

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Optimization of the Process Parameters by the Bees Algorithm in Milling of Austempered Ductile Cast Iron (GGG70) Material

Gürkan Ataş^{a*}, Mete Kalyoncu^b, Mevlüt Aydın^c, Muhammet Hüseyin Çetin^d

Submitted: 22.03.2023 Revised: 08.06.2023 Accepted: 11.09.2023 doi:10.30855/gmbd.0705084

ABSTRACT

The machinability of a material depends not only on its mechanical properties and microstructure, but also on the selection and control of process variables. By changing the cutting fluid, speed and depth in GGG-70 material, channels have been opened on the material surface by milling process with a width of 10 mm and a length of 50 mm. The machining process was carried out using a minimum amount of lubricant (MQL). As a result of experiments with different processing parameters, the surface roughness and surface hardness of the material were measured. Compared to the uncut surface hardness, an average hardness reduction of 2%-10% occurred as a result of milling. The level of cutting parameters did not cause a statistically significant change in the surface hardness value. The mathematical model between different cutting parameters and surface roughness was obtained decisively by regression analysis. The optimum parameters of the cutting fluid, its speed and depth were found by the Bees Algorithm, which is a meta-heuristic methods optimization method. According to the Bees Algorithm, the optimum milling conditions are vegetable oil, 180 m/min cutting speed and 0.5 mm cutting depth. Especially, the optimum performance of vegetable oil compared to boron oil is important from the point of view of sustainable environment.

Keywords: Minimum quantity lubrication, Bees Algorithm, Austempered ductile cast iron, Machining, Optimization.

^{a*} Tarsus University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
33400 - Mersin, Türkiye
Orcid: 0000-0001-7361-3789
e mail: gurkanatas@tarsus.edu.tr

^b Konya Technical University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
42250 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0002-2214-7631

^c Konya Technical University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
42250 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0001-5457-8340

^d Konya Technical University,
Faculty of Engineering,
Dept. of Mechanical Engineering
42250 - Konya, Türkiye
Orcid: 0000-0003-0429-5507

*Corresponding author:
gurkanatas@tarsus.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Minimum miktarda yağlama, Arı Algoritması, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir, Talaşlı imalat, Optimizasyon.

Östemperlenmiş Sfero Dökme Demir (GGG70) Malzemenin Frezelenmesinde Proses Parametrelerinin Arı Algoritması ile Optimizasyonu

ÖZ

Bir malzemenin işlenebilirliği sadece mekanik özelliklerine ve mikro yapısına değil aynı zamanda proses değişkenlerinin seçimine ve kontrolüne de bağlıdır. GGG-70 malzemenin frezelenmesinde kesme sıvısı türü, kesme hızı ve talaş derinliğini değerleri değiştirilerek, malzeme yüzeyinde 10 mm genişliğinde 50 mm uzunluğunda kanallar açılmıştır. Kesme sıvısı uygulaması minimum miktarda yağlayıcı (MMY) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı işleme parametreleri ile yapılan deneyler sonucunda malzeme yüzeyinin pürüzlülüğü ve sertliği ölçülmüştür. İşlenmemiş yüzey sertliğine kıyasla frezelenmiş yüzeylerde ortalama %2-%10 arasında sertlik düşüşü meydana gelmiştir. Sertlik değerlerinin değişimi ile parametre seviyelerinin değişimi arasında anlamlı bir istatistik oluşmamıştır. Farklı kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki matematiksel model 1. dereceden regresyon analizi ile elde edilmiştir. Kesme sıvısının, kesme hızının ve talaş derinliğinin optimum parametreleri metasezgisel optimizasyon metodu olan Arı Algoritması ile bulunmuştur. Arı Algoritmasına göre optimum frezeleme koşulları bitkisel yağ, 180 m/dk kesme hızı ve 0,5 mm kesme derinliğinin kullanıldığı şartlarda elde edilmiştir. Özellikle bitkisel yağın bor yağına kıyasla optimum performans sağlaması, sürdürülebilir çevre açısında önem arz etmektedir.

1.Giriş (Introduction)

Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir (GGG-70) malzemeler, küresel grafitli dökme demire östenitleme ve östemperleme ısıl işlemi uygulanması sonucu elde edilir [1]. GGG-70 malzemeler ösferrit bir mikro yapıya (ferrit+ östenit) sahiptir [2]. Karbonla zenginleştirilmiş östenit miktarı, GGG-70'in mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Ayrıca, talaşlı imalat sırasında sıcaklığa bağlı oluşan martenzit yapı, parçanın işlenebilirliğinin azalmasına neden olmaktadır [3].

Endüstriyel verimliliği artırmak ve maliyetlerini düşürmek için tasarım için uygun malzeme seçimi önemli bir esastır. Ham malzemeyi talaşlı imalat işlemi ile tasarımı şeklini vermek üretim maliyetlerini doğrudan etkileyen unsurlardandır. Bu nedenle istenilen mekanik özelliklere ve işlenebilirliği kolay yapıya sahip malzemenin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir [4][5]. GGG-70 malzemesinin yüksek mukavemet, aşınma direnci, süneklik ve yorulma mukavemeti gibi üstün özelliklerinin yanında endüstride kullanılabilirliğini kısıtlayan en önemli etken zayıf işlenebilirliğidir [6]. Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin talaşlı imalat ile işlenmesi sonucunda oluşan kesme kuvveti ve yüzey kalitesine östemperleme sıcaklığının, katılan alaşım element çeşidi, mikroyapısal özelliklerinin önemli etkileri olduğu ifade edilmiştir [7]. Bir malzemenin işlenebilirliği sadece mekanik özelliklerine ve mikro yapısına değil aynı zamanda proses değişkenlerinin uygun seçimine ve kontrolüne de bağlıdır. GGG-70 malzemesinin işlenmesinde, kesme hızının ve soğutma stratejilerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en fazla etkiye sahip parametre olduğu görülmüştür [8][9]. GGG-70'in işlenebilirliği üzerine yapılan bir diğer araştırma neticesinde kesme hızının artması ile kesme kuvveti düşerken yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. İlerleme hızının artmasıyla kesme kuvvetinin de arttığı ancak yüzey pürüzlülüğünde önemli bir değişim meydana gelmemiştir. Çalışmada kesme sıvısı olarak bor yağı kullanılmıştır [10].

Genel ifadeyle yüzey pürüzlülüğü, yüzeyin orta düzlemden sapsasıdır. Yüzey pürüzlülüğü, herhangi bir iş parçasının yorulma davranışı, korozyon direnci, sürünme, sürtünme, aşınma ömrü vd. tribolojik özelliklerinde önemli bir etkiye sahiptir [11]. GGG-70'in işlenebilirliğinde araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Son araştırmalar yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesine odaklanmıştır [12][13][14]. Talaşlı imalat prosesi sırasında takım ile parça arasında oluşan ısının atılması, sürtünmenin azaltılması, çıkan talaşın uzaklaştırılması, takım ömrünü uzatılması, işleme verimliliğinin ve yüzey kalitesinin iyileştirmesi için kesme sıvıları kullanılmaktadır [15][16]. Kesme sıvısı, talaş kaldırma işlemi sırasında önemli bir rol oynar. Ancak soğutma sıvısının genel olarak kullanımı minimize edilmediğinde insan sağlığı ve çevre üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Ayrıca imalat sanayinde üretim maliyetinin ciddi bir miktarını oluşturmaktadır[17]. Sürdürülebilirlik açısından kesme sıvılarının talaşlı imalatta kullanım etkinliğini artırmak için minimum miktarda yağlama olarak adlandırılan MMY cihazları kullanılmaktadır. MMY'de temel amaç, belirli bir işleme koşuluna soğutma sıvısı ve yağlayıcı ihtiyaçlarını karşılayacak minimum miktarda kesme sıvısı sağlamaktır. Bunun yanında takım ömrü, işleme performansı, kesme sıvısının verimli kullanılması ve zararlı çevresel etkilerinin daha az olması açısından günümüzde MMY cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır [18][19].

Talaşlı imalat endüstrisinde kullanılan kesme sıvıları sentetik-yarı-sentetik, bitkisel ve mineral esaslı olarak sınıflandırabiliriz. Afonso vd. [20] bitkisel yağların frezeleme işlemindeki performansını sürtünme katsayısı, aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık parametrelerine etkisini istatistiksel olarak araştırmışlardır. Çalışmada üç farklı seviyede mil devri, ilerleme hızı ve eksenel derinlik parametreleri ile kuru, ticari yağ ve bitkisel yağ koşullarında frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre bitkisel yağın ticari yağa kıyasla daha fazla soğutma etkisinin olduğu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri analiz edildiğinde ticari yağ ve bitkisel yağ ile yakın değerler elde edildiği belirlenmiştir. Fakat bitkisel yağın ekolojik açıdan olumsuz etkileri nedeniyle bitkisel yağ kullanımının avantaj olduğu belirtilmiştir. Alshibi vd. [21] bitkisel esaslı yağlayıcının frezeleme uygulamalarındaki performansını AZ91 malzemenin takım aşınması, talaş genişliği, talaş temas uzunluğu, talaş oranı, talaş segmentasyon oranı ve kesme açısı parametreleri açısından araştırmışlardır. Frezeleme işleminin maksimum verimle gerçekleştirilebilmesi için MMY akış hızı, kesme hızı ve ilerleme hızı parametreleri deneysel ve tahmin metodu (gri ilişki analizi) ile optimize edilmiştir. Deneysel ve tahmin metodu ile elde edilen sonuçlara göre 40 mL/sa MMY akış hızı, 300 m/dk kesme hızı ve 0,3 mm/dev ilerleme hızı parametreleri optimum parametreler olarak belirlenmiş ve MMY yöntemi ile kullanılan bitkisel yağın sürtünme kuvveti ve kesme sıcaklığının minimizasyonunda önemli rol oynadığı görülmüştür. Cönger [22], AA6061 malzemesinin frezelenmesi

işleminde nano MoS₂ takviyeli bitkisel esaslı yağlayıcının kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, kesme ve ilerleme kuvveti, kesici takım yüzey aşınması parametrelerini analiz ederek araştırmışlardır. Çalışma kapsamında deneyler kuru, MMY ve nano MoS₂ takviyeli yağlayıcı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre hem bitkisel yağın hem de nano MoS₂ takviyeli bitkisel esaslı yağlayıcının yüzey kalitesini arttırdığı belirlenmiştir. Li ve Chou [23], MMY yöntemi ile mikro frezeleme işleminin takım ömrünü etkisini deneysel olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada mil dönme hızı, ilerleme oranı ve hava debisi parametreleri için üçer seviye belirlenmiş olup deneyler kuru ve bitkisel esaslı yağlayıcı (MMY) ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 1,88 ml/sa yağ debisi ve 40 l/dk hava akış oranı optimum parametreler olarak belirlenmiştir. MMY yöntemi ile bitkisel yağ kullanımının iş parçasının yüzey kalitesini ve takım ömrünü arttırdığı sonucuna varılmıştır. Uysal vd. [24], MMY yöntemi ile kullanılan bitkisel yağ ve nano MoS₂ takviyeli (ağırlıkça %1) bitkisel esaslı yağın talaşlı imalat uygulamalarındaki tribolojik performansını yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması analizi ile araştırmışlardır. Deneyler 20 ml/sa ve 40 ml/sa olmak üzere iki farklı debi seviyesinde MMY yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre debi arttıkça (40 ml/sa) ve yağlayıcı kullanımı ile yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının azaldığı belirlenmiştir. Kuram vd. [25], bitkisel yağ ve yarı sentetik yağların frezeleme işlemindeki performansını takım aşınması ve kesme kuvveti analizi ile araştırmışlardır. Çalışma kapsamında AISI 304 paslanmaz çelik malzemesi kanola yağı, ayçiçek yağı ve yarı sentetik ticari yağ kullanılarak frezeleme işlemine tabi tutulmuş olup kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve yağlayıcı parametrelerinin etkisini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre ayçiçek esaslı bitkisel esaslı yağın yarı sentetik yağla kıyasla takım aşınması ve kesme kuvvetinin minimizasyonu açısından daha etkili olduğu belirlenmiştir. Çelik [26], nano MoS₂ takviyeli yarı sentetik yağın GGG70 küresel grafitli dökme demir malzemesinin frezelenmesi işlemindeki performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada MMY yöntemi kullanılmış ve üç farklı oranda (%0,5, %1, %1,5) nano MoS₂ takviye edilmiş olup deneyler üç farklı seviyede basınç (3, 5 ve 7 bar) ve iki farklı seviyede akış oranında (160 ve 310 ml/sa) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yağlayıcıların takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre minimum yüzey pürüzlülüğü değeri (0,47 µm) MMY + % 0,5 MoS₂ yağlayıcı ortamında, 5 bar basınç ve 160 ml/dak akış oranı parametreleri ile elde edilmiştir. Çetin vd. [27], bitkisel esaslı yağlar ve yarı sentetik yağların tornalama işlemindeki performansını takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre AISI 304 paslanmaz çeliğin tornalanmasında bitkisel esaslı yağların yarı sentetik yağlara kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Makhesana vd. [28], Bitkisel esaslı yağlayıcı ve katı yağlayıcının tornalama işlemindeki performansını yüzey pürüzlülüğü, takım-talaş arayüzündeki sıcaklık, talaş morfolojisi parametrelerine etkisi ile araştırmışlardır. Çalışma kapsamında AISI 4140 malzemesi iki farklı kesme hızında (100 ve 170 m/dak) parametrelerinde ve yağlayıcı ortamında tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre bitkisel esaslı yağlayıcının katı yağlayıcıya kıyasla daha etkili olduğu belirlenmiştir. Bitkisel esaslı yağlayıcının yüzey pürüzlülüğünü ve takım-talaş arayüzündeki sıcaklığı sırasıyla %27 ve %31 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır. Lu vd. [29], sıkıştırılmış grafit dökme demirin frezelenmesi işlemi yüzey pürüzlülüğü için etkili kesme parametrelerini deneysel ve Gauss regresyon analizi metodu ile araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu açısından en etkili parametrelerin kesme hızı ve ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir. Ek olarak deneylerden elde edilen sonuçlarla Gauss regresyon analizinden elde edilen sonuçların uyumluluk gösterdiği sonucuna varılmıştır.

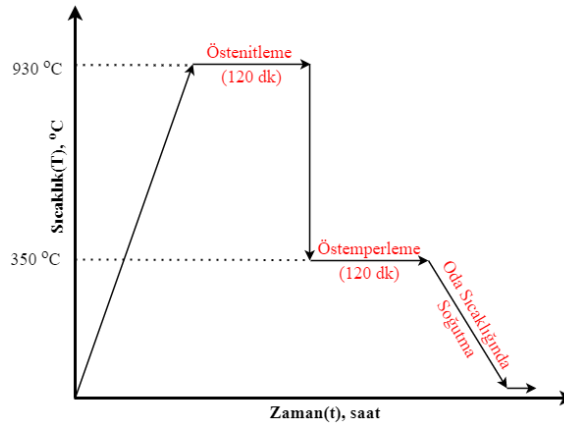
Talaşlı imalatta proses işleme parametrelerinin doğrusal olmayan ilişkileri ve karmaşık olmasından dolayı matematiksel teoriler kullanılmaktadır. Gelişen yapay zekâ teknikleri sayesinde talaşlı imalat prosesleri daha yüksek güvenilirlik seviyesinde optimize edilebilmektedir. Talaşlı imalatta optimum işleme parametrelerinin belirlenmesi ve optimizasyon için klasik ve sezgisel algoritmalar kullanılabilir. Yaygın kullanılan algoritmalar Yapay Sinir Ağları (YSA), Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS), Genetik Algoritma (GA), Bulanık Mantık (BM), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Karınca Koloni Optimizasyonu (KKO), Arı Algoritması (AA) şeklindedir [30]. Arı Algoritması (AA) Pham ve ark. (2006) tarafından ileri sürülmüş bal arılarının kaynak tarama davranışından esinlenen sürü tabanlı bir algoritmadır. Arı Algoritması doğadaki arıların problem çözme yeteneklerini dikkate alan metasezgisel bir yöntemdir [31]. Talaşlı imalat proseslerinin optimize edilmesi ile ilgili literatür çalışmalarına baktığımızda; işleme parametreleri değiştirilerek (kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızı) kuru şartlarda Nikel-Demir bazlı alaşım (Inconel 718) 'ın talaş kaldırılarak yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre değerleri regresyon analizi ile elde edilmiş ve Genetik Algoritma (GA) kullanılarak doğrulanmıştır[32]. Yüksek mukavemet, iyi termal direnç ve düşük aşınma gibi mekanik özelliklerinden dolayı Inconel 800 alaşımı havacılık endüstrisinde

kullanılmaktadır. Bu iyi mekanik özelliklerinin yanında düşük işlenebilirliği bir dezavantajdır. Bu malzemeye tel erozyonla işlenebilirliğinde kesme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve tel tüketim oranı gibi proses parametreleri Hibrit Parçacık Sürü Algoritması (PSO) kullanılarak optimize edilmiştir [33].

Bu çalışmanın özgün değeri GGG-70 malzemenin frezelenmesinde dikkate alınan kesme parametrelerinin Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmesidir. Kesme parametresi olarak farklı kesme hızı, talaş derinliği parametreleri ve farklı kesme sıvıları kullanılmıştır. Bor, yarı sentetik ve bitkisel yağın dikkate alındığı çalışmada, kesme sıvılarının Arı Algoritması kullanılarak optimize edilmesi literatür için tektir. Çıkış parametresi olarak yüzey pürüzlülüğü ve sertlik incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material and Method)

Küresel grafitli dökme demir deney numuneleri Konya OSB'de bulunan Motus A.Ş.'de kum kalıba döküm yöntemi ile dikdörtgenler prizması şeklinde 300x50x50 mm boyutlarında üretilmiştir. Üretim sonrası numunelere 930°C'de 120 dk süre boyunca östenitleme, daha sonra 350°C'de 120 dk süre boyunca östemperleme ısı işlemi Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Döksan Isıl İşlem Tesisleri'nde yapılmıştır (Şekil 1)[10]. Küresel grafitli dökme demirin dayanımının artırılması ve içyapıdaki çarpılmaların azaltılması için östemperleme işlemi yapılmıştır. Östemperleme işlemi yapılmış küresel grafitli dökme demirin mikro yapısında yüksek oranda küresel karbonlu kalıntı östenit ve beyitik bir mikro yapı oluşmaktadır. Bu mikroyapı, küresel grafitli dökme demir malzemede tokluk, mukavemet ve işlenebilirliğine olumlu katkısı vardır[34].



Şekil 1. Küresel grafitli dökme demire östemperleme işlemi(austempering process of spheroidal cast iron) [10]

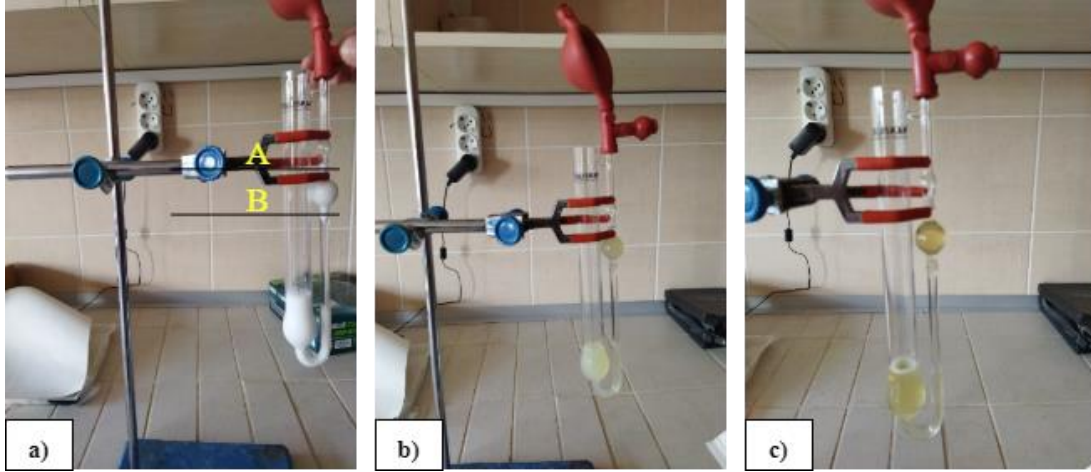
Deney numunelerinin kimyasal analizi, OBLF RS1000- 162 model optik emisyon spektrometresi kullanılarak Motus A.Ş.'de yapılmıştır. Dökülen numunelere ait kimyasal analiz çıktısı Tablo 1'de verilmiştir [10].

Tablo 1. GGG-70 test numunelerinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of GGG-70)[10]

Fe	C	Si	Mn	Cu	Mg	Ni	Mo
Bal.	3,56	0,08	2,33	0,826	0,033	0,599	0,191

GGG70 malzemesinin frezelenmesinde kesme sıvısı olarak bor, yarı sentetik ve bitkisel yağ kullanılmıştır. Deneysel çalışmada GENEREX URS marka yarı sentetik ve GENEREX SE-LF/14 marka bitkisel yağ kullanılmıştır. GENEREX URS marka yarı sentetik yağ, su ile stabil şekilde karışabilen ve talaşlı imalat işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yarı emülsiyon soğutma sıvısıdır. GENEREX SE-LF/14 marka bitkisel yağ su ile karışabilen, çevreye zarar vermeyen ve işlenen malzemelerin korozyon direncini arttıran soğutma sıvısıdır. Mevcut çalışmada kullanılan yarı sentetik ve bitkisel yağlar, su ile karışabilme kolaylığı ve yüksek tribolojik performansları sebebiyle kesme sıvısı olarak tercih edilmiştir.

Kesme sıvıları, literatür verileri dikkate alınarak saf suda %5 konsantrasyon ile hazırlanmıştır [35]. Kullanılan kesme sıvılarının karakteristik özelliklerinin belirlemek amacıyla Ubbelohde Viskozimetresi kullanılarak dinamik viskoziteleri ölçülmüştür (Şekil 2).



Şekil 2. Ubbelohde viskozimetresi ile kesme sıvılarının viskozitelerinin ölçümü a) bor b) yarı sentetik c) bitkisel yağ (Measurement of viscosities of cutting fluids with Ubbelohde viscometer a) boron b) semisynthetic c) vegetable fluid)

Kesme sıvılarının (%5 konstrasyon ile hazırlanmış) kapiler içerisine yerleştirilmeden piknometre ile gerçek yoğunlukları (ρ) ölçülmüştür. Şekillerdeki kapilerler üzerinde

A ve B noktaları arasındaki V hacmine yerleştirilen saf suyun (referans sıvı) akış süresi belirlenmiştir. Kesme sıvılarına da aynı işlem uygulanmıştır. Poiseuille tarafından geliştirilmiş olan bağıntıya dayanılarak sıvıların dinamik viskozitesi (η) hesaplanmıştır. Denklem 1'de Poiseuille bağıntısı verilmiştir. Burada 2 indisıyla gösterilen büyüklükler viskozitesi tayin edilmek istenen sıvıyla alakalı, 1 indisıyla gösterilen büyüklük ise viskozitesi bilinen referans sıvının değeridir.

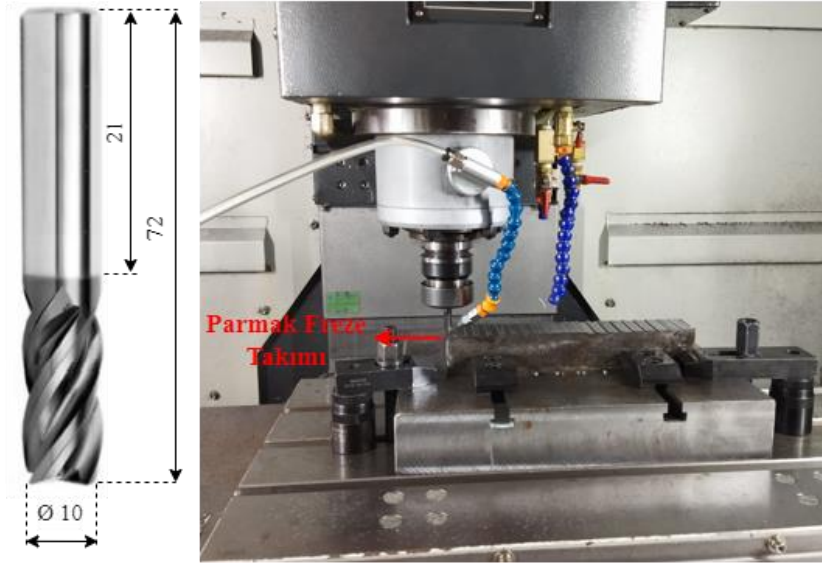
$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1} \quad (1)$$

Tablo 2'de elde edilen yoğunluklar ve akış süresi verilmiştir. Poiseuille bağıntısında iki ayrı sıvı için aynı denklemde yazılıp taraf tarafa oranlanarak viskozite değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 2. Kesme sıvılarının dinamik viskozite değerlerinin hesaplanması (Calculation of dynamic viscosity values of cutting fluids)

Kesme Sıvısı	Yoğunluk, ρ ,(gr/ml)	Akış Süresi, t,(sn)	Dinamik Viskozite (cp)
Bor Yağı	0,9950	53,39	1,3648
Yarı Sentetik Yağ	0,9990	53,03	1,3611
Bitkisel Yağ	0,9997	48,79	1,2531

Dikdörtgen prizması (300x50x50 mm) şeklinde olan deney numuneleri bağlama aparatları yardımıyla CNC dik işlem tezgahına yerleştirilmiştir. Talaş kaldırmak için kesici takım olarak 10 mm çapında, 4 ağızlı, AlCrN (Alüminyum krom nitrid) kaplı karbür parmak freze kullanılmıştır (Şekil 3). Deneylerde dikkate alınan frezeleme değerleri Tablo 3'te verilmiştir. GGG70 malzemenin boyuna frezelenmesinde, ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı etkisi olmaması sebebiyle deney tasarımında ilerleme hızı (0,05 mm/diş) sabit alınmıştır [10]. Parametrelerin belirlenmesinde ön deneyler ve literatür dikkate alınmıştır [10][8][36]. Deney tasarımı tam faktöriyel tasarım metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

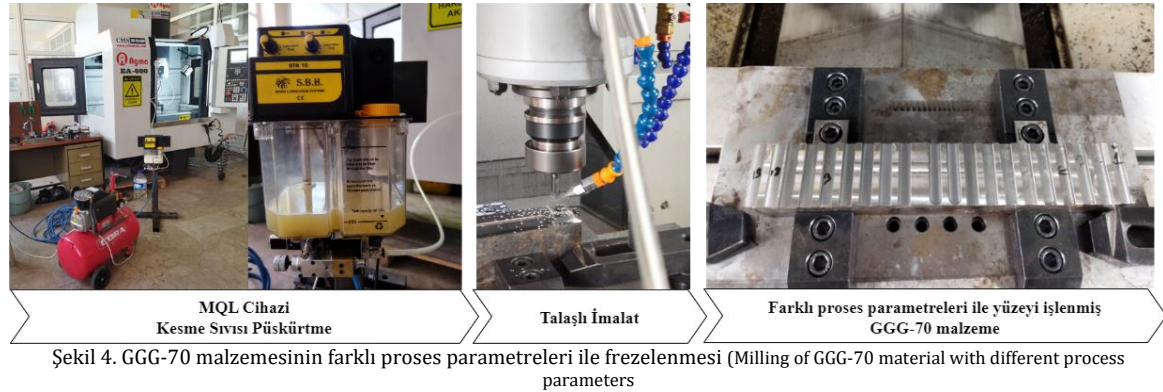


Şekil 3. CNC Dik İşlem Merkezi ve karbür parmak freze takımı (CNC Vertical Processing Center and carbide milling cutter tool)

Tablo 3. Frezeleme işleme parametreleri (Milling machining parameters)

Parametreler	1. Seviye (Alt seviye)	2. Seviye (Orta seviye)	3. Seviye (Üst seviye)
Kesme Hızı (m/dk)	60	120	180
Talaş Derinliği (mm)	0,5	1	1,5
Kesme Sıvıları (cp)	Bor solüsyonu (1,3648)	Yarı sentetik (1,3611)	Bitkisel esaslı (1,2531)

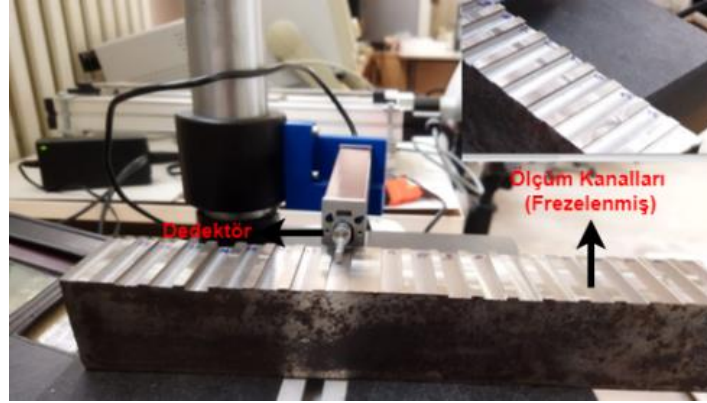
Frezeleme esnasında minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi CNC'ye entegre edilmiştir. MMY cihazı kompresöre bağlanmış ve yüksek basınçlı hava yardımıyla kesme sıvısı 30 ml/dk. debiyle talaş kaldırma bölgesine gönderilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. GGG-70 malzemesinin farklı proses parametreleri ile frezelenmesi (Milling of GGG-70 material with different process parameters)

2.1. Yüzey Pürüzlülük (Surface roughness)

Farklı kesme sıvısı, talaş derinliği ve kesme hızı parametreleri kullanılarak yapılan frezeleme işleminde her numunenin yüzey pürüzlülüğü değerleri üç farklı noktadan alınan üç adet ölçüm değerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde örnekleme uzunluğu (cut-off) 0,8 mm ve örnekleme sayısı 3 olarak seçilmiştir. Parçanın eksenine paralel olarak yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Mitutoyo marka, SJ-301 model yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır (Şekil 5). Pürüzlülük ölçümlerinde ortalama pürüzlülük değeri olan Ra dikkate alınmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin anlamlılığı regresyon katsayısı ve varyans analizi (ANOVA) değerleri ile belirlenmiştir.



Şekil 5. Yüzey pürüzlülük ölçüm ekipmanı (Surface roughness measuring equipment)

2.2. Rockwell Sertlik Ölçümü (Surface roughness)

İşlenen yüzeylerin sertlik ölçümü Rockwell sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. İşlenen her bir yüzeyin üç farklı noktasından sertlik ölçümü gerçekleştirilerek yüzeylerdeki sertlik değişiminin homojenliği test edilmiş ve homojen dağılımı sağlayan verilerin ortalaması sertlik değeri olarak dikkate alınmıştır. Sertlik değerlerinin anlamlılığı regresyon katsayısı ve varyans analizi (ANOVA) değerleri ile belirlenmiştir. Frezelenmemiş yüzey sertliği ise 32 HRC olarak ölçülmüştür.



Şekil 6. Rockwell sertlik ölçüm deney ekipmanı (Rockwell hardness measurement experimental equipment)

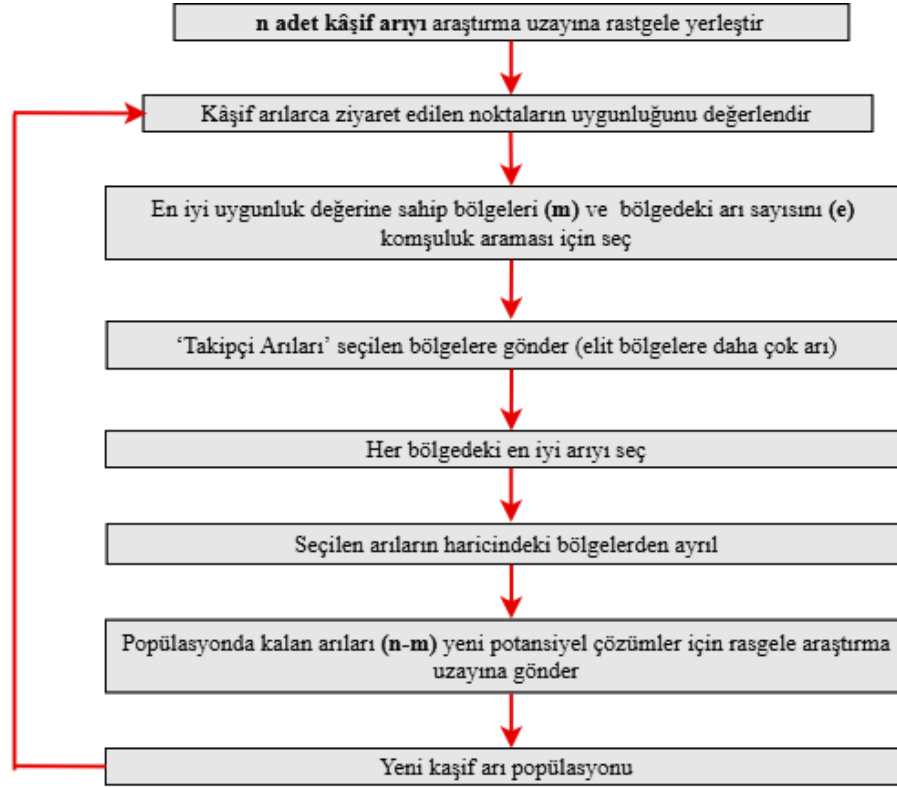
2.3. Arı Algoritması (The Bees Algorithm)

Bu çalışmada temel amaç GGG70 östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin frezelenmesi sonucunda yüzey pürüzlülüğünü minimum yapan kesme parametrelerini belirlemektir. Arı Algoritması (AA) problem çözümünde amaç fonksiyonunu dikkate alarak çözüm üretmektedir. Amaç fonksiyonu için tam faktöriyel deney tasarımlarında regresyon denklemi kullanılabilir. Arı Algoritması genel olarak kâşif arı sayısı (n), ziyaret edilen n nokta içinden seçