,Ankara,2006, 993,267s.
3. Güllü, A.,Silindirik Taşlamada İstenen Yüzey Pürüzlülüğünü Elde Etmek İçin Taşlama Parametrelerinin Bilgisayar Yardımıyla Optimizasyonu, Gazi Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 152s, 1995.

4. Işık, Y., Çakır, M.C., Hız Çeliği Takımlar İçin Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlüğüne Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Teknoloji Dergisi, (2)1, 111-118,2001.
5. Çiftçi, İ., Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenmesinde Kesici Takım Kaplamasının ve Kesme Hızının Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi, Gazi Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, (12)20, 205-209,2005.
6. Güllü, A., Özdemir, A., Prizmatik Parçaların Frezelenmesinde Kesme Parametreleri ile Yüzey Pürüzlüğü Arasındaki İlişkilerin Deneysel Olarak Bulunması, Gazi Ü. Fen Bilimleri Dergisi, (1)16, 127-134,2003.
7. Yousefi, R., Ichida, Y., A Study on Ultra-High-Speed Cutting of Aluminium Alloy: Formation of Welved Metal on the Secondary Cutting Edge of the Tool and Its Effects on the Quality of Finished Surface, Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 24, 371-376,2000.
8. Lin, S.C., Chang, M.F., A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 763-782,1998.
9. Chen, C.C.A., Liu, W.C., Duffie, N.A., A surface topography model for automated surface finishing, International Journal of Machine Tools and Manufacture,(38), 543-550,1998.
10. Ghani, A.K., Choudhury, I.A., Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. J. Mater. Process. Technol. (127),2002, 17-22s.
11. Diniz, A.E., Filho, J.C., Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process. Wear (232),1999, 67-75s.

12. Nalbant, M., Altın, A., Gökkaya, H., The Effect of Coating Material and Geometry of Cutting Tool and Cutting Speed on Machinability Properties of Inconel 718 Super Alloys, *Materials and Design*, 28, 1719-1724, 2007.
13. Reis, D.D., Abrao, A.M., The Machining of Aluminium Alloy 6351, *Engineering Manufacture*, 219 (1), 27-33, 2005.
14. Korkut, I., Kasap, M., Ciftçi, I., Seker, U., Determination of Optimum Cutting Parameters During Machining of AISI 304 Austenitic Stainless Steel, *Materials and Design*, 25, 303-305, 2004.
15. Çakır, M.C., Ensarioğlu, C., Demirayak, I., Mathematical Modeling of Surface Roughness for Evaluating the Effects of Cutting Parameters and Coating Material, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 102-109, 2009.

Ferrokrom Cürufunun Mikro Ölçekli Abrazyon Testi İle Aşındırma Özelliklerinin Araştırılması

Azmi ERDOĞAN^{1*}, Mustafa Sabri GÖK², Fikret KOCABAŞ³

¹ Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın

² Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın

³ Bartın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bartın

Yayın Bilgisi

Geliş Tarihi: 05.03.2014
Revizyon Tarihi: 08.04.2014
Kabul Tarihi: 10.04.2014

Anahtar Kelimeler

Ferrokrom Cürufu, Mikro Abrazyon, Top Krater Testi.

Keywords:

Ferrochromium Slag, Micro Abrasion, Ball Crater Test.

Özet

Bu çalışmada endüstriyel bir atık olan ve ferrokrom üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkan ferrokrom cürufunun aşındırıcı özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Aşınma deney yöntemi olarak mikro-abrazyon yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla tozlar mikro-abrazyon testlerine uygun olacak şekilde boyutlandırılmış ve solüsyon haline getirilmiştir. Testler düşük karbonlu çelik, alüminyum, bakır ve yüksek hız takım çeliği gibi farklı malzemeler üzerinde yapılmıştır. Deneylerde cürufun aşındırma özelliklerinin değerlendirilebilmesi için SiC ve Al₂O₃ tozları ile de numuneler mikro-aşınma testlerine tabi tutulmuşlardır. Deneyler sonucunda oluşan aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile krater çapları ise optik mikroskop ile ölçülmüştür. Deneyler sonucunda cürufun aşındırma özelliğinin olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of Abrasion Properties of Ferrochromium Slag with Micro-Scale Abrasion Test Abstract

This study was carried out as an attempt to define the abrasive characteristic of ferrochromium slag, which is an industrial waste produced as a residual product during ferrochromium production. Micro-abrasion method was used as abrasion test method. For this purpose slag powder was sized in accordance with micro-abrasion tests and solutionized. Tests were carried out on diverse materials such as low carbon steel, aluminum, copper and high-speed tool steel. Specimens were also subjected to micro-abrasion tests using SiC and Al₂O₃ powders as an attempt to evaluate abrasive characteristic of the powder. Abrasion marks generated during the tests were then measured using electron scanning microscope (SEM) and crater diameters were measured using optical microscope. After the tests, it was concluded that the slag has an abrasive characteristic.

1.GİRİŞ

Teknik anlamda cisimlerin yüzeylerinde mekanik etkenlerle küçük boyutlu taneciklerin sınırlı miktarlarda ama sürekli olarak kopup ayrılması sonucu malzemede istenilmeyen değişikliğin meydana gelmesi olayına aşınma denir ve tarihi de çok eski zamanlara kadar dayanmaktadır [1-4]. İlerleyen teknoloji ile birlikte malzeme bilimciler isteklere cevap verecek nitelikte yeni nesil malzemeler üretmeye mecbur kalmışlardır. Günümüzde de aşınma probleminin giderilmesi ya da en aza indirilmesi için sanayi devi ülkeler de önemli araştırma harcamaları yapmaktadır. Aşınma malzemenin kendi özellikleri arasında olmayıp çalıştığı sistemde birbirleriyle etkileşim içerisinde olan yüzeylerde meydana gelen bir durumdur. Bunun için her çalışma ortamında yüksek aşınma direnci gösteren bir malzeme üretmek hem çok zordur hem de ekonomik değildir. Bunun için en iyi çözüm çalışma şartlarına göre uygun optimizasyonların gerçekleştirilmesidir [5].

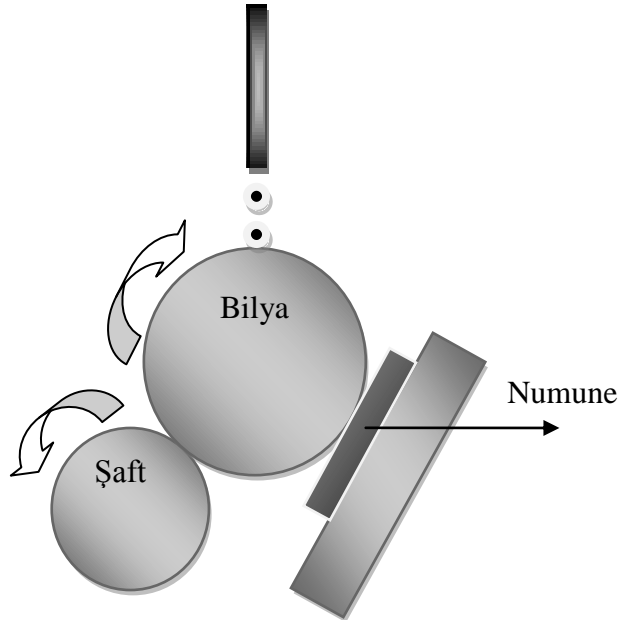
Türkiye ekonomisinin büyümesinde önemli rol oynayan metal üretimi sırasında çok büyük miktarlarda cüruflar ortaya çıkmaktadır. Geri kazanımı gerçekleştirilemeyen cüruflar oluşturduğu çevre sorunlarının yanında, depolama için gerekli alanların tahsis edilmesi için gereken maliyetlerde işletmeleri zor durumda bırakmaktadır. Dünyada cürufların değerlendirilmesi için yapılan birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Yapılan araştırmalara göre cüruflar inşaat sektöründe; dolgu malzemesi, beton agregası, briket ve tuğla yapımında, cüruf yünü, yol temel ve alt malzemesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar genel olarak demir-çelik sektörünün oluşturduğu cüruflar üzerinde durmuş ve diğer cüruflar ile ilgili yoğun bir çalışma genel olarak yapılmamıştır [5].

Bu çalışmada ferrokrom üretim tesisi atığı olan ferrokrom cürufunun aşındırıcı özelliği olup olmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Aşınma testi olarak mikro abrazyon serbest top test yöntemi kullanılmıştır. Bu test yönteminde dönen bir top (genellikle sertleştirilmiş çelik) abrasif süspansiyon

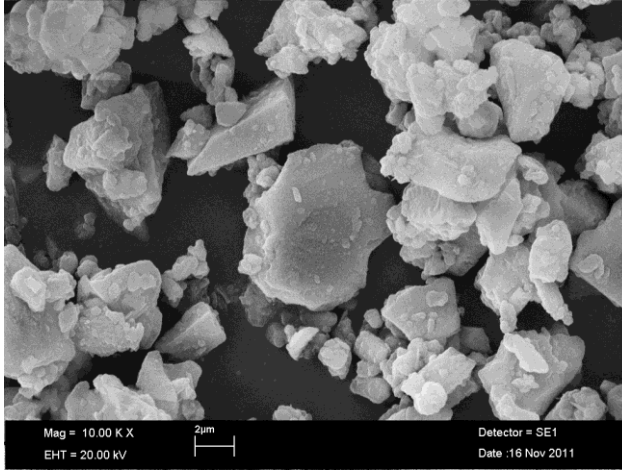
varlığında numune yüzeyine bir yük ile basınç uygular. Aşınma izi kullanılan kürenin yüzeyini tamamlayıcı şekilde olur. Bu iz optik mikroskop ya da profilometre yardımıyla ölçülür [6-14].

2.MATERYAL VE YÖNTEM

Deneylerin gerçekleştirilmesinde (Şekil 1) de şematik resmi verilen serbest top mikro-abrazyon deney düzeneği kullanılmıştır. Deneylerde (serbest top olarak) 1" (25,4 mm) çapında AISI 52100 rulman çeliği ve üç farklı aşındırıcı solüsyon kullanılmıştır. Bunlar ticari olarak satılan SiC ve Al₂O₃ aşındırıcı tozlardır. SiC aşındırıcı tozları 800 mesh tane boyutunda Al₂O₃ tozları ise 1000 mesh tane boyutundadır. Üçüncü toz olarak kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen ferrokrom (FeCr) cürufu Elazığ Ferrokrom İşletmesi'den temin edilmiştir. Ferrokrom cürufunun sertli. Aşındırıcı solüsyon Al₂O₃'ün sertliği 9, Mohs SiC'nin sertliği ise 9-10 Mohs'dur.



Şekil 1. Ball-Crater test düzeneği şematik resmi [5].



Şekil 2. Öğütülmüş ferrokrom cürufunun SEM görüntüsü [5].

Tablo 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan FeCr cürufunun kompozisyonu.

Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CaO
%	31	9	13	1	1	45

FeCr cürufu bilyalı değirmende kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutulmuştur. Sonra eleme işlemine tabi tutularak ve ortalama boyutu ve 20 µm geçmeyecek şekilde aşındırıcı toz elde edilmiştir (Şekil 2). Uygun boyuta getirilen tozlar saf su ile %75'i su %25'i toz olacak şekilde solüsyon hazırlanmıştır. Bu solüsyon test sırasında bir dropper yardımıyla bilya üzerine 20 sn'de bir damlatılmıştır. Bilya üzerine aldığı aşındırıcıyı numune üzerine taşıyarak ve üzerinde kayma oluşturarak aşındırma yapmıştır. Deneylerde üç farklı kayma yolu seçilmiştir. 90, 180, 270 saniye sürelerde yapılan testlerde şaftın devir hızı 160 dv/dk olarak belirlenmiştir. Şaftın bu hızı için bilyada 102.5 rpm dönme hızı elde edilmiştir. Bilyanın bu devri için dış teğetsel hız olarak 0,136 m/sn hızına ulaşılmıştır. Bu hız için de kayma yolu olarak 12,24 m, 24,48 m ve 36,72 m mesafelerinde aşındırma yapılmıştır. Ayrıca 90 sn için 115 ve 230 dv/dk da testler yapılmıştır. 115 dv/dk için 0,098 m/sn, 230 dv/dk için 0,195 m/sn teğetsel hızları elde edilmiştir. Bu devirlerde 8,82 ve 17,55 m

kayma yollarında aşındırma işlemi uygulanmıştır. Aşındırılan malzeme olarak saf alüminyum, bakır, düşük karbonlu çelik ve HSS takım çeliği kullanılmıştır. Aşındırılan malzemelerin sertlik değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Numunelerin sertlik değerleri.

Numune	HSS	Alüminyum	Bakır	Çelik
Sertlik	750 HV	90 HV	120 HV	220 HV

Deneyler sonucunda numuneler ilk olarak optik mikroskop altında incelenmiş ve oluşan kraterlerin çapları ölçülmüştür. Sonra numuneler uygun boyutlara indirilerek SEM ve profilometre analizlerine tabi tutulmuştur. Optik mikroskopta boyutları mikro metre cinsinden ölçülen kraterlerin hacim hesapları yapılmıştır. Kayıp hacim hesaplarının bulunmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır[5].

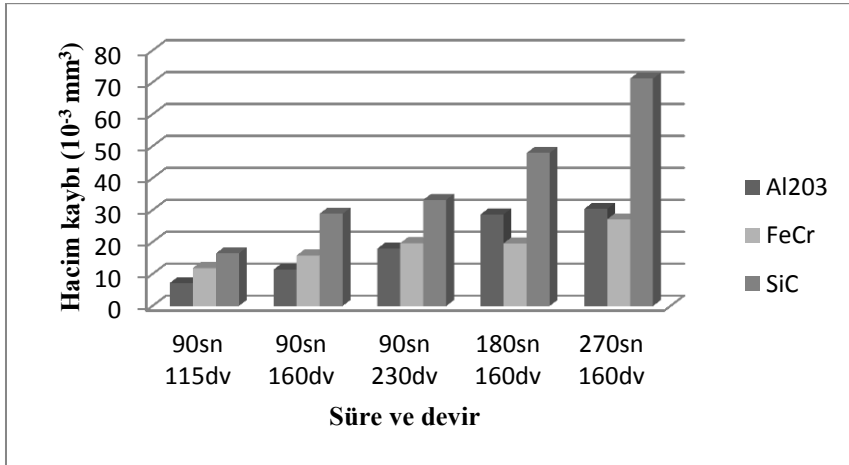
$$V = \pi b^4 / 64 R$$

Bu formülde “V” mm³ cinsinden hacim kaybıdır, “b” mm cinsinden kraterin dış çapıdır ve “R” aşındırma işleminde kullanılan bilyanın yarıçapıdır. Bu formül $b \ll R$ olduğu zaman geçerlidir [6].

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR

Öncelikle artan top devrine bağlı olarak tüm numunelerin hacimsel kayıplarında artış olmuştur. En düşük kayıp 115 d/dk lık hızda gerçekleşirken en yüksek kayıp 230 d/dk’lık hızda gerçekleşmiştir. Bunun sebebini artan top devrine bağlı olarak meydana gelen top çevresel hızının artması ve bunun sonucunda top yüzeyine tutunarak aşındırıcı işlemi gören partiküllerin kesme kuvvetlerinin artması ile ilişkilendirmek mümkündür. Çünkü aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyinde partikül koparabilmesi için iki kuvvete

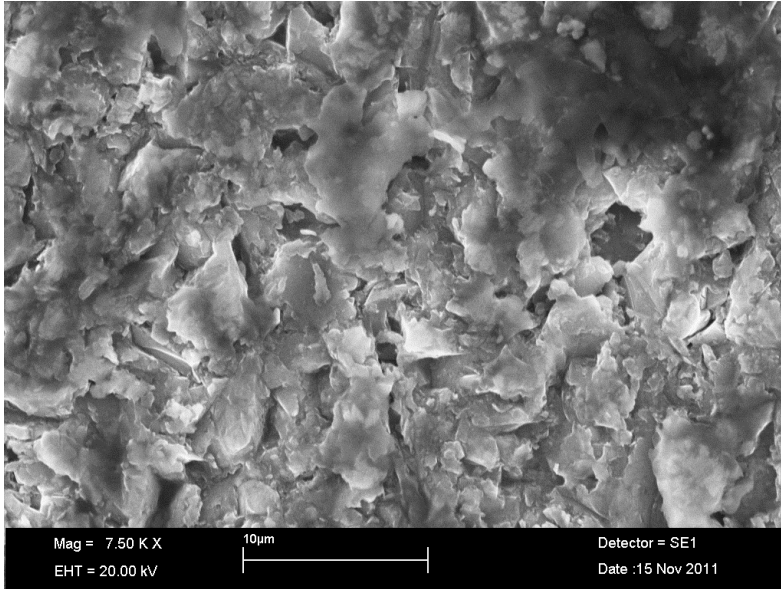
gereksinim vardır. Bunlardan biri partikülün malzemeye batmasını sağlayan basma kuvvetidir. Bu kuvvet 1'' (25,4mm) bilyanın ağırlığı kadardır ve sabit bir parametredir. Diğeri ise malzemeyi keserek yüzeyden ayıran kesme kuvvetidir. Top devrinin artması bilya çevresel hızının artışına sebep olacaktır. Bu da bilyaya yapışmış olan abrasiv partikülün daha yüksek bir hızla malzemeye çarpmasına ve daha fazla atık malzeme transfer olmasına sebep olacaktır. Aşındırıcıya bağlı olarak hacim kayıpları incelendiğinde en yüksek hacim kaybı SiC ile aşındırılan numunede görülmüştür.



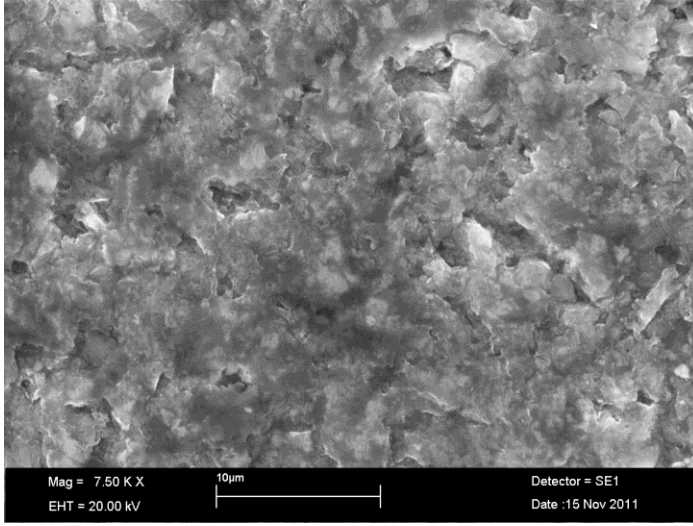
Şekil 3. Alüminyum numuneye ait mikro abrazyon deney sonuçları.

Alüminyum numunelerin aşınma testinden sonra elde edilen aşınma hacim kaybı grafiği Şekil 3' de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere en yüksek aşınma SiC ile aşındırılan numunede görülürken bunu FeCr cürufu ve Al₂O₃ ile aşındırılan numunelerin birbirine yakın kayıplarla takip etmiştir. Alüminyum numunelerin mikro abrazyon testlerinden sonra yüzeylerinden alınan SEM aşınma izi fotoğrafları sırasıyla Şekil 4, 5 ve 6'da verilmiştir. Şekil 4'de SiC ile aşındırılan numunenin fotoğrafı incelenecek olursa tabakasal kopmaya bağlı olan aşırı plastik deformasyon görülmüştür. Bunu aşındırıcının

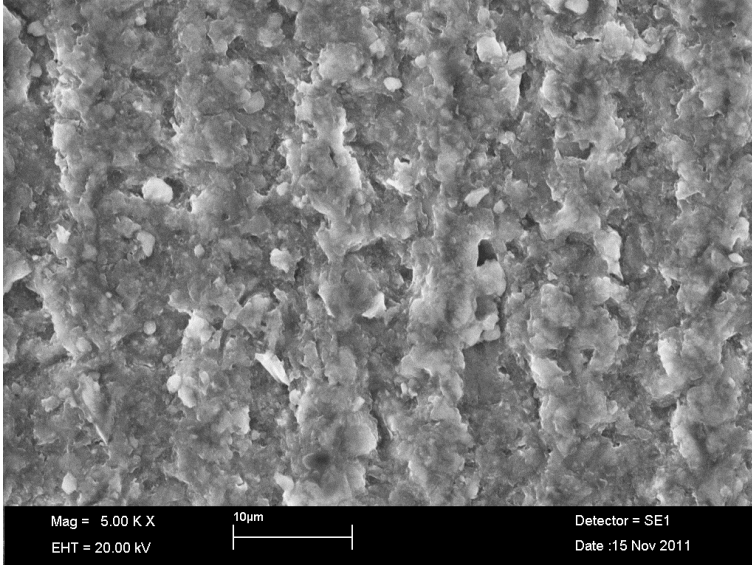
yüksek sertliği ve keskin köşeleri ile ilişkilendirmek mümkündür. Aynı numunenin FeCr cürufu ile aşındırılmış aşınma yüzeyi fotoğrafı incelendiğinde yüzeyin çok daha pürüzsüz ve yerel kopmaların çok az olduğu görülmektedir. Bu durum FeCr cürufu partiküllerinin nispeten düşük sertliğe sahip olmasına (SiC ve Al_2O_3 kıyaslandığında), keskin köşeli olmamasına ve nispeten yuvarlak köşeli olmasına bağlanabilir. Al_2O_3 ile aşındırma işlemine tabi tutulan numune (Şekil 6) incelenecek olursa yüzeyde bir oluklanma olduğu görülmektedir. SiC 'den daha düşük sertliğe sahip Al_2O_3 partiküllerinin bir kısmı bir kama gibi yüzeye saplanarak bilyanın bu partiküller üzerinde hareket etmesini sağlamıştır ve dolayısıyla yük taşıyan bir yatak vazifesi görmüştür. Hareketi kısıtlanan bu partiküller ile serbest hareket edebilen partiküller yüzeyde bir oluklanmaya yani sırt oluşumuna sebep olmuşlardır.



Şekil 4. SiC ile aşındırılmış alüminyum aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.

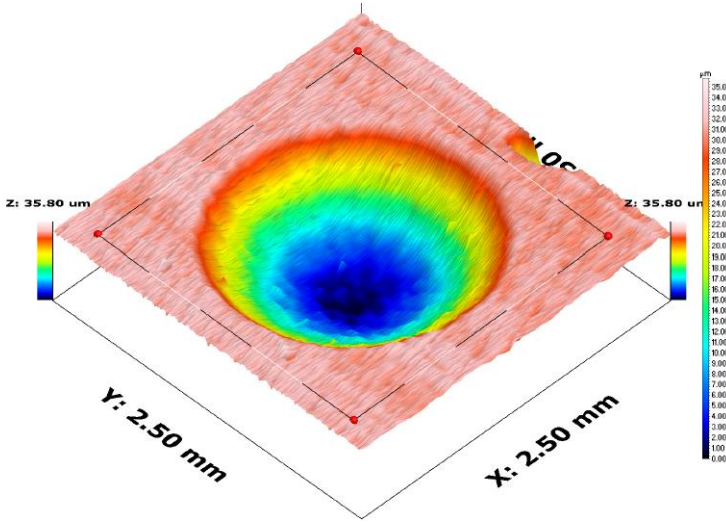


Şekil 5. FeCr cürufu ile aşındırılmış alüminyum aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.

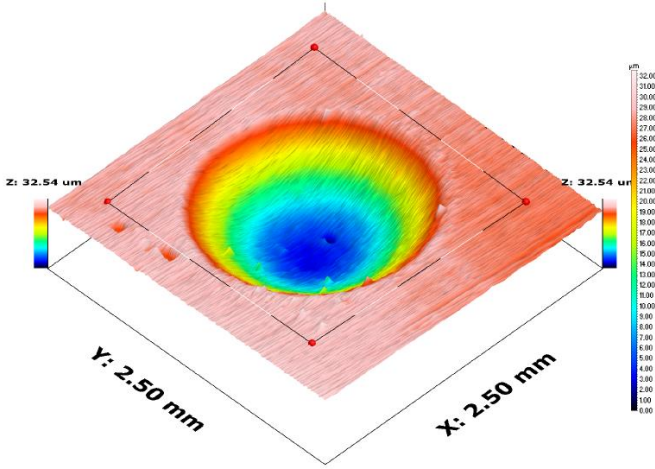


Şekil 6. Al₂O₃ ile aşındırılmış alüminyum aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.

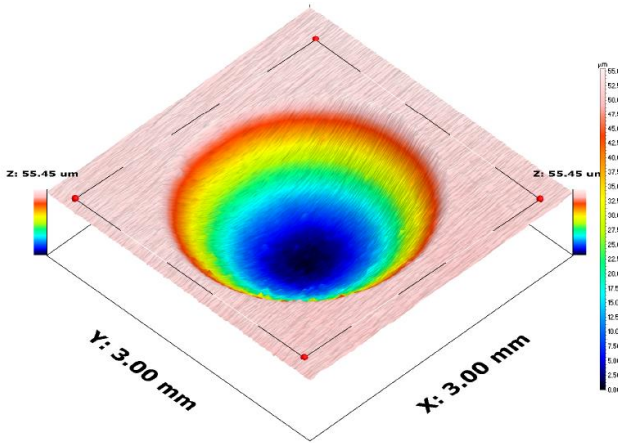
Farklı aşındırıcılarla teste tabi tutulan numunelere ait yüzey profilometreleri (Şekil 7, 8, 9) incelendiğinde en derin izin SiC ile aşındırılan numunede sonra alümina ile aşındırılan numunede en sonda FeCr cürufu ile aşındırılan numunede görülmüştür.



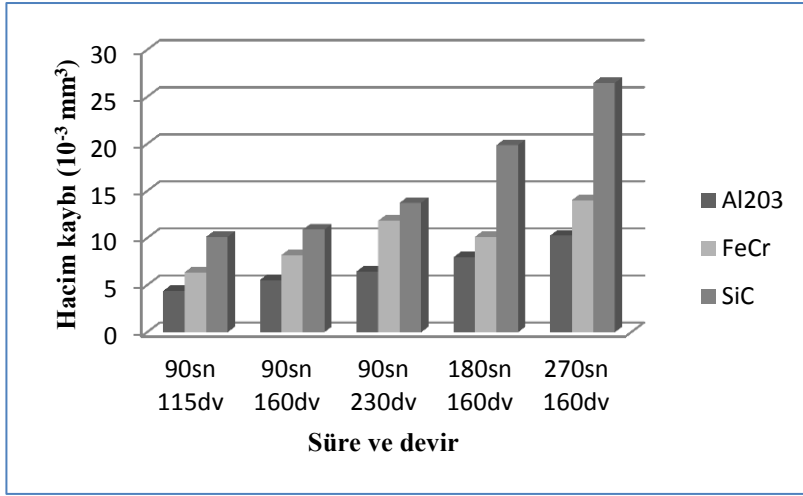
Şekil 7. Al₂O₃ ile 160 dv 270 sn aşındırılmış alüminyum numune yüzey profilometresi.



Şekil 8. FeCr cürufu ile 160 dv 270 sn aşındırılmış alüminyum numune yüzey profilometresi.

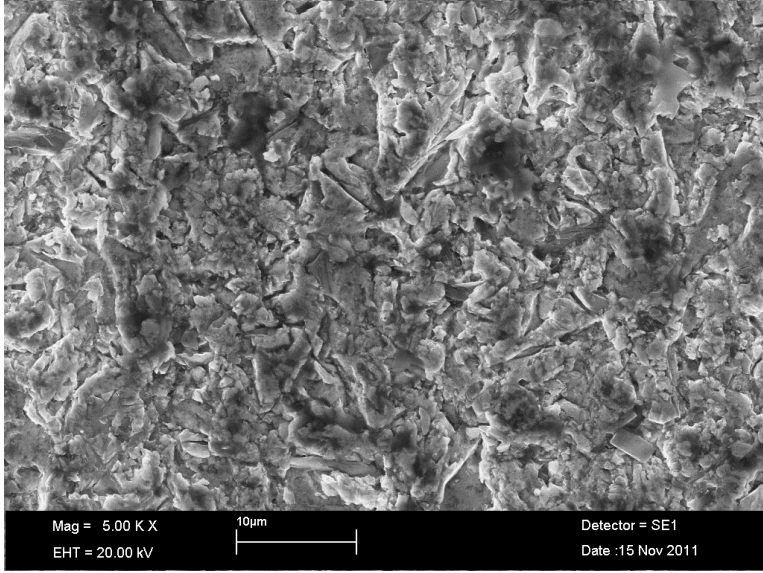


Şekil 9. SiC ile 160 dv 270 sn aşındırılmış alüminyum numune yüzey profilometresi.

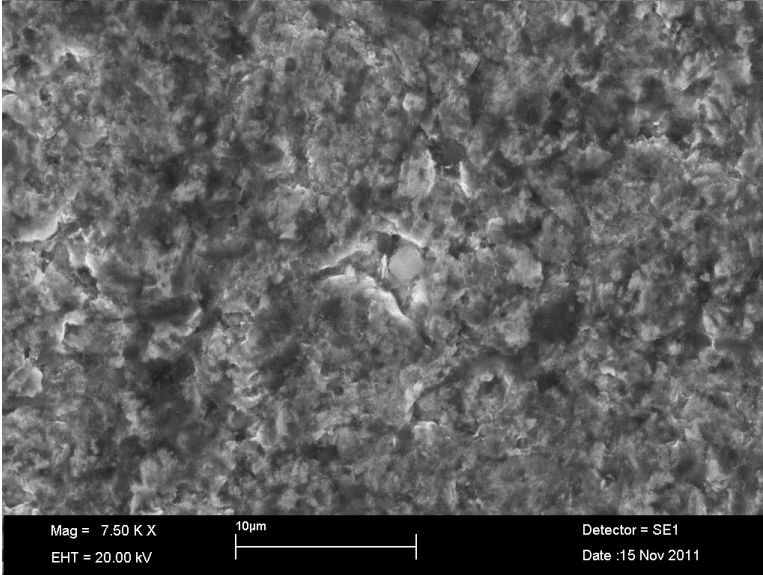


Şekil 10. Bakır numuneye ait mikro abrazyon deney sonuçları.

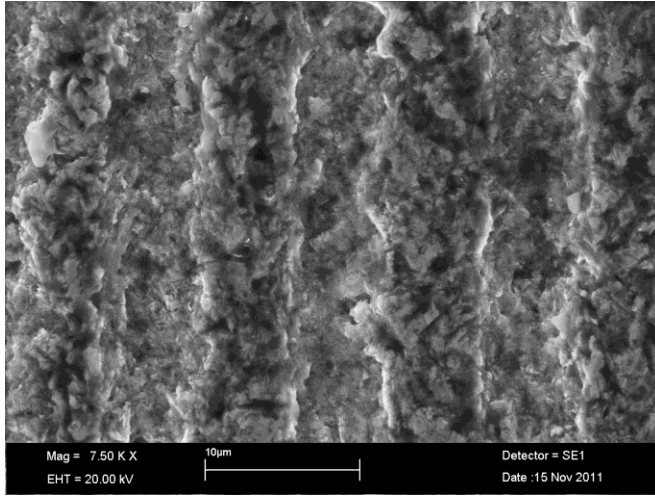
Şekil 10 bakır numune üzerinde üç farklı top dönme devrine bağlı olarak numunelerde meydana gelen hacimsel kayıpları göstermektedir. Bu numunede de artan top devrine bağlı olarak hacim kayıplarında artış olmuştur. Yine en düşük kayıp 115 d/dk'lık hızda gerçekleşirken en yüksek kayıp 230 d/dk lık hızda gerçekleşmiştir. Aşındırıcıya bağlı olarak hacim kayıpları incelendiğinde yine en yüksek hacim kaybı SiC ile aşındırılan numunede görülmüştür. Bunu FeCr cürufu ile aşındırılan numuneler sonra da Al₂O₃ ile aşındırılan numuneler takip etmektedir.



Şekil 11. SiC ile aşındırılmış bakır aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.

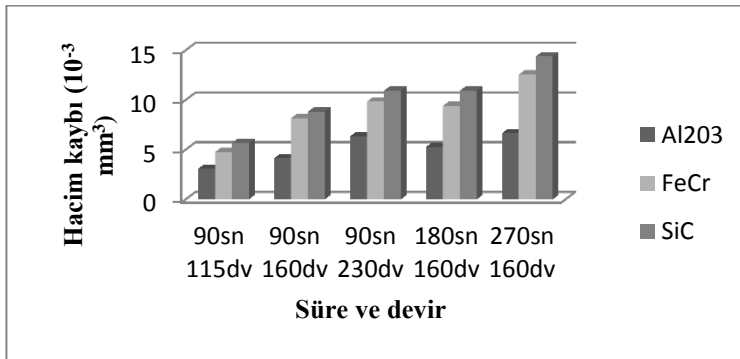


Şekil 12. FeCr cüruhu ile aşındırılmış bakır aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.



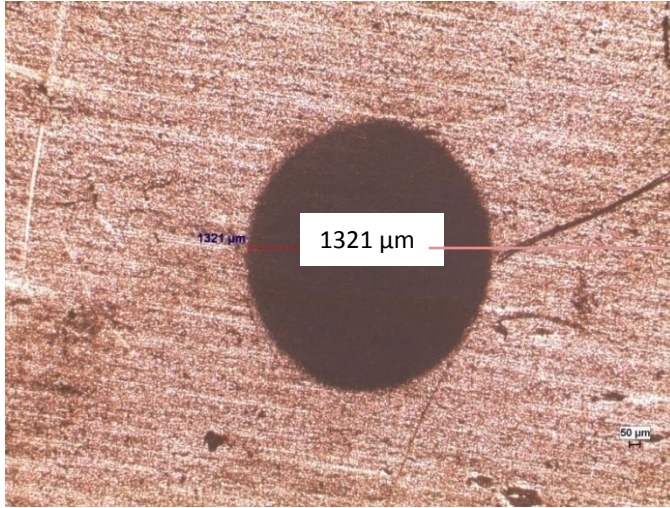
Şekil 13. Al_2O_3 ile aşındırılmış bakır aşınma yüzeyi SEM görüntüsü.

Bakır numunelerin mikro abrazyon testlerinden sonra yüzeylerinden alınan SEM aşınma izi fotoğrafları sırasıyla Şekil 11, 12 ve 13'de verilmiştir. Bu numunelerin aşınma yüzey morfolojileri alüminyum numuneler ile benzerlik göstermektedir. Yine SiC ile aşındırılan bakır numunelerin aşınma yüzeylerinde ayrılma kopartması görülürken FeCr cürufu ile aşındırılan numunelerin yüzeyleri pürüzsüz düzgün bir tabaka sergilemiştir. Al_2O_3 ise yine oluklu bir yapı meydana getirmiştir.

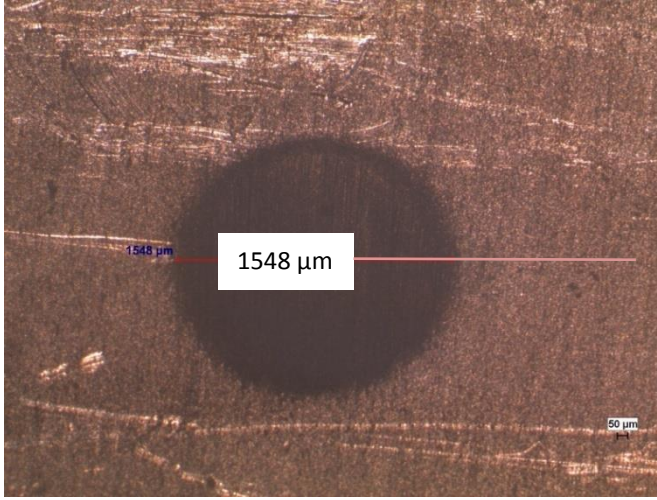


Şekil 14. Çelik numuneye ait mikro abrazyon deney sonuçları.

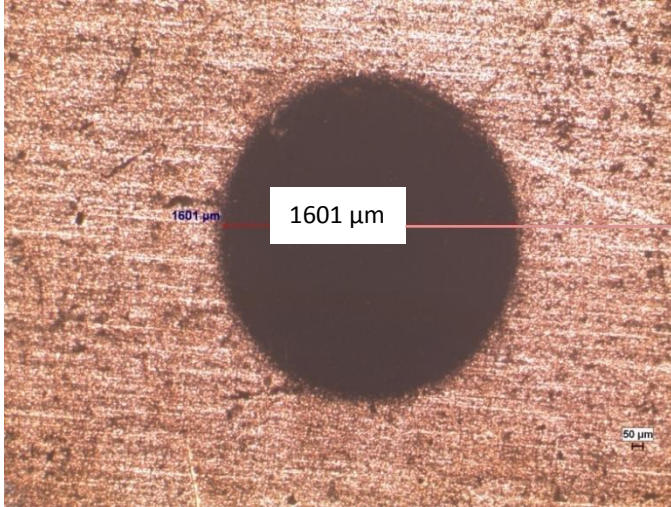
Şekil 14'de düşük karbonlu çelik numuneye ait hacim kaybı grafiği görülmektedir. Numune sertliğinin kayda değer bir şekilde artmasına rağmen aşınma hacim kayıplarının bununla orantılı olarak artmadığı görülmüştür. FeCr cürufunun düşük karbonlu bir çelik üzerinde de alüminyum ve bakır numunelerde olduğu gibi aşındırıcı etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin optik mikroskop krater görüntülerinde bu görülmektedir (Şekil 15, 16, 17). SiC'nin aşındırıcı olarak kullanıldığı numunede en yüksek krater çapı elde edilmiştir. FeCr cürufu ile aşındırılan numunelerde Al_2O_3 ile aşındırılan numunelerden daha yüksek aşınma miktarı görülmüştür.



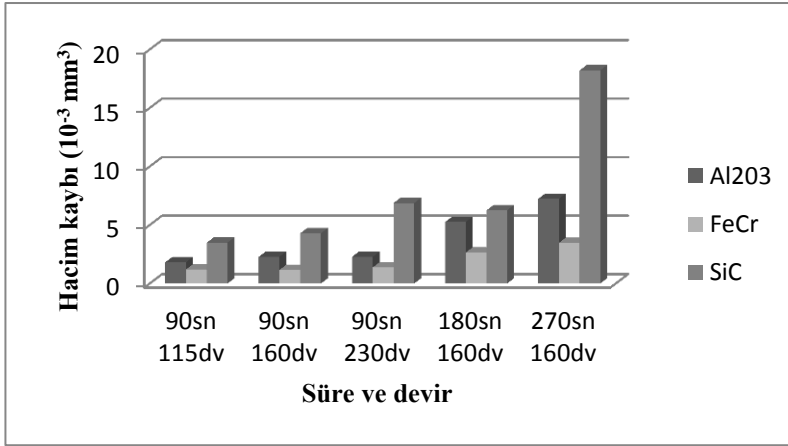
Şekil 15. Al_2O_3 ile 160 dv 270 saniye aşındırılmış çelik numune aşınma krateri.



Şekil 16. FeCr cürufu ile 160 dv 270 saniye aşındırılmış çelik numune aşınma krateri.



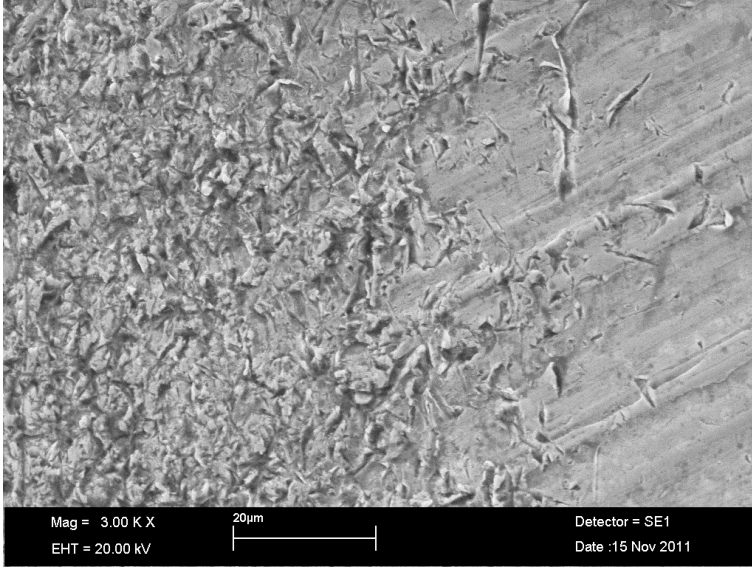
Şekil 17. SiC ile 160 dv 270 saniye aşındırılmış numune aşınma krateri.



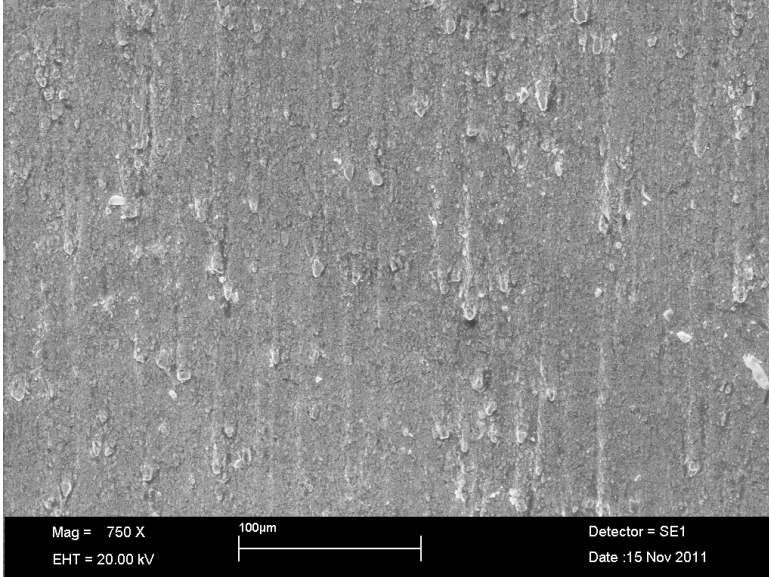
Şekil 18. HSS numuneye ait mikro abrazyon deney sonuçları.

HSS numuneye ait hacim kaybı değerleri Şekil 18’de verilmiştir. Bilindiği gibi HSS çelikleri metalik malzemelerin işlenmesinde kullanılan krom, volfram içeriğine sahip yüksek sertlikteki stratejik çeliklerdir. Diğer aşındırılan malzemelerle kıyaslandığında sertliği yüksektir (Tablo 2). Yukarıda da anlatıldığı gibi aşındırıcı partikülün karşı malzemeyi aşındırabilmesi için yüzeye nüfuz etmesi ve bu yüzey üzerinde hareket etmesi gerekmektedir. Ancak alt yüzeyin yüksek sertliğinden dolayı abrasif partikülün yüzeye batması zorlaşacağı gibi kolay körleşen partiküllerin aşındırma özellikleri kötüleşecektir. Buna bağlı olarak yüzeyde meydana getireceği hasar daha az olacaktır. Bu durum FeCr cürufu ile aşındırılan HSS çeliği üzerinde açıkça görülmüştür.

Numune yüzeyinden alınan sem aşınma yüzey fotoğrafları (Şekil 19 ve 20) incelendiğinde kopma ayrılması SiC ile aşındırılan numunelerde görülürken FeCr cürufu ile aşındırılan numunelerin üzerinde mikro çizilmelere yol açan FeCr cürufu partikülleri görülmüştür.



Şekil 19. SiC ile aşındırılmış HSS çeliği SEM görüntüsü.



Şekil 20. FeCr cürufu ile aşındırılmış HSS çeliği SEM görüntüsü.

4. SONUÇ

Sonuç olarak bu çalışmada bir metal üretim atığı olan ferrokrom cürufunun değerlendirilmesi amacıyla aşındırıcı özelliğinin olup olmadığı Mikro-abrazyon aşınma test yöntemi ile araştırılmıştır. Bu amaçla dört farklı metalik malzeme üzerinde mikro abrazyon testleri yapılmıştır. Ferrokrom cürufunun aşındırma özelliğinin kıyaslanabilmesi için SiC ve Al₂O₃ aşındırıcı tozlar kullanılmıştır.

Numunelerin aşınma morfolojileri incelendiğinde SiC ile aşındırılan tüm numunelerde tabakasal kopmaya bağlı olarak aşırı plastik deformasyon görülmüştür. Al₂O₃ ile aşındırılan alüminyum ve bakır numunelerde yüzeyin yumuşak olması sebebiyle aşındırıcı partiküller yüzeye batarak bir yatak vazifesi görerek oluklanmaya sebep olmuştur. Çelik ve HSS numunede ise yüzeyin sertliği sebebiyle partikül yüzeye batamamış ve daha düz bir yüzey görülmüştür. FeCr cürufu ile aşındırılan numunelerde ise oluklanma ve sırt oluşumu görülmemiş olup aşınma işleminden sonra daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda aşınma uygulanan numuneler arasında en yüksek aşınma direnci yüksek hız takım çeliğinde görülmüş bunu çelik, bakır ve alüminyum numuneler izlemiştir. Bu durum numunelerin sertlikleri ile ilişkilendirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak incelendiğinde SiC aşındırıcı partikülün en fazla aşındırıcı etkiyi gösterdiği belirlenmiştir. Düşük sertlikteki malzemelerde ise ferrokrom cürufu ile Al₂O₃ aşındırıcı partikülün hemen hemen aynı aşındırıcı etkiyi gösterdiği görülmüştür. Ancak yüksek sertlikteki malzemelerde ferrokrom cürufunun etkili aşındırma kabiliyetine sahip olmadığı görülmüştür. Ayrıca ferrokrom cürufunun aşındırıcı top üzerinde belli bir yüzey pürüzlük değerinde tutunabildiği belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2011-11 nolu proje ile desteklenmiştir. Bartın Üniversitesi Rektörlüğü ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Erdem S., Yüksek Karbon İçeriğine Sahip, Yüksek Kromlu, Manganlı Ve Alaşımsız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 65 s, 2006.
2. Gök M.S., Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine Tig Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 125 s, 2008.
3. Aşınma İçin V.V. Cay, S. Ozan, M.S. Gok, A. Erdogan, The Effect Of Shielding Gas Composition On Microstructure And Abrasive Wear Resistance Fabricated With Pta Alloying Technique Archives Of Metallurgy And Materials, Volume 58 Issue 4, 2013.
4. Soydaş S (2006) Üniversal Aşınma Test Cihazı Tasarımı Ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği ABD, Kocaeli, 73 s.
5. Erdoğan A., Ferrokrom Cürufunun Mikro Ölçekli Abrasyon Testi İle Aşındırma Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 83 s, Bartın, 2012.
6. Ibáñez M.J., Gilabert J., Vicent M., Gómez P. ve Munoz D. Determination of the wear resistance of traditional ceramic materials by means of micro-abrasion technique. *Wear*, 267: 2048–2054, 2009.

7. Andrade M.F.C., Martinho R.P., Silva F.J.G., Alexandre R.J.D. ve Baptista A.P.M., Influence of the abrasive particles size in the micro abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings. *Wear*, 267: 12–18, 2009.
8. Shipway P.H ve Hogg J.J., Wear of bulk ceramics in micro-scale abrasion-The role of abrasive shape and hardness and its relevance to testing of ceramic coatings. *Wear* 263: 887–895, 2007.
9. Günen A., Gök M.S., Erdoğan A., Kurt B., Orhan N., Investigation of Microabrasion Wear Behavior of Boronized Stainless Steel with Nanoboron Powders, *Tribology Transactions*, 56:3, 400-409, 2013.
10. Çalışkan H., Erdoğan A., Panjan P, Gök M.S, Karaoğlanlı A.C., Micro-Abrasion Wear Testing Of Multilayer Nanocomposite TiAlSiN/TiSiN/TiAlN Hard Coatings Deposited On The AISI H11 Steel, *MTAEC9*, 47(5)563, 2013.
11. Silva FJG, Casais RB, Martinho RP ve Baptista APM (2011) Role of abrasive material on micro-abrasion wear tests. *Wear*, 271: 2632–2639.
12. Mehmet Horik Korkut, Yılmaz Küçük, Abdullah Cahit Karaoğlanlı, Azmi Erdoğan, Yusuf Er, Mustafa Sabri Gök, Effect Of The Abrasive Grit Size On The Wear Behavior Of Ceramic Coatings During A Micro-Abrasion Test, *MTAEC9*, 47(6)695, 2013.
13. A. C. Karaoğlanli, H. Caliskan, M. S. Gök, A. Erdoğan, A. Turk, A Comparative Study Of The Microabrasion Wear Behavior Of CoNiCrAlY Coatings Fabricated By APS, HVOF, And CGDS Techniques, *Tribology Transactions*, 57:1, 11-17, 2013.
14. O. Unal, R. Varol, A. Erdogan, M. S. Gok, Wear behaviour of low carbon steel after severe shot peening, *Materials Research Innovations VOL 17 NO 7*, 2013.

NACA 0012 VE NACA 4412 Kanat Kesitlerinin Yeniden Tasarlanarak Had ile Analiz Edilmesi

Ali ERİŞEN¹, Mehmet BAKIRCI^{2*}

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale / Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Teknolojisi Programı, Karabük / Türkiye

Yayın Bilgisi

Yayın Geçmişi

Geliş Tarih: 12.05.2014

Revizyon Tarihi: 25.06.2014

Kabul Tarihi: 27.06.2014

Anahtar Kelimeler

Kanat kesiti, HAD, Kaldırma, Sürüklenme

Özet

Havacılıkta, rüzgar türbinlerinde ve aerodinamik kuvvetlerle çalışan diğer alanlarda kullanılmak amacıyla çeşitli standart kanat kesitleri geliştirilmiştir. Ancak, farklı alanlar ve amaçlar için istenilen özelliğe sahip yeni kanat kesitlerine olan ihtiyaç devam etmektedir. Özellikle rüzgar türbin kanatlarında kullanılacak yeni kanat kesitleri geliştirmek bu çalışmanın amacıdır.

NACA 0012 ve NACA 4412 kanat kesit geometrilerinde yapılan değişikliklerle yeni kanat kesit geometrileri elde edilmiştir. NACA 0012 standart kanat kesitinin alt yüzeyi daha düzleştirilmiş ve üst yüzeyinin kamburluğu artırılmış ve elde edilen yeni kesite MB 01 denilmiştir. Aynı standart kesitin alt yüzey eğrisinin $x/c=0,3$ den sonraki kısmı 3. dereceden bir polinom fonksiyon ile yeniden düzenlenmiş ve elde edilen bu yeni geometriye MB 02 denilmiştir. NACA 4412 standart kanat kesitinde ise maksimum kamburluk yeri, kesitin arka ucuna doğru, kanat kesit kiriş uzunluğunun %10' u kadar ötelenerek MB 03 olarak isimlendirilen yeni bir kesit elde edilmiştir.

Elde edilen bu yeni kesitlerin aerodinamik özellikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) bilgisayar paket programı ile hesaplanmış ve orijinallerinin aynı şartlarda elde edilen değerleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan değişikliklerle daha yüksek kaldırma kuvvetinin elde edilebileceği görülmüştür.

Keywords:

Airfoil, CFD, Lift, Drag

Modifications of NACA 0012, NACA 4412 Airfoils And Analysis Them By CFD

Abstract

Various standart airfoils have been developed for the aviation, wind turbines and the other areas that uses aerodynamics forces. However, there is the need for designing new airfoils order to more suitable for different purposes. Especially, new airfoils for blades of wind turbines should be improved. In this study, three new airfoils are obtained by changing the geometries of standart NACA 0012 (having symmetry geometry) and NACA 4412 airfoils. Lower surface of NACA 0012 were flattened and its upper surface y values were increased. As a result, the camber of NACA 0012 were increased. This new airfoil was named as MB

01. Lower surface which is after maximum camber location was changed and re-defined with three degree polynomic function. This new airfoil was called as MB 02. Standart NACA 4412 airfoil geometry were changed by transferred maximum camber location towards (%10 of chord length) its trailing edge. This is MB 03. Aerodynamics features of two standart and three new airfoils were calculated by CFD in Ansys Fluent computer package program. Higher lift and drag coefficient values of new airfoils than original airfoils were obtained.

1.Giriş

Rüzgar enerjisinden faydalanmak için rüzgar türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinin verimini etkileyen en önemli unsurlarından birisi de kanat aerodinamiğidir. Kanat kesit geometrilerinin aerodinamik tasarımı tüm kanadın performansını, dolayısı ile de rüzgar türbininin toplam verimini etkiler (Hansen, 2008)[1].

Rüzgar Türbin kanatları için kanat kesit (airfoil) tasarımı rüzgar türbin geliştirilmesinde kritik öneme sahiptir. Yapılan çalışmalar, optimum kanat kesit seçiminin enerji üretim maliyetini azalttığını göstermiştir. Kanat kesit tasarımı, mukavemet gereksinimleri, üretim zorlukları ve aerodinamik performans arasında optimum durumun elde edilmesi için yapılır. Örneğin; yüksek kaldırma/sürüklenme oranının ve pürüzlülüğe karşı duyarsızlığın elde edilmesi aerodinamik performans için iyidir. Ancak bu özelliklerin elde edilebildiği ince kanat kesitlerinin özellikle büyük rüzgar türbinlerinde mukavemet şartlarını sağlayacağı garanti değildir.

Şu anda kullanılan NACA serisi kanat kesitleri, İkinci Dünya savaşında üretilen savaş uçaklarının kanatları için geliştirilmiştir. Uçaklar için üretilen bu kanat kesitlerinin rüzgar türbin kanatları içinde aynı performansı vermesi beklenemez. Çünkü, uçaklarda kullanılan kanat kesitleri yüksek Reynolds sayı değerlerinde iyi aerodinamik performans göstermesi istenirken, rüzgar türbinleri için düşük reynolds sayı değerinde iyi performans göstermesi istenir.

Kanat kesit geometri tasarımı için genel de iki metot vardır: Birincisi, mevcut standart kanat kesit geometrisinde bazı değişiklikler yapmak ve bu işlemi, daha iyi performans elde edinceye kadar tekrar etmektir. Bu metot üzerine S. Dahl ve Peter Fuslang çok önemli çalışmalar yapmışlardır [2]. İkincisi ise; istenilen aerodinamik performansı oluşturacak basınç katsayı dağılımını belirlemek ve sonrada bu dağılımı veren geometriyi elde etmektir.

Özellikle rüzgar türbin kanatlarında kullanılabilecek, daha yüksek kaldırma kuvvetinin olduğu yeni kanat kesitleri üretmek bu çalışmanın amacıdır. Rüzgar türbin kanatlarında en çok kullanılan kanat kesit geometrilerinden biri Ulusal Havacılık Araştırma Birliği (National Advisory Committee for Aeronautics-NACA) tarafından geliştirilen NACA serisidir. Bu serinin dört, beş ve altı basamaklı çeşitleri vardır. Bu çalışmada, dört basamaklı serisinden olan NACA 0012 ve NACA 4412 kesitleri kullanılmıştır.

Kanat kesit tasarımları ve bu kesitlerin aerodinamik analizleri üzerine yapılan ulusal ve uluslararası bir çok çalışma vardır.

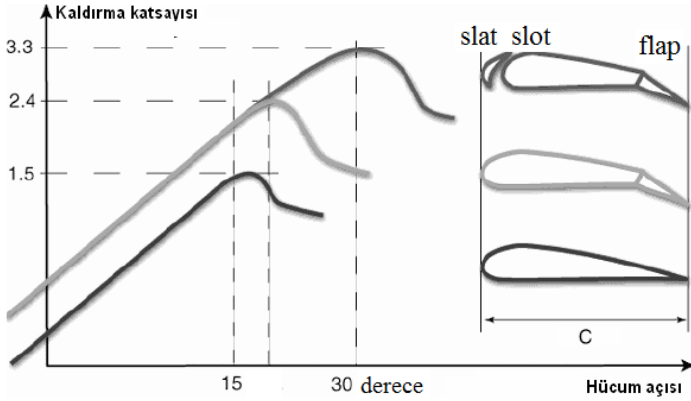
Hiroharu Suzuki ve diğerleri (2006) [3], NACA 63012 kanat kesit geometrisinin hücum kenarını alt yüzey tarafına doğru esneterek elde edilen yeni kanat kesiti için laminar sürüklenme kuvvetinin azaldığını, analitik ve sayısal analizleriyle göstermişlerdir.

David Hartwanger (2008) [4], NREL S 809 rüzgar türbin kanat kesitinin HAD analizini, X-FOIL ve Ansys CFX bilgisayar paket programlarını kullanarak iki boyutta yapmıştır. Kanat kesiti üzerindeki akışın ilk kısmı laminar diğer kısmı türbülans olacak şekilde akış analizini yapmıştır. Stall öncesi akış için bu model ile elde edilen değerlerin deney sonuçları ile tam uyumlu olduğunu göstermiştir. Ancak stall ve stall sonrası için elde edilen değerlerin, deneysel değerler ile uyumlu olmadığını ortaya koymuştur.

Xavier Mauclere (2009) [5], kanat kesitlerindeki geometri değişikliklerinin aerodinamik performanslarına etkilerini incelemiştir. Yapılan bu çalışmada önce, seçilen bir kanat kesit yüzeyi üzerinde 14 tane kontrol noktası alınıp,

Matlab programında B-spline tekniğini kullanılarak, bu noktaların kanat kesit kirişine dikey olarak yer değiştirmesi ile farklı geometriler elde edilmiştir. Her değişiklikte elde edilen yeni kanat kesitinin aerodinamik performansı (kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri) XFOİL programıyla hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak en iyi sonucu veren geometriyi elde etme stratejileri geliştirilmiştir.

Kanat kesitlerinin HAD ile aerodinamik analizleri için yapılan çalışmalarda genellikle standart kanat kesitleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar daha çok, ele alınan belirli bir standart kanat kesitinin aerodinamik karakterini belirlerken, reynolds ve mach sayılarının etkileri, farklı türbülans modellerin karşılaştırılması, ek kaldırma kuvveti oluşturan flap, slat ve slot gibi yardımcı geometrilerin (Şekil 1) etkileri üzerine olmuştur.



Şekil 1. Slat, slot, flap geometrileri ve kaldırma katsayısına etkileri [23]

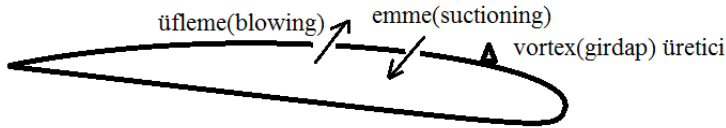
Barış Önen ve Ali Çınar (2010) tarafından [6] Ansys Fluent ile yapılan bir çalışmada, flaplı kanat kesitlerinde flapsız olanlara göre daha küçük hücum açılarında daha yüksek maksimum kaldırma kuvvetinin elde edildiği görülmüştür.

Horia Dumitrescu ve Vladimir Cardoş (2010) [7], Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerinde rotor dönme hızının, rüzgar hızının, kanat kesit geometrisinin ve

kesit yüzey sürtünmesinin kanat kesitlerindeki sınır tabaka ayrılmalarına etkilerini incelemiştir. Kanadın kök kısmına yakın yerlerinde kanat kesitinin hücum kenarında oluşan kısa akış ayrılma baloncuklarının rotor açılma hızından kaynaklanan merkezci kuvvetlerin etkisi altında kanat boyunca hareket etmelerini, viskoz katsayısının kanat boyunca değişimini incelemiştir. Ayrıca, sınır tabaka kalınlığı ile akımın türbülans veya laminar oluşu arasındaki ilişkileri matematiksel modellerle açıklamışlardır.

S. Sarada, M. Shiva Shankar and Rudresh. G. (2012) [8], Ansys Fluent bilgisayar paket programı ile NACA 64-618 kanat kesit geometrisinin 2D (iki boyut) ve 3D (üç boyut) olarak HAD analizini yapmışlardır. Bu çalışmada k-epsilon modelini kullanmışlardır. Bu türbülans modeli ile stall durumunda, 2D ile deneysel verilere yakın değerleri elde edememişlerken, 3D ile elde etmişlerdir.

Bazı çalışmalar ise kesit yüzeyindeki akışın kontrolü için vortex (girdap) üreticilerin, emme ve üfleme gibi geometrilerin (Şekil 2.) kullanımı üzerinedir.



Şekil 2. Akış kontrol geometrileri [8]

Tetsuya KOGAKI ve diğerleri(2012) [9], rüzgar türbinlerinde kanat kesit performansını etkileyen vortex (girdap) üreticileri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Rüzgar tüneline ve HAD ile yaptıkları çalışmaları neticesinde, özellikle küçük rüzgar türbinleri için kanat kesit geometrisine sahip vortex üreticilerin dikdörtgen kesitli olanlara göre daha verimli olduğunu göstermişlerdir.

NACA 4412 kesitinin aerodinamik analizi Amit Saraf, Faruk Ahmed Nazar, Sushil Pratap Singh (2013) tarafından [10] HAD ile standart k-omega ve k-epsilon türbülans modelleri kullanılarak yapılmış, düşük hücum açılarında

k-omega ile deney sonuçlarına daha yakın değerler elde edildiği ancak yüksek hücum açılarında ise her ikisiyle de farklı sonuçlar alınmıştır. Bu farklılığın sebebi olarak, kesit yüzeyi üzerinde laminer-türbülans geçiş noktasının dikkate alınmaması gösterilmiştir.

Ravi. H. C., Madhukeshwara. N., S. Kumarappa (2013) [11], HAD ile NACA 4412 kanat kesitinin kaldırma ve sürüklenme katsayılarını hesaplamışlardır. Bu çalışmada, kanat kesiti üzerindeki akışın laminerden türbülansa geçişini dikkate almak için k-omega SST transition türbülans modelini tercih etmişlerdir. Bu türbülans modeli ile elde edilen değerleri, diğer bir türbülans modeli olan Spalart Allmaras ile elde ettikleri değerlerle ve rüzgar tünel deney sonuçları [12] ile karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma neticesinde her iki türbülans modeli ile elde ettikleri sonuçların deneysel değerlerle uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Laminer-türbülans geçişini dikkate alarak, k-omega SST türbülans modeli ile hem stall öncesi hem de stall ve stall sonrasında deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Yeni kanat kesit geometrisinin istenilen aerodinamik özellikleri karşılayacak şekilde tasarımı veya standart kanat kesit geometrisinin modifiye edilmesi ile yeni kesitlerin elde edilmesi stratejileri üzerine olan çalışmalar daha az sayıdadır. Yeni kanat tasarımı için yapılan uluslararası çalışmalarda çeşitli teknikler [13] (örneğin; B-Spline[13]) kullanılmıştır.

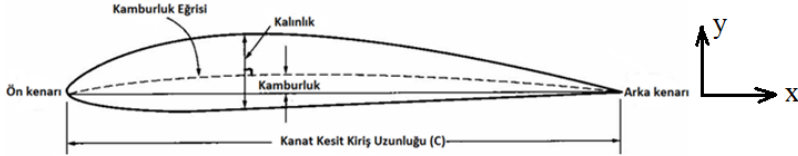
Bu çalışmada ise yukarıda sözü edilen tekniklere ([13], [14]) girmeden, standart iki kanat kesit (NACA 0012 ve NACA 4412) geometrisinde yapılan değişikliklerle üç yeni geometri elde edilmiş ve elde edilen bu kesit geometrilerinin aerodinamik analizleri HAD bilgisayar paket programında standart k-epsilon türbülans modeli ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar orjinallerinin aynı şartlarda elde edilen sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Standart NACA 0012 ve NACA 4412 kanat geometrisini belirleyen yüzey eğrilerinin koordinatları değiştirilerek yeni kanat kesit geometrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu yeni kanat kesitlerinin aerodinamik özellikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile analiz edilmiştir.

2.1 Kanat Kesitleri ve Aerodinamik Özellikleri

Özel tasarlanmış standart kanat kesitleri iki eğri yüzeyden oluşur. Kesitlerin uzunlukları, kanat kesit kiriş uzunluğu (veter, chord) olarak isimlendirilir ve c ile gösterilir. İki yüzey arasındaki dikey uzunluk ise kanat kesit kalınlığı diye isimlendirilir ve t ile gösterilir. Kesitin, akışı karşılayan ön kısmına ön (hücum) kenar, diğer kısmına arka (fırar) kenar ismi verilir. Bu iki ucu birleştiren doğruya kanat kesit kiriş hattı (veter hattı) denir (Şekil 3.) [15].



Şekil 3. Kanat kesit geometrisi

Kiriş hattı x eksenine ile, kamburluk ve alt-üst eğrilerin ordinatları y ile gösterilmiştir. Maksimum kalınlık, maksimum kamburluk y değerleri ve konumlarının x değerleri, üst ve alt eğrilerin (x,y) koordinatları, kamburluk eğrisinin (x,y) koordinatları, kanat kesit kiriş uzunluğuna (c) bölünerek boyutsuz olarak ifade edilir.

NACA 4412 kanat kesitinin içinde bulunduğu dört basamaklı NACA serisi olarak tanımlanan kanat kesitleri için kambur eğrisi ve bu çizgiye dik olarak tanımlanan ve kesitin üst ve alt yüzeylerinin oluşturulmasında kullanılan kesit kalınlıkları; kiriş hattı boyunca tanımlanan boyutsuz mesafe x cinsinden aşağıdaki denklemlerle tanımlanmıştır.

m değişkeni boyutsuz maksimum kamburluk miktarını,

p değişkeni maksimum kamburluğun giriş hattı üzerindeki konumunu ,
 t ise kesitin maksimum kalınlığını ifade etmektedir.

Kamburluk eğrisinin ordinatı, maksimum kamburluk konumundan öncesi için;

$$0 \leq x \leq p ,$$

$$y = \frac{m}{p^2} (2px - x^2) \quad (2.1)$$

denklemleri ile verilirken, sonrası için ; $p \leq x \leq 1$,

$$y = \frac{m}{(1-p)^2} [(1-2p) + 2px - x^2] \quad (2.2)$$

denklemleri ile verilmektedir.

Geometrinin alt ve üst yüzeylerinin koordinatlarını kamburluk eğrisinin ordinatına aşağıdaki denklemle verilen y değeri eklenerek üst yüzey, çıkartılarak alt yüzey ordinatı elde edilir [14].

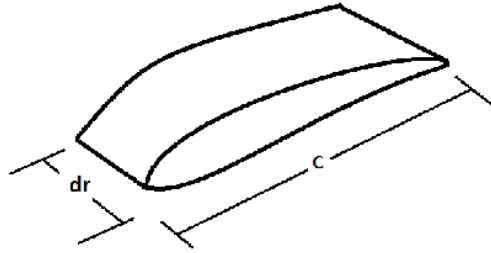
$$\pm y = \frac{t}{0,2} [0,2969\sqrt{x} - 0,126x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4] \quad (2.3)$$

Dört rakamlı NACA kanat kesitlerinin isimlendirilmesinde kullanılan rakamların ne anlama geldiği şu şekilde açıklanabilir: Dört rakamdan soldan birincisi, kambur eğrisinin maksimum ordinat değerini giriş uzunluğunun yüzdesi olarak ifade eder. Soldan ikinci rakam ise, maksimum kamburluğun olduğu yerin hücum kenarından uzaklığını giriş uzunluğunun onda biri olarak

gösterir. Son iki rakamın oluşturduğu iki basamaklı sayı ise kesitin maksimum kalınlığını kanat kesit kiriş uzunluğunun yüzdesi olarak ifade eder [15].

NACA 4412 için m , p ve t değerleri: Kambur eğrisinin maksimum ordinat değeri, kanat kesit kiriş uzunluğunun %4 üne eşittir dolayısı ile $m=0,04$ olur. Maksimum kamburluğun olduğu yerin hücum kenarına uzaklığı; kanat kesit kiriş uzunluğunun $4/10$ una eşit olduğundan $p=0,4$ olur. Maksimum kalınlık, kanat kesit kiriş uzunluğunun % 12 sine eşit olduğundan $t=0,12$ olur. NACA 0012 için $m=0$, $p=0$ ve $t=0,12$ dir. Bu kesit simetrik olduğundan kambur eğrisi yoktur [15].

Kanat kesitine V hızı ile gelen havanın, bu kesitin özel tasarlanmış geometrisi sayesinde alt ve üst yüzeyleri arasında oluşturduğu basınç farkı nedeniyle akış doğrultusuna dik bir F_L kaldırma kuvveti (lift) oluşur. Akış doğrultusunda ise F_D sürüklenme kuvveti (drag) meydana gelir. Bu kuvvetler bir kanat kesit elemanı için tanımlandığında kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ve moment, sırasıyla dF_L , dF_D ve dM ile gösterilir. Kanat elemanı Şekil 4'de gösterilmiştir [16].



Şekil 4. Kanat elemanı

F_L kaldırma kuvveti, uçağın havada düşmeden uçmasını sağlarken, rüzgar türbinlerinde kanatların dönmesini sağlar. V havanın hızı, ρ havanın yoğunluğu, dr kanat eleman uzunluğu (Şekil 4.), dF_L kanat elemanında oluşan kaldırma kuvveti ve dF_D sürüklenme kuvveti olmak üzere, C_L kaldırma kuvvet katsayısı,

$$C_L = \frac{dF_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 c dr} \quad (2.4)$$

biçiminde tanımlanır ve C_D sürüklenme kuvvet katsayısı,

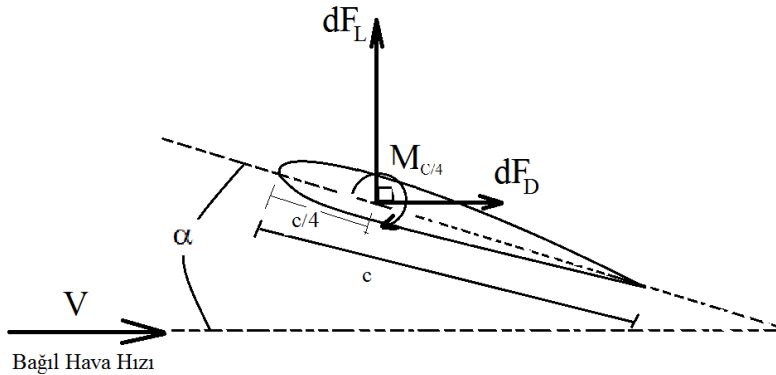
$$C_D = \frac{dF_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 c dr} \quad (2.5)$$

şeklinde tanımlanır. Burada C_L ve C_D birimsiz katsayılarıdır.

Bu kuvvetlerin dışında, kanat kesitini saat yönünde dönmeye zorlayacak şekilde moment oluşur. Kanat elemanında oluşan moment dM ise C_M moment katsayısı,

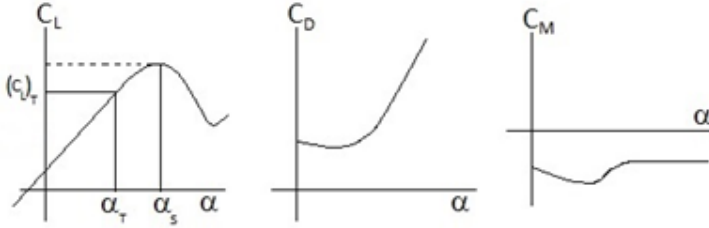
$$C_M = \frac{dM}{\frac{1}{2} \rho V^2 c^2 dr} \quad (2.6)$$

biçiminde tanımlanır. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin uygulama noktası düşük hızlı akışkana maruz kalan kesitlerde, kanat kesitinin ön (hücum) kenarından 1/4 gerisindedir (Şekil 5.) [16].



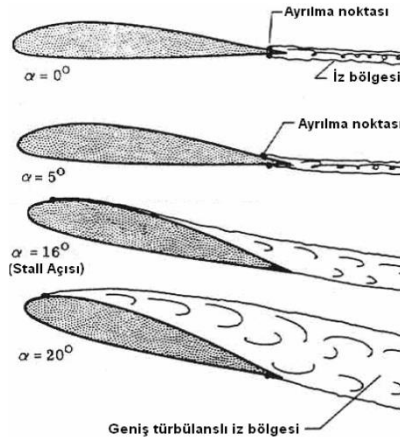
Şekil 5. Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri [15]

V hızının kanat kesit kiriş hattı ile yaptığı açığa hücum açısı denir ve α ile gösterilir. C_L kaldırma ve C_D sürüklenme kuvvet katsayıları α hücum açısıyla değişirken, C_M moment katsayısı hücum açısıyla pek fazla değişmez. C_L , C_D ve C_M katsayılarının hücum açısına göre değişimi ‘polar eğriler’ ismi verilen grafiklerle gösterilir (Şekil 6.) [16].



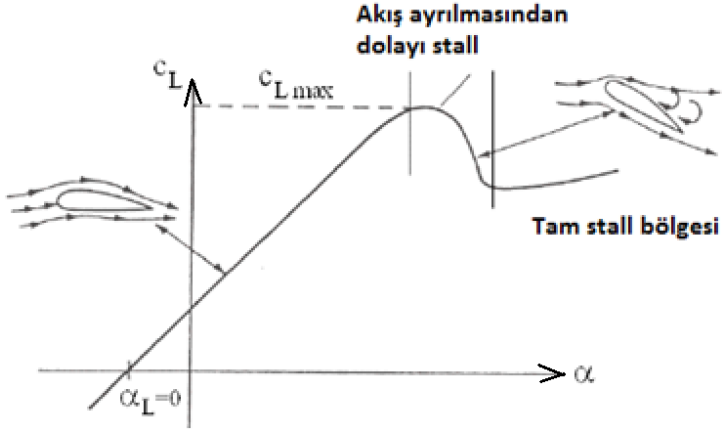
Şekil 6. Polar grafikler [16]

Bu kritik açığa kadar akış, kanat kesit üst yüzeyinde yüzeye uyumlu bir şekilde hareket ederken hücum açısının artmasıyla birlikte akış yüzeyden ayrılmaya başlar. Bu ayrılma, kanat kesitinin arka ucunda başlar ve hücum açısının artmasıyla birlikte ön uca doğru kayar (Şekil 7). Akış ayrılmasının ön uca yaklaşmasıyla beraber C_L değeri azalmaya başlar. Bu olaya ‘stall’ veya ‘tutunma kaybı’ denilir ve bu açığa stall açısı denir.



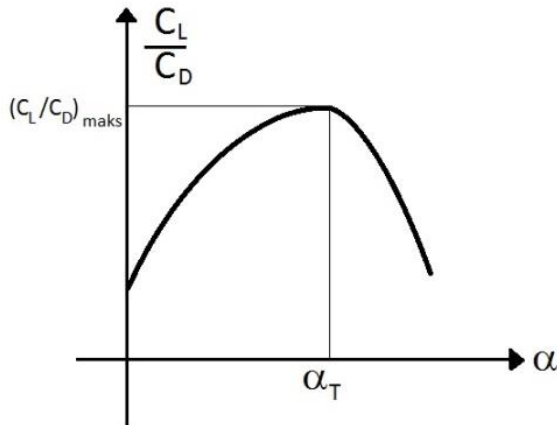
Şekil 7. Stall olayı [16]

Kanat kesitinde oluşan bu akış özellikleri üç kısma ayrılabilir; stall öncesi, stall durumu ve stall sonrası. C_L kaldırma katsayı değerinin bu üç farklı kısım için değişimi Şekil 8.'de gösterilmiştir.



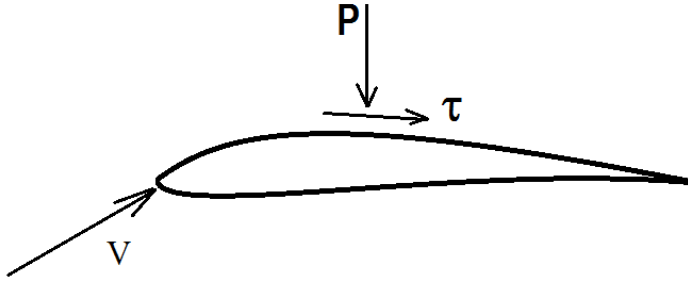
Şekil 8. Kanat kesitinin üç farklı akış bölgesindeki davranışı [16]

Rüzgar türbinlerinde bir kanat kesiti için en iyi hücum açısı C_L nin büyük C_D nin küçük olduğu, yani C_L/C_D oranının en yüksek olduğu açı kabul edilir. Dolayısıyla bu açı α_T tasarımın hücum açısı olarak adlandırılır. (Şekil 9.) [1].



Şekil 9. Tasarım hücum açısı [1]

Kanat kesitinde oluşan kaldırma, sürüklenme kuvvetleri ve moment, kesit etrafında oluşan basınç farkı ile yüzey sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle oluşur (Şekil 10). Kanat kesit yüzeyindeki basınç ve sürtünme katsayılarının dağılımı bilinirse, C_L ve C_D katsayılarının değerleri belli bir hücum açısında hesaplanabilir.

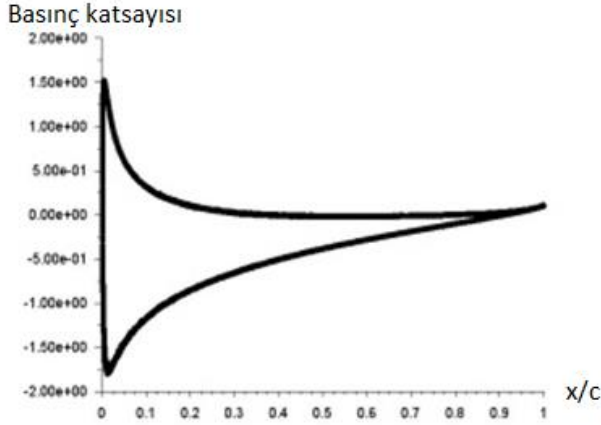


Şekil 10. Basınç ve kayma gerilmesi[15]

C_p basınç katsayısı olup, statik basınç p ile açık hava basınç p_0 farkının dinamik basınca oranıdır. Basınç katsayısı C_p

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.7)$$

eşitliği ile hesaplanır [16]. Kanat kesit alt ve üst yüzeylerinde meydana gelen basınç katsayı değerler grafiklerinin oluşturduğu kapalı bölgenin (Şekil 11.) alanı arttıkça kaldırma kuvvetide artar.



Şekil 11. Kanat kesitinde basınç katsayı grafiği [15]

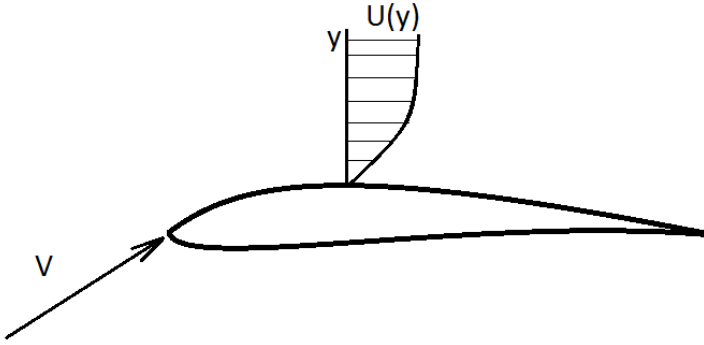
C_f yüzey sürtünme katsayısı ise kayma gerilmesinin dinamik basınca oranıdır. Sürtünme katsayısı C_f ,

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılır. Burada $\frac{1}{2} \rho V^2$ terimi, dinamik basıncı ifade eder. τ ise kayma gerilmesini (shear stress) ifade eder ve

$$\tau = \mu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır [17]. Burada $\left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}$ terimi, cisim yüzeyindeki dikey hız değişimini, μ havanın dinamik viskozitesini ifade eder. (Şekil 12.) [17].



Şekil 12. Kanat kesit yüzeyinde hız değişimi [17]

Kanat kesit hem alt hem de üst yüzeyi üzerindeki basınç katsayı (C_p) dağılımı ve yüzey sürtünme katsayı (C_f) dağılımı bilinirse, kanat kesit giriş doğrultusunda oluşan aksenal kuvvet katsayısı C_x ile bu doğrultuya dik oluşan normal kuvvet katsayısı C_y aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanabilir. [16]

$$C_y = \frac{1}{c} \left[\int_0^c (c_{p,alt} - c_{p,üst}) dx + \int_0^c \left(c_{f,üst} \frac{dy_{üst}}{dx} - c_{f,alt} \frac{dy_{alt}}{dx} \right) dx \right] \quad (2.10)$$

$$C_x = \frac{1}{c} \left[\int_0^c \left(c_{p,üst} \frac{dy_{üst}}{dx} - c_{p,alt} \frac{dy_{alt}}{dx} \right) dx + \int_0^c (c_{f,üst} + c_{f,alt}) dx \right] \quad (2.11)$$

C_y ile C_x değerleri hesaplandıktan sonra, akış doğrultusundaki sürüklenme kuvvet katsayısı ile akış doğrultusuna dik oluşacak kaldırma kuvvet katsayısı aşağıdaki formüllere göre hesaplanır.[16]

$$C_L = C_y \cos \alpha - C_x \sin \alpha \quad (2.12)$$

$$C_D = C_y \sin \alpha + C_x \cos \alpha \quad (2.13)$$

2.2 HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

Bir kanat kesitinde (etrafındaki akış sayesinde) oluşacak C_L , C_D ve C_M aerodinamik katsayı değerleri deneylerle, teorik formüllerle veya HAD (Computational Fluid Dynamics -CFD) bilgisayar paket programlarıyla hesaplanabilmektedir. Teorik hesaplamalarda yapılan kabullenmeler, elde edilen değerlerin yaklaşık sonuçlar olmasına sebep olmaktadır. Bu teorik hesaplamalarda dayalı olan düz levha yaklaşımı, vortex panel metodu, kaldırma çizgisi teorisi kullanılan metotlardan[18] bazılarıdır. Deneylerle yapılan çalışmalarda daha güvenilir sonuçlar elde edilmekte ancak akış ayrılmasının olduğu stall durumlarında güvenilirlik azalmaktadır. Ayrıca rüzgar türbinlerinde çok fazla değişik hücum açılarında bu katsayı değerlerini bulmak hem çok zaman alıcı hem de daha masraflı olmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği- HAD, XFOİL[20] gibi bilgisayar paket programları ile kanat kesit etrafındaki akışla oluşan kuvvetleri ve aerodinamik katsayılarını elde etmek daha az zaman alıcı ve daha güvenilir olmaktadır. Ancak akış fizikinin, hücre oluşturma sisteminin, türbülans model seçiminin ne kadar doğru yapıldığı elde edilecek sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilemektedir.[19]

HAD bilgisayar paket programında, akışın matematiksel modeli olan Navier Stokes denklemleri çözülür. İki boyutlu Navier Stokes denklemleri, bir süreklilik ve iki momentum korunum denklemlerinden oluşur. Türbülans ve sıkıştırılmaz akışlarda, bu korunum denklemlerine türbülans etkisini hesaba katan ilave terimler ortaya çıkar. Bu denklemler şunlardır[18]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'v'}) \quad (2.15)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) \quad (2.16)$$

Bu denklemlerde yer alan u ve v sırasıyla x ve y doğrultusundaki hız bileşenlerini, p basıncı, μ dinamik viskoziteyi, ρ akışkan yoğunluğunu, u' ve v' yatay ve düşey türbülans hız sapmalarını temsil etmektedir. Denklemden yer alan $-\rho \overline{u'v'}$ terimi türbülans kayma gerilmesi olup τ_{xy} ile gösterilir ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\tau_{xy} = -\rho \overline{u'v'} = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

Denklemden görülen η ifadesi türbülans viskozitesi olarak adlandırılmaktadır ve η nin belirlenmesi için farklı türbülans modelleri geliştirilmiştir [18].

Farklı fiziksel durumlara ve yorumlara göre geliştirilen farklı türbülans modelleri söz konusudur. Cebirsel, tek denklemlilik, iki denklemlilik ve reynolds gerilme modelleri dahil olmak üzere günümüzde kullanılan birçok türbülans modeli vardır. Türbülans modellerinin en çok kullanılanları, Spalart Allmaras, k-epsilon ve k-omega modelleridir. Tüm akışlar için en iyi olan belli bir türbülans modeli yoktur. Akış fiziğine uygun türbülans modeli kullanılmalı, gerekirse aynı akış için farklı modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalıdır. Bu çalışmada türbülans modeli olarak k-epsilon modeli seçilmiştir. Bu modelde iki yeni denklem, korunum denklemlerine eklenir. Bu denklemler, ortalama hız değişiminin ve kaldırma kuvvetinin oluşturduğu türbülans kinetik enerjisi ve bütün yayılma oranlarında sıkıştırılabilir türbülans genişleyen çalkantıların katkısını dikkate alır. Türbülans kinetik enerjisi 'k', türbülans kaybolma hızı 'ε' ile gösterilir [20].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho ku) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (2.18)$$

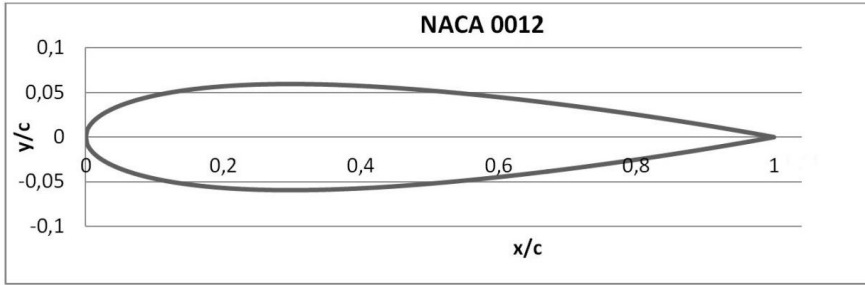
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon u) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + c_{3\varepsilon} G_b) - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.20)$$

Bu denklemlerde yer alan G_k , ortalama hızdaki değişimin neden olduğu türbülans kinetik enerji üretimini, G_b , kaldırma kuvvetinin (bouyance force) neden olduğu türbülans kinetik enerji üretimini, Y_M sıkışabilen türbülans çalkantılardaki genişlemenin bütün yayılmaya etkisini göstermektedir. Bu çalışmada $c_{1\varepsilon} = 1,44$, $c_{2\varepsilon} = 1,92$, $c_\mu = 0,09$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_k = 1$ olarak k-epsilon türbülans modeline ait deneysel verileri kullanılmıştır[22].

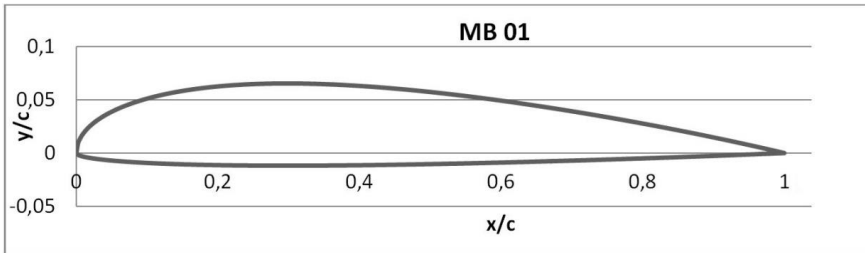
2.3. Standart Kanat Kesitinden Yeni Geometrilerin Oluşturulması

NACA 0012 ve NACA 4412 standart kanat kesit geometrilerinde [15] değişiklikler yapılarak yeni kesit geometrileri elde edilmiştir. Elde edilen yeni geometrilere MB 01, MB 02 ve MB 03 isimleri verilmiştir.

MB 01: NACA 0012 kanat kesiti simetrik geometriye sahiptir. Üst yüzey eğrisinin ordinatları %10 artırılarak ve alt yüzey eğrisinin ordinatları 0,2 ile çarpılarak elde edilen yeni yüzey eğrisinin ordinatları elde edilmiştir. Yeni geometri ile kesitin alt yüzeyi daha düzleştirilmiş ve kesitin kamburluğu arttırılmıştır. NACA 0012 ve MB 01 diye isimlendirilen yeni kanat kesiti Şekil 13. ve Şekil 14.'de gösterilmiştir.

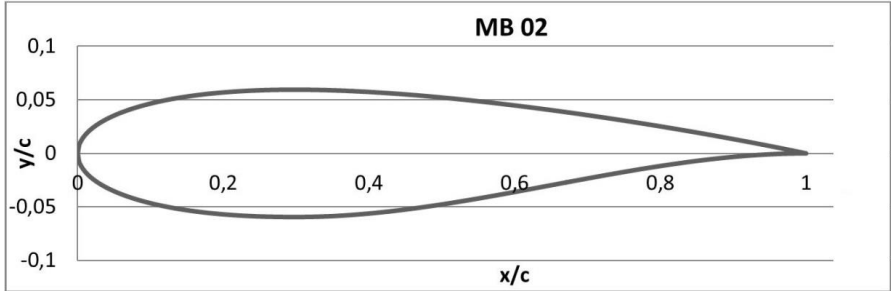


Şekil 13. NACA 0012 kanat kesit geometrisi



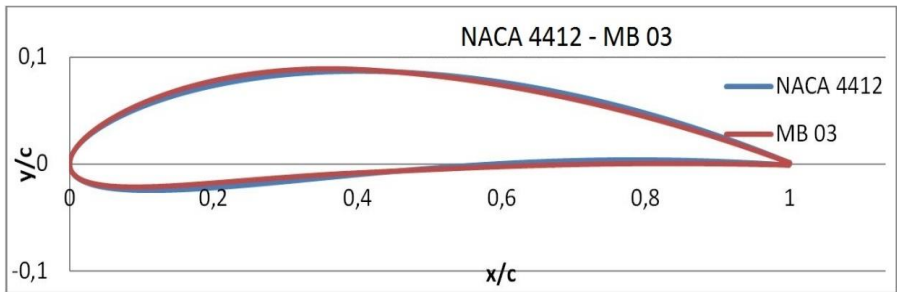
Şekil 14. MB 01 kanat kesit geometrisi

MB 02: NACA 0012 geometrisinin alt yüzey eğrisinin $x/c = 0,3$ den sonraki kısmı 3. dereceden bir polinom fonksiyon ile yeniden düzenlenmiş ve elde edilen bu yeni geometriye MB 02 denilmiştir. NACA 0012 kanat kesitinin alt ve üst yüzey eğrilerinin apsisi ve $x/c=1$ apsisi için $\frac{dy}{dx} = 0$ koşulu sağlatılmıştır. $x/c = 0,65$ için ise $\frac{d^2y}{dx^2} = 0$ şartı sağlatılarak geometrik uyum oluşturulmuştur. Bu şartlar kullanılarak, $0,3 < x/c < 1$ için $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ polinom fonksiyonun katsayıları hesaplanmış ve kanat kesitinin grafiğinin koordinatları oluşturulmuştur. Elde edilen MB 02 kanat kesit geometrisi Şekil 15.'de gösterilmiştir.



Şekil 15. MB 02 kanat kesit geometrisi

MB 03: NACA 4412 kanat kesitinde; $m=0,04$ maksimum kamburluk, $p=0,4$ maksimum kamburluk yeri ve $t=0,12$ maksimum kalınlık değerlerinden m ve t değerleri sabit tutularak sadece p değerinin yeni değeri $0,5$ alınarak MB 03 geometrisi elde edilmiştir. Yeni kanat kesit ve NACA 4412 geometrileri Şekil 16.'de birlikte verilmiştir.



Şekil 16. NACA 4412 ve MB 03 kanat kesit geometrileri

2.4. HAD İle Kanat Kesitinin Aerodinamik Analizi

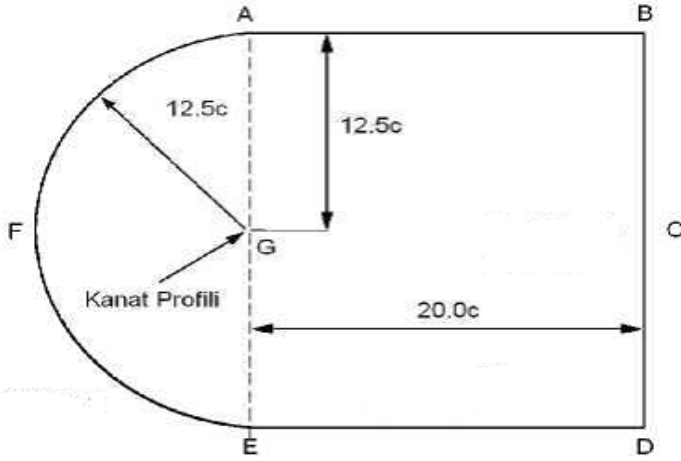
HAD paket programlarında üç temel eşitlik çözülür: kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri. Sınır koşulları (boundary conditions) akış ve akış alanı özelliklerine göre tanımlanır. Akış alanı hücrelere (mesh) bölünür. Üç korunum denklemi, sınır koşulları ile birlikte bu hücrelerde (eşitlikler yeterince

yakın değerlere ulaşılmıyaca kadar iterasyonla) çözümlür. Hücreler iki boyutlu alanlar için, yapılandırılmış dörtgensel veya yapılandırılmamış üçgensel şeklinde olabilir (Şekil 18. ve Şekil 19.) [19].

Geçerli fiziksel sonuçların alınabilmesi için hücrelerin doğru bölünmesi çok önemlidir. Az sayıda hücre hatalı sonuçlara neden olurken gereğinden fazla hücre sayısı yüksek kapasiteli bilgisayar ve daha fazla zaman gerektirir. Dolayısı ile optimum hücre sayısını yakalamak gerekir. Korunum (Navier Stokes) denklemlerinin çözümünde sonlu fark (FDM-finite difference method), sonlu eleman (FEM-finite element method) ve sonlu hacim (FVM-finite volume method) metotları olmak üzere üç farklı sayısal metot kullanılır. Ansys Fluent bilgisayar paket programı FVM metodunu kullanır.[18]

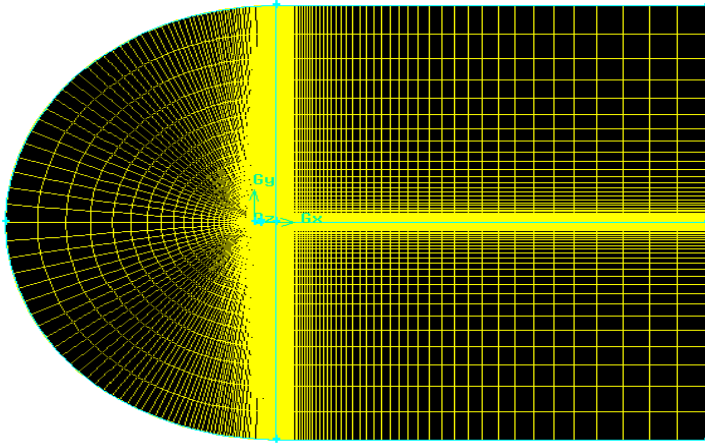
Bu çalışmanın amacı, kanat kesit geometrisinde yapılan değişikliklerin aerodinamik performansa (C_L , C_D , C_M katsayı değerlerine) etkilerini incelemek ve daha iyi aerodinamik performansa sahip kanat kesit geometrisi geliştirmektir. NACA 0012 ve NACA 4412 standart kanat kesitlerinden elde edilen MB 01, MB 02 ve MB 03 kanat kesit geometrilerinin aerodinamik analizi farklı hücum açılarında türbülanslı akım şartlarında yapılmıştır. Hücum açıları olarak 0, 4, 8, 12, 15, 16, 18 dereceler kullanılmıştır. Kanat kesit giriş uzunluğu (c) 1 m alınmış ve 20 m/s akış hızında standart k-epsilon türbülans modeli ile aerodinamik analiz yapılmıştır. Bu beş farklı kanat kesit geometrisi etrafında oluşan basınç ve hız değişimleri incelenmiş, C_L kaldırma, C_D sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır. Bu işlemler aşağıdaki sırası ile yapılmıştır [Şekil 17]:

1. Kanat kesit geometrisinin koordinatları Ansys fluent (bilgisayar paket programının) geometri kısmına alınmış ve burada iki boyutlu geometri oluşturulmuştur [19].
2. Şekil 2.15 de gösterildiği gibi kanat kesit geometrisinin etrafındaki akış bölgesinin sınırları çizilmiştir. Bu çalışmada C-mesh akış alan geometrisi kullanılmıştır[19].

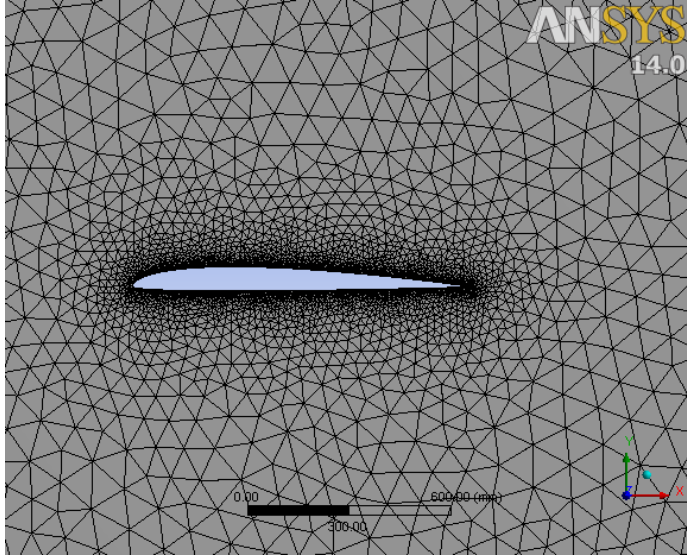


Şekil 17. Kanat kesit geometrisi etrafındaki akış alanı [19]

3. Elde edilen (kanat kesiti ve akış alanından oluşan) bu geometri, mesh programına alındıktan sonra akış alanı hücrelere (mesh) bölünmüştür. Kanat kesit yüzeyi üzerinde daha küçük hücreler ve geometriden uzaklaştıkça büyüyen hücreler oluşturulmuştur (Şekil 18 ve Şekil 19). Her bir hücre, korunum denklemlerinin çözüldüğü çok çok küçük kontrol hacimleri olarak düşünülebilir. HAD çözümünün doğruluğu büyük oranda oluşturulan ağa bağlıdır. Bu çalışmada yaklaşık 10 000, 107 000 ve 1 500 000 üçgen mesh kullanılmıştır. Ancak 100 000 mesh sayısından sonra sonuçların çok değişmediği görüldüğünden bu mesh sayısında alınan sonuçlar kullanılmıştır.



Şekil 18. Akış Alanında Hücrelerin Oluşturulması (dörtgen mesh)



Şekil 19. Üçgen mesh (MB 01 etrafındaki)

4. Akış alanı hücelere bölündükten sonra, sınır bölgelerinin giriş (input) ve çıkış (output) kısımları belirlenmiş ve kanat kesiti (airfoil) 'wall' olarak isimlendirilmiştir (Şekil 17).

5. Mesh programında hücelere bölünmüş geometri, Fluent 14.5 programına alınmış, sınır koşulları belirlenmiş ve değerleri girilmiştir. Burada, giriş (input) kısmında hız ve çıkış kısımlarında (output) basınç değerleri tanımlanmıştır. AB ve DE kenarları ise simetri (symmetry) olarak belirlenmiştir (Şekil 17).

$$V_x = V \cos \alpha \rightarrow AFE \quad (2.22)$$

$$V_y = V \sin \alpha \rightarrow AFE \quad (2.23)$$

$$P_o = 101\,000 \text{ Pa} \rightarrow BCD$$

6. Başlangıç değerlerinden başlayarak tüm hüceler için korunum (ve türbülans modelinin) denklemleri iteratif olarak çözülür. İterasyonlarda yakınsama kriteri olarak 10^{-6} alınmıştır.

7. Sonuçların alınması: Hız, basınç değerleri renkli görüntü (counter) olarak alınmıştır.

Geometri üzerinde ve akış alanında hızın ve statik basıncın minimum ve maximum değerleri ve yerleri belirlenmiş, C_f yüzey sürtünme katsayısı, C_p basınç katsayısı ve eksenel yöndeki C_x kuvvet ile normal yöndeki C_y kuvvet katsayılarının değerleri bulunmuştur. Hücüm açısının kosinüs ve sinüs değerleri kullanılarak C_L ve C_D katsayılarının değerleri elde edilmiştir[19].

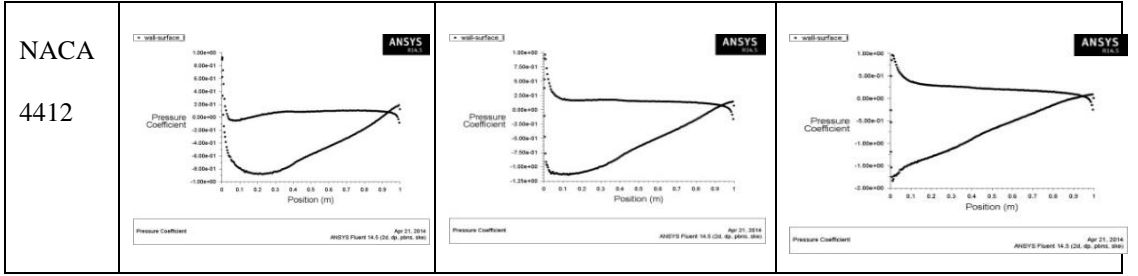
3.BULGULAR VE TARTIŞMA

NACA 0012 ve NACA 4412 standart kanat geometrilerinde yapılan değişiklikler ile yeni kanat kesit geometrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu yeni geometrilerin aerodinamik özellikleri Ansys Fluent bilgisayar paket programında yapılan HAD analizi ile irdelenmiş ve kaldırma ile sürüklenme katsayı değerleri hesaplanmıştır.

NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03, NACA 4412 kanat kesitlerinin HAD ile elde edilen basınç katsayı grafikleri Tablo 1.'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 1. Basınç katsayı grafiklerinin karşılaştırılması

H. Açısı	4 derece	8 derece	12 derece
NACA 0012			
MB 01			
MB 02			
MB 03			

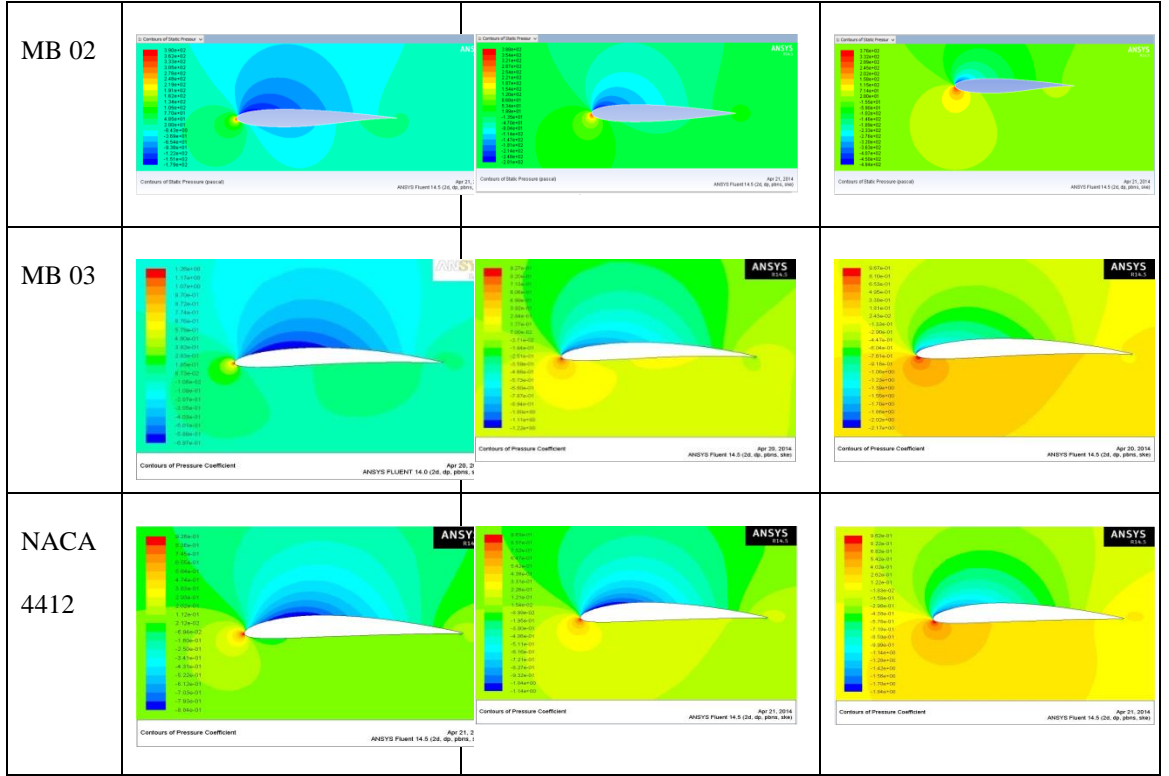


Kanat kesitinin alt ve üst yüzelerinde elde edilen basınç katsayısı grafikleri arasındaki kapalı bölgenin alanı arttıkça kaldırma kuvveti de artmaktadır. Tablo 1.'den görüldüğü gibi, MB 03 kanat kesitinde bu alan daha büyük ve sonuçta kaldırma kuvveti değeri de daha büyük olmuştur. Aynı durum hücum açısının artmasında da görülmektedir.

NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03, NACA 4412 kanat kesitlerinin HAD ile elde edilen statik basınç görüntüleri Tablo 2'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Statik basınç konturları

Hücum açısı	4 DERECE	8 DERECE	12 DERECE
NACA 0012			
MB 01			



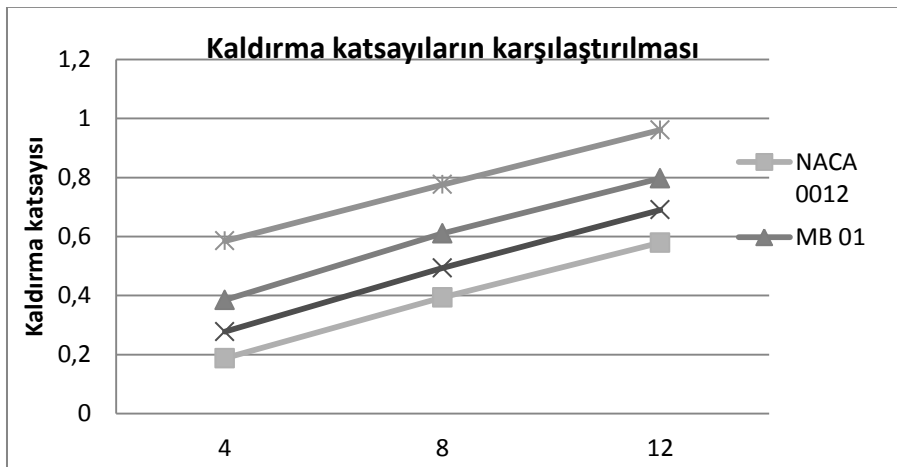
Kanat kesitinin üst kısmında statik basınç değeri, alt kısmındaki statik basınç değerinden daha küçüktür. Böylece oluşan basınç farkı nedeniyle bir kaldırma kuvveti oluşmaktadır. Üst kısmdaki basınç ne kadar az ve alt kısmdaki basınç ne kadar yüksek olursa o oranda da yüksek kaldırma kuvveti oluşur. Tablo 2’de verilen renkli resimlerde mavi bölgeler, statik basınç değerinin düşük, kırmızı, sarı veya yeşil bölgelerde statik basıncın mavi bölgelere göre daha yüksek olduğu yerleri göstermektedir. Örneğin NACA 4412 kanat kesitinin 12 derece hücum açısındaki statik basınç konturunda, kırmızı bölgelerde maksimum basınç değeri yaklaşık 400 pascal değerine yükselirken mavi bölgelerde bu değer -200 pascal değerlerine kadar düşmektedir. Hız konturunda ise, kırmızı bölgelerde hız değeri 32,4 m/s

değerlerine ulaşırken mavi bölgelerde bu değer 0 m/s değerine kadar azalmaktadır. Kanat kesitlerinin ön ucunda, statik basınç kırmızı ile görülmektedir. Çünkü bu noktada akış hızı sıfır ve statik basınç en büyük değerine ulaşmıştır. Hücum açısı arttıkça kanat kesit alt kısmındaki bölgenin rengi sarıya doğru değişmektedir. Bu değişim, statik basınç değerinin artması (ve dolayısı ile basınç farkının ve kaldırma kuvvetinin artması) olarak değerlendirilir.

Bu dört kanat kesitinin HAD ile elde edilen kaldırma ve sürükleme katsayı değerleri Tablo 3’de ve polar grafikleri ise Şekil 20. ve Şekil 21.’de verilmiştir.

Tablo 3. MB 01, MB 02, MB 03, NACA 0012, NACA 4412 kanat kesitlerinin kaldırma ve sürükleme katsayıları

	MB 01		MB 02		NACA 0012		MB 03		NACA 4412	
Hücum Açısı	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D
4 derece	0,385	0,042	0,278	0,055	0,188	0,048	0,59	0,0604	0,5572	0,0268
8 derece	0,6108	0,082	0,493	0,087	0,394	0,078	0,78	0,099	0,7726	0,056
12 derece	0,797	0,136	0,69	0,136	0,579	0,123	0,96	0,156	0,966	0,096



Şekil 20. NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03 kanat kesit kaldırma katsayıları

Kanat kesiti etrafında çeşitli noktalardaki farklı hızlar, Bernoulli denkleminde göre cisim etrafında her noktada değişen bir basınç dağılımına neden olmaktadır. Kanat kesitine kamburluk verildiğinde üst yüzeydeki alan arttırılmakta ve bu alanın arttırılması ile kesit üzerinden geçen havanın hızının arttırılması sağlanmaktadır. Hava hızının arttırılması ile Bernoulli denkleminde göre basınç daha fazla düşürülmektedir. Böylece alt yüzey ile üst yüzey arasında oluşan basınç farkı arttırmakta ve sonuç olarak kaldırma kuvveti arttırılmaktadır.

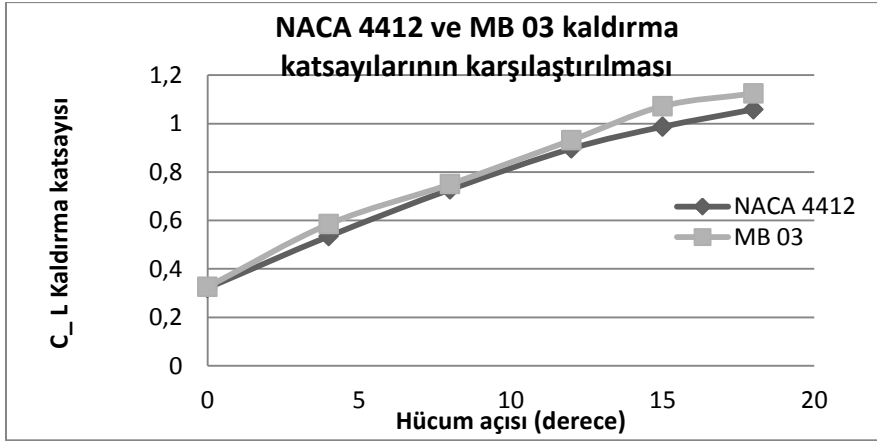


Şekil 21. NACA 0012, MB 01, MB 02, MB 03 kanat kesit sürüklenme katsayıları

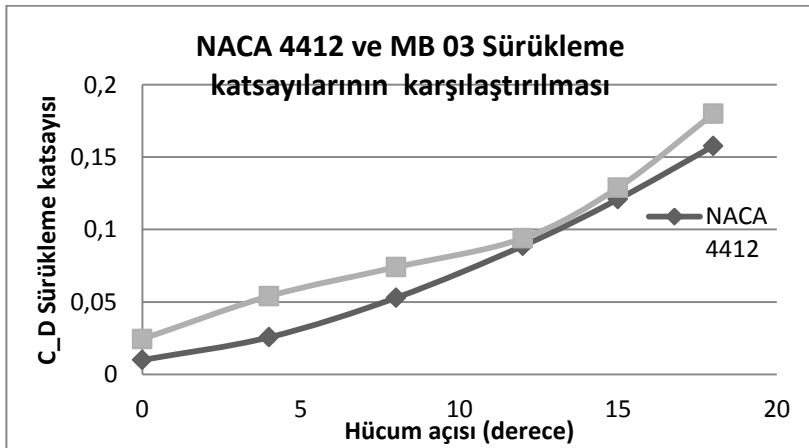
Kanat kesitinde aerodinamik performans arttırmak, kanat kesiti etrafında oluşan kaldırma kuvvetinin arttırılması ve sürüklenme kuvvetinin azaltılması ile sağlanır. Kanat kesitine kamburluk verilerek kaldırma kuvveti arttırılmakta fakat bu aynı zamanda sürüklenme kuvvetinin de arttırılmasına neden olmaktadır. Diğerlerine göre daha kambur olan MB 03 kesiti ile diğer

kesitlerin kaldırma ve sürüklenme katsayı değerleri karşılaştırıldığında (Şekil 20 ve Şekil 21) bu durum görülmektedir.

NACA 4412 ve MB 03 kanat kesitlerinin farklı hücum açılarında elde edilen kaldırma ve sürüklenme kuvvet katsayılarından oluşturulan grafikleri Şekil 22. ve Şekil 23.' de verilmiştir.



Şekil 22. NACA 4412 ve MB 03 kaldırma katsayı grafikleri



Şekil 23. NACA 4412 ve MB 03 sürüklenme katsayı grafikleri

4. SONUÇLAR

Elde edilen yeni kanat kesitlerinin tümünün her üç hücum açısında da kaldırma katsayı değerleri NACA 0012 kanat kesitinin kaldırma katsayı değerinden daha yüksek çıkmıştır. NACA 4412 ile MB 03 kanat kesitlerinin elde edilen aerodinamik katsayı değerleri karşılaştırıldığında MB 03 kanat kesitinin daha yüksek kaldırma katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Daha yüksek kaldırma kuvveti, rüzgar türbin kanatlarında aynı rüzgar hızında daha yüksek tork ve dolayısı ile daha büyük güç elde edilmesi sağlanmış olacaktır. Ancak MB 03 geometrisinde daha yüksek sürüklenme kuvveti elde edilmesi olumsuz yönü olarak değerlendirilebilir. Çünkü, daha yüksek sürüklenme kuvveti, rüzgar türbinlerinde torku sağlayan teğetsel kuvvetin azalmasına ve aynı zamanda güç üretimine bir katkısı olmayan, kanatları geriye doğru iten eksenel kuvvetin artmasına (kanatlar için istenmeyen) sebep olmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Martin O.L. Hansen, 2008, Chapter 2 2-D Aerodynamics", *Aerodynamics of wind turbine Second Edition*, Earthscan, UK and USA.
2. Kristian S. Dahl, Peter Fuglsang, *Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISØ-AXX*, RisØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 1998
3. Hiroharu Suzuki, Kenichi Rinoie, Asei Tezuka, Laminar Airfoil Modification Attaining Optimum Drag Reduction by Use of Airfoil Morphing University of Tokyo, Tokyo 113-8656, Japan.
4. David Hartwanger et.al "3D modeling of a Wind Turbine using CFD" NAFEMS Conference, United Kingdom, 2008.
5. Xavier Mauclere, Vestas, Automatic 2D airfoil Generation, Evaluation and Optimisation Using Matlab and Xfoil, master's thesis, 2009, DTU Mechanical Engineering, Section of Fluid Mechanics, Technical University of Denmark.

6. Baris Önen, Ali Çınar, düz flaplı pozitif kambura sahip NACA 4412 kanat kesitinin aerodinamik performansının bilgisayar destekli analizi. Ulusal Tasarım imalat ve Analiz Kongresi 11-12 Kasım 2010- Balıkesir.
7. Horia Dumitrescu, Vladimir Cardoş; the turbulent boundary layer on wind turbine blades, proceedings of the romanian academy, series of the romanian academy volume 11, number 2/2010, pp. 125–136 .
8. S.Sarada, M.Shiva Shankar and Rudresh.G” Numerical simulation of Viscous, Incompressible flow around NACA 64618 subsonic airfoil using Computational Fluid Dynamics”, Proceedings of National conference on advances in Mechanical Engineering, Allied Publishers Pvt Ltd, 2012.
9. Tetsuya Kogaki, Hhikaru Matsumiya, Kaori Kieda, Naofumi Yoshimizuand Yuusuke Yamamoto; performance improvement of airfoils for wind turbines by the modified vortex generator, European Wind Energy Conference Proceedings 2004.
10. Amit Saraf, Faruk Ahmed Nazar, Sushil Pratap Singh, Analysis of the k- ϵ and k- ω standard models for the simulation of the flow over a National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) 4412 airfoil International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 6, June-2013 1659 ISSN 2229-5518 IJSER © 2013 <http://www.ijser.org>.
11. Ravi.H.C1, Madhukeshwara.N2, S.Kumarappa3, Numerical Investigation Of Flow Transition For Naca-4412 Airfoil Using Computational Fluid Dynamics, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 7, July 2013, ISSN: 2319-8753.
12. Abbott.I.H, ‘Theory of wing section, including a summary of airfoil data, Dover book on Physics, 1995.
13. Davis, W.H., ‘Technique for Developing Design Tools from the Analysis methods of Computational Aerodynamics,’ AIAA Journal, Vol. 18, No.9, September, 1980, pp. 1080-1087.
14. De Boor, C., ‘On calculating with B-Splines,’ Journal of Approximation Theory, vol.6, 1972, pp.50-62.
15. UIUC Airfoil Coordinates Database

- http://aerospace.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html (Erişim tarihi: 13.05.2013)
16. Anderson J. D., *Introduction to Flight*, McGraw-Hill Book Company, Third Edition, (1989).
 17. Yunus ÇENGEL, John M. CIMBALA, *Akışkanlar Mekaniği*, Güven Bilimsel, 2008.
 18. Anderson John D., “Computational Fluid Dynamics”, McGraw-Hill, 1995.
 19. Cornell University web site :
<https://confluence.cornell.edu/display/Simulation/Home> (Erişim tarihi: 10.02.2014)
 20. YÜKSELEN, A., *Aerodinamik Ders Notları*, İTÜ, 2006-2007
http://www3.itu.edu.tr/~yuksele/Uck351/Uck351_Index.htm (Erişim tarihi: 13.04.2013).
 21. M. Drela, XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils, Conference on Low Reynolds Number Airfoil Aerodynamics, University of Notre Dame, June 1989.
 22. Fluent Inc, 2006, “12.5 Standard and SST – k-epsilon Models Theory”
FLUENT 6.3 User’s Guide Fluent Inc.
 23. Wilcox D C. *Turbulence modeling for CFD*. California. DCW Industries Inc.; 2000.
 24. Genç, M.S..Özışık, G..Kahraman, N., Düz Flaplı NACA 0012 Kanat Profilinin Aerodinamik Performansının İncelenmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 28, 1, 1-8, 2008.

Bazalt Lifli Donatının Yüksek Dayanımlı Betondaki Aderans Performansı

Ahmet BEYÇİOĞLU^{1*}, Yılmaz ARUNTAŞ²

¹Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Düzce.

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara.

Yayın Bilgisi

Yayın Geçmişi

Geliş Tarihi:

11.06.2014

Revizyon Tarihi:

22.06.2014

Kabul Tarihi:

27.06.2014

Anahtar Kelimeler

Yüksek dayanımlı beton, Bazalt lifli donatı, Aderans, Mafsallı giriş

Keywords:

High strength concrete, Basalt fiber bar, Adherence, Hinged Beam

Özet

Bu çalışmada bazalt lifli donatının yüksek dayanımlı betonla olan aderans ilişkisi çelik donatı ile karşılaştırılmalı olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmada 28 günlük kür süresi sonunda 75,06 MPa ve 90 günlük kür süresi sonunda ise 79,84 MPa basınç dayanımı değerine ulaşan yüksek dayanımlı beton, bazalt lifli yapay donatı ve çelik donatı kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen bulgulara göre 200 kenetlenme boyu kullanıldığında bazalt lifli yapay donatının, referans donatı olan çelik donatıda olduğu gibi hem 28 hem de 90 günlük kür süreleri sonunda betondan hiç sıyrılmadığı görülmüştür.

Bond Performance of Basalt Fiber Reinforcing Bar Embedded in High Strength Concrete

Abstract

In this study, adherence relationship of basalt fiber reinforcement with high-strength concrete was investigated in comparison with steel reinforcement. In the experimental study, high strength concrete that has 75.06 MPa compressive strength at the end of 28-day curing period and 79.84 MPa compressive strength at the end of 90-day curing period, basalt fiber artificial reinforcement and steel rebar were used. According to the findings of this study, it was found that basalt fiber bar showed no slippage for both 28 and 90 days curing period at 200 embedment length.

1.GİRİŞ

Betonarme yapı, beton ve çelik çubukların bir arada çalıştığı bir yapım türüdür. Betonarme bir yapı elemanının beklenen şekilde davranabilmesi için çubukların betona iyi kenetlenmesi gerekir. Bu kenetlenmede donatı çubukları ve çevresini saran beton arasındaki gerilme aktarımı betonarme teorisinin

temelini oluşturmaktadır. Bu gerilme aktarımı, beton ve betona gömülü donatı çubuğunun yüzeyi arasındaki rölatif harekete veya kaymaya karşı direnç ile mümkün olmaktadır. Beton ve donatı arasındaki kaymaya karşı gösterilen direnç aderans veya kenetlenme olarak tanımlanır. Betonarme elemanların analiz ve tasarımı yapılırken beton ve donatı arasındaki kenetlenme ile bindirmeli ekli donatılar beton-donatı arasındaki aderans açısından büyük bir öneme sahiptir [1,2].

Bilindiği gibi beton ile içerisindeki donatı, meydana gelen etkiler nedeniyle şekil değiştirirler. Bu sırada iki malzeme arasında gerilmelerin geçişi meydana gelir. Arada sıyrılma olmaksızın bu tür gerilme geçişinin ortaya çıkmasına aderans denir [3]. Aderans, beton ile çelik donatı arasındaki sürtünme ile yapışma direncinden ve nervürlü donatı kullanılması durumunda mekanik kenetlenmeden kaynaklanmaktadır [4].

Bir yapıda donatı aderansı yalnızca beton karakteristiklerinden değil aynı zamanda donatının ve yapının geometrisinden de etkilenir. Beton-çelik dayanımı, donatı geometrisi, donatının beton içerisindeki konumu (basınç ya da çekme donatısı), yükleme cinsi (çekip-çıkarma ya da eğilme), ankraj boyu, donatı çapı, çevresel etkiler, sıcaklık etkisi, beton örtü kalınlığı ve donatının paslanması gibi birçok faktör beton ve donatı arasındaki aderansı etkilemektedir. Günümüzde imalat teknolojilerindeki gelişmeler ile yapı malzemelerindeki yeni teknoloji arayışları sonucunda birçok yeni kompozit ürün ortaya çıkmaktadır. Yeni teknoloji ürünleri arasında betonarme donatısı olarak kullanılan çelik çubukların vazgeçilmezliğini tartışılır hale getirecek yapay donatı çubukları da bulunmaktadır.

Günümüzde cam lifi, bazalt lifi, karbon lifi gibi liflerin pultrüzyon yöntemiyle epoksi reçine kullanılarak kompozit bir malzeme şeklinde betonarme yapılarda kullanılan çubuk donatı formunda üretimi başlamıştır. Üretilen yapay donatı çubuklarına bazı örnekler Şekil 1'de görülmektedir.

Korozyon direncinin olması, çok hafif olması ve çeşitli yüzey formlarında (düz, nervürlü, kumlanmış v.b.) üretilebilmesi nedeniyle getirdiği avantajlar bu yapay donatıların aderans performanslarını yeni ve önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkarmaktadır [5].

Bunlardan bazalt lifli donatı çubuğu, bazalt kayacının yüksek sıcaklıkta ergitilmesi ile elde edilen bazalt liflerin epoksi reçine kullanılarak betonarme yapılarda kullanılan çelik formuna getirilmesi yöntemiyle üretilmektedir. Bazalt lifli donatı çubuğu Amerika, Rusya ve Ukrayna gibi ülkeler başta olmak üzere birçok ülkede, bazı yapı elemanlarında donatı çeliğine alternatif olarak kullanılan ürünlerdendir. Lifli donatı çubuğu, özellikle korozyon riski bulunan yapı elemanlarında donatı çeliğine önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Donatı çeliğinden daha yüksek dayanıma sahip olan bazalt lifli donatı, çelik donatıya oranla yaklaşık üç kat daha hafiftir. Aynı zamanda termal genişleme katsayısı da betonun genişleme katsayısına oldukça yakındır. Alkali reaksiyonlara karşı yüksek direnci de dikkate alındığında, birçok alanda donatı çeliğine alternatif olma potansiyeli bulunmaktadır [6].



Şekil 1. Yapay donatı çubukları

Beton ile donatı aderansını belirlemede uygulama kolaylığı bakımından en yaygın kullanılan deneyler çekip çıkarma deneyleridir. Çekip-çıkarma deneylerinin eğilmeye çalışan bir elemandaki gerçek durumu

yansıtamamasından dolayı kiriş deneyleri geliştirilmiştir. Özellikle eğilmede çekme çatlaklarının aderans davranışını etkilediği kabul edildiğinden beri, çekip-çıkarma deneyleri, kiriş testlerinden daha az güvenilir olarak dikkate alınmıştır. Kiriş deneylerinden en yaygın olarak kullanılanları, Bureau of standards deneyi, Texas deneyi, Standart Belçika mafsallı kiriş deneyi ve büyük boyutlu betonarme kirişler üzerinde yapılan kiriş çatlama deneyidir [7].

Bu çalışmada Belçika mafsallı kiriş numuneleri kullanılarak bazalt lifli donatının yüksek dayanımlı betonla olan aderans ilişkisi çelik donatı ile karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır.

2.MATERYAL VE METOT

Çalışmada aderans deneyleri için üretilen kirişlerde 28 günlük basınç dayanımı 75,38 MPa ve 90 günlük basınç dayanımı 79,84 MPa olan yüksek dayanımlı beton ve Ø12 çapında 2 farklı donatı çubuğu kullanılmıştır. Kullanılan betonun yüksek dayanım özelliği betonun performans kriterlerinden bir tanesi olduğu için çalışma süresince yüksek performanslı beton (YPB) tanımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan çelik çubuk standart S420a nervürlü donatı, bazalt lifli donatı çubuğu ise epoksi reçine kullanılarak üretilen bir çeşit yapay donatıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan bazalt lifli yapay donatı ve çelik donatı

Kirişlerin üretiminde kullanılan YPB'de $1m^3$ 'lük hacme giren malzeme miktarları Tablo 1'de sunulmuştur. Ayrıca deneylerde kullanılan YPB ve donatılara ait mekanik özellikler ise Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 1. YPB üretiminde kullanılan malzeme miktarları (1m³)

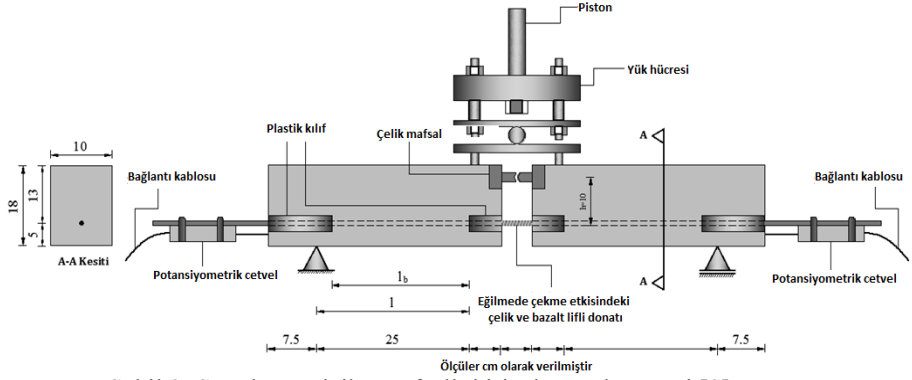
Malzemeler	Miktar	Malzemeler	Miktar
Su (kg/m ³)	167,5	Hava	0,020
Çimento (kg/m ³)	500	Toplam teorik ağırlık (kg/m ³)	2431
Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	6,5	Katkı/bağlayıcı	0,013
0-5 Agregası (kg/m ³)	1054	0-5 agregası / toplam agregası	0,6
5-12 Agregası (kg/m ³)	703	5-12 agregası / toplam agregası	0,4

Tablo 2. Çalışmada kullanılan beton ve donatılara ait mekanik özellikler

Donatılara ait mekanik özellikler	Donatı türü	
	Çelik	Bazalt lifli donatı
Akma dayanımı (MPa)	490	-
Çekme dayanımı (MPa)	570	-
Kopma dayanımı (MPa)	478	858
Betona ait mekanik özellikler		
Basınç dayanımı (MPa) 28 günlük		75,38
Basınç dayanımı (MPa) 90 günlük		79,84
Yarmada çekme dayanımı (MPa) 28 günlük		5,06
Ultras ses geçiş hızı (km/sn) 28 günlük		4,65

Deneyel çalışmada çelik ve bazalt lifli donatıların aderans performanslarının karşılaştırılması amacıyla Belçika Mafsallı Kiriş numuneleri üretilmiştir. Üretilen Belçika Mafsallı Kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyde kirişin ortasında bir mafsal bulunmaktadır. Buradaki mafsalın amacı, donatıda oluşan F kuvvetinin doğru olarak hesaplanmasına imkân tanımdır. Deney sisteminde pistonla kirişe uygulanan P yükü ve mesnetlerde oluşan reaksiyonlar kullanılarak mafsalda momentin sıfır olduğu kabulü ile donatı üzerine gelen F kuvveti hesaplanmaktadır. Ayrıca bağlantı kabloları ile bilgisayardaki veri toplayıcılara bağlanan potansiyometrik cetveller yardımıyla da donatının betondan sıyrılma değerleri

kaydedilmektedir. Deney yöntemi Şekil 3.'de şematik olarak görülmektedir [8].



Şekil 3. Standart Belçika mafsallı kiriş deney düzeneği [9]

Kirişlerin üretiminde donatı ile betonun temas etmesi istenen kenetlenme bölgesi dışında kalan kısımlarda plastik kılıf geçirilip kılıf içerisine silikon sıkılarak bu kısımlara betonun girmesi engellenmiştir (Şekil 4).





Şekil 4. Donatının kenetlenme boyunun sınırlandırılması

Betonarmede nervürlü çubuklar için kenetlenme boyu TS 500 “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” 2000’de [10] belirtildiği şekilde Eşitlik 1. kullanılarak belirlenmektedir.

$$\ell_b = \left(0.12 * \frac{f_{yd}}{f_{ctd}} * \emptyset \right) \geq 20\emptyset \quad (1)$$

Eşitlikte;

ℓ_b : kenetlenme boyunu,

f_{yd} : donatının tasarım akma dayanımını,

f_{ctd} : kullanılan betonun tasarım çekme dayanımını,

\emptyset ise donatı çapını temsil etmektedir.

Çalışmada kullanılan yapay donatıda gevrek kopma oluşması nedeniyle donatıların formülde tanımlandığı şekilde akma dayanımları olmadığı için bu çalışmada kenetlenme boyu sabit 20Ø olarak kullanılmıştır.

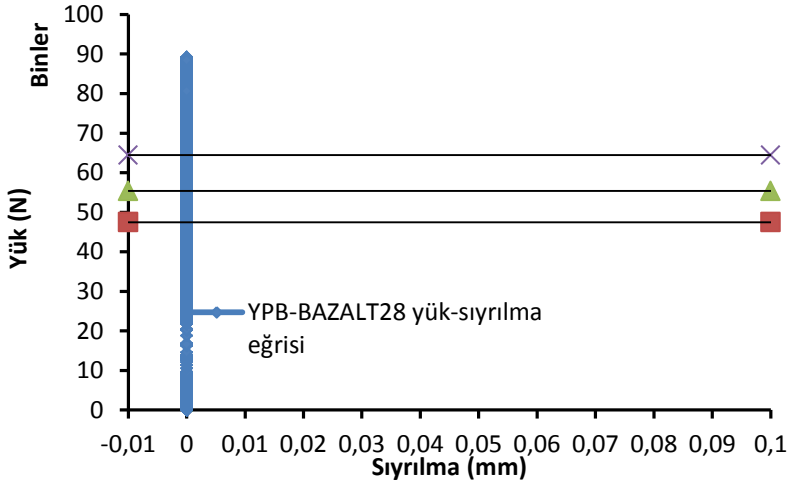
3.Bulgular ve Tartışma

Bazalt lifli donatının kullanıldığı YPB ile üretilmiş kiriş numunelerden alınan maksimum yük ve maksimum sıyrılma değerleri YPB-BAZALT28 ve YPB-BAZALT90 koduyla Tablo 3.'de görülmektedir.

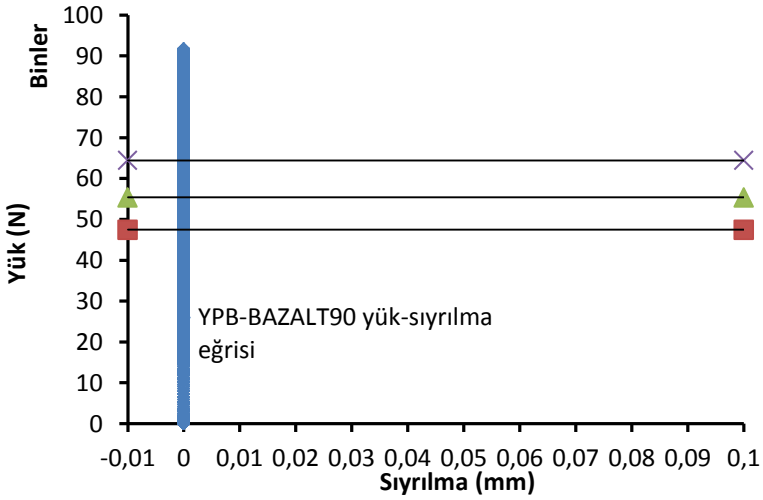
Tablo 3. Bazalt lifli donatı çubuğunun yük-sıyrılma değerleri

Donatı kodu	Maksimum Yük (N)	Potansiyometrik Cetvel (PC)	Maksimum sıyrılma (mm)
YPB-BAZALT28	89187,38	PC1	0
		PC2	0
YPB-BAZALT90	91764,50	PC1	0
		PC2	0

Tabloda görüldüğü üzere, bazalt lifli donatıların kullanıldığı YPB'lerde hem 28 hem de 90 günlük kür sürelerinde donatının çekme gerilmesine ulaştığı yük değerine kadar herhangi bir sıyrılma gözlenmemiş ve bazalt lifli donatı çekme dayanımına ulaştığı anda gevrek bir şekilde kopmuştur. Bazalt lifli donatının koptuğu anda donatı üzerindeki en büyük gerilme değeri ise 28 günlük numunede 788,98 MPa ve 90 günlük numunede ise 811,78 MPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu gerilme değerleri sadece bazalt donatının özelliği ile ilgili olsa da Şekil 5. ve Şekil 6'da sunulan yük sıyrılma grafikleri bazalt lifli donatının çelik için verilen sınır değerlerin oldukça üzerindeki çekme etkilerinde bile YPB ile aderansını kaybetmediğini göstermektedir.



Şekil 5. YPB'de bazalt lifli donatının 28 günlük yük-sıyırılma ilişkisi



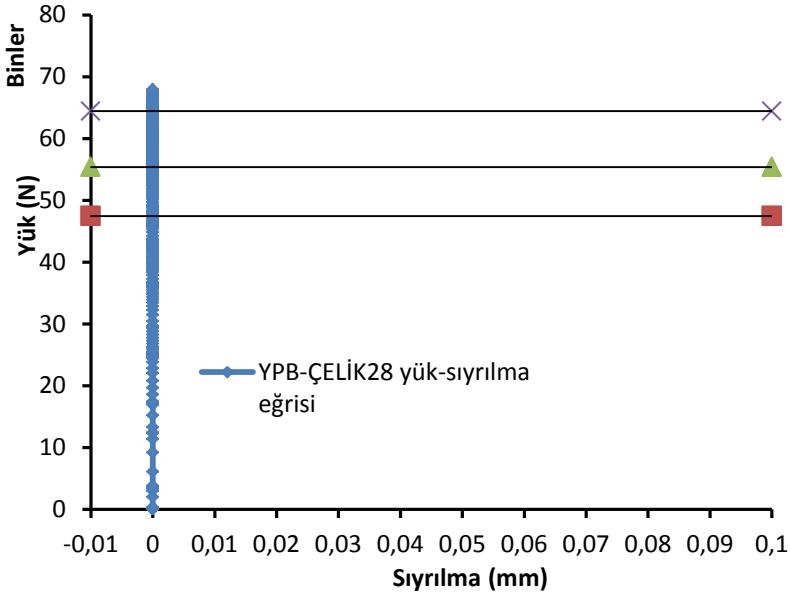
Şekil 6. YPB'de bazalt lifli donatının 90 günlük yük-sıyırılma ilişkisi

Çelik donatının kullanıldığı YPB ile üretilmiş kiriş numunelerden alınan maksimum yük ve maksimum sıyırılma değerleri de YPB-ÇELİK28 ve YPB-ÇELİK90 koduyla Tablo 4.'de görülmektedir.

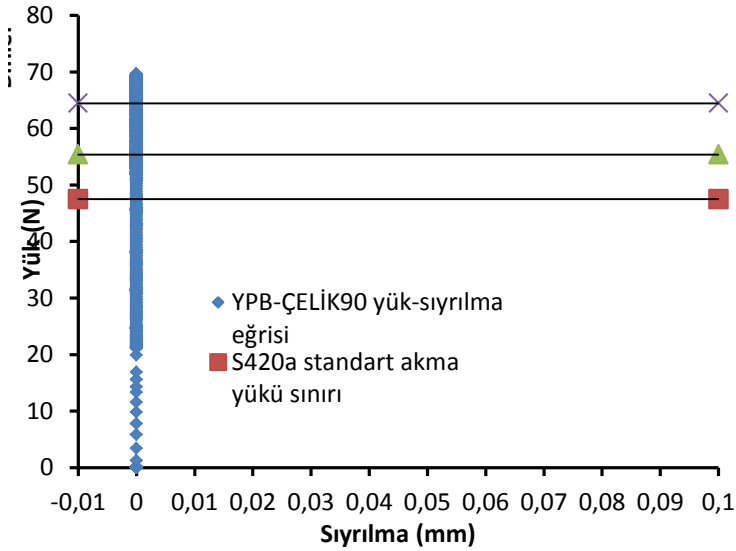
Tablo 4. Çelik donatı çubuğunun YPB'deki yük-sıyrılma değerleri

Donatı kodu	Maksimum Yük (N)	Potansiyometrik Cetvel (PC)	Maksimum sıyrılma (mm)
YPB-ÇELİK 28	67944,75	PC1	0
		PC2	0
YPB-ÇELİK 90	69663,00	PC1	0
		PC2	0

Tablo 4.'deki veriler değerlendirildiğinde, çelik donatının YPB'de hem 28 hem de 90 günlük kür sürelerinde donatıya ait akma, çekme ve kopma gerilmelerine ulaştığı yük değerlerinin hiçbirisinde YPB ile aderansını kaybetmediği görülmektedir. Ayrıca çelik donatıların çekme deneyinden elde edilen çekme gerilmesine denk gelen yükten daha fazla bir yük değerine ulaştığı görülmektedir. Bu durum, kiriş numunelerin orta kısmındaki donatının çekmeye maruz kalan serbest açıklığının daha kısa olması ile açıklanabilir. Çelik donatı kullanılan kiriş numunelerinde de bazalt donatıda olduğu gibi yük-sıyrılma grafikleri oluşturulmuştur. Hem çelik hem de bazalt donatı kullanılan beton serilerinde sıyrılma oluşmamasına rağmen grafik oluşturulması deney sonuçlarını anlaşılır sunabilmeye ve her bir donatıya gelen dolaylı çekme yükünün ulaştığı değerleri gözlemlemeye yardımcı olmuştur. Bazalt donatı ile YPB ilişkisine benzer şekilde çelik donatı için elde edilen yük-sıyrılma grafikleri de Şekil 7. ve Şekil 8.'de verilmiştir.



Şekil 7. YPB'de çelik donatının 28 günlük yük-sıyırılma ilişkisi



Şekil 8. YPB'de çelik donatının 90 günlük yük-sıyırılma ilişkisi

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Sonuçlar;

- Yüksek dayanımlı betonda çalışmada kullanılan bazalt lifli ve çelik donatıların her ikisi de aderansını hiç kaybetmeyerek kopma mukavemetine kadar betona tutunmuştur.
- Bu çalışmadaki yüksek dayanımlı beton gibi yüksek oranda çimento içeren betonlarda kenetlenme boyu uzun tutularak çekme deneyi yapılamayan kompozit çubuk malzemelerin çekme dayanımının Belçika mafsalı kiriş deneyi ile dolaylı olarak belirlenebileceği görülmüştür.
- Yüksek performanslı betonlarda bazalt lifli ve çelik donatılar gibi yüksek çekme dayanımı ve aderans kabiliyeti olan donatılar kullanıldığında kenetlenme boyunun bir miktar azaltılarak kullanılabilceği düşünülmektedir.

Öneriler;

- Bu çalışmadaki bazalt lifli donatıların normal betonlardaki aderans performansları üzerine deneysel çalışmalar yapılması faydalı olacaktır.
- Yapay donatıların yeni nesil yapı malzemeleri olması nedeniyle bazalt lifli donatılara benzer şekilde farklı liflerle üretilen yapay donatılarla ilgili olarak hem normal betonlarda hem de yüksek dayanımlı betonlarda karşılaştırmalı bir aderans araştırması yapılması literatürde önemli bir yere sahip olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Benli, A., “Kendiliğinden sıkışan betondaki donatı aderansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi (2007)

2. Bingöl, A.F., Gül,R.,”Donatı-beton aderansı, yüksek sıcaklıkların beton dayanımına ve aderansa etkileri konusunda bir derleme” Tübav Bilim Dergisi 2 (2),:211-230 (2009)
3. Celep, Z., “Betonarme yapılar” İstanbul Beta Dağıtım 6. Baskı (2011)
4. Emiroğlu, M., “Lastik agregalı kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve Mekanik özelliklerinin incelenmesi” Fırat üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi (2012).
5. Ahmet beycioğlu doktora tezi
6. İnternet: Yazıcı Kayhan, A.,H., Haldenbilen, S., Aydın, Y., Uslu, A., “Bazalt lifli donatı çubuklarının mekanik özelliklerinin betonarme elemanların davranışına etkisi” <http://www.spinteks.com/tr/wp-content/uploads/bazalt-lif-ve-donat%C4%B1-bildiri.pdf> Erişim 06.04.2013 saat :00:24
7. Benli, A., “Kendiliğinden sıkışan betondaki donatı aderansının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi” Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi (2007)
8. Arslan, M., E., “Eğilmede taşıyıcı hafif beton-donatı aderansının geleneksel beton-donatı aderansı ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi” Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi 2007.
9. Investigation of bond behavior between lightweight aggregate concrete and steel rebar using bending test", Mehmet Emin Arslan, Ahmet Durmuş, Computers and Concrete, Vol. 8, No. 4, , (2011)
10. TS 500 “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları” 2000.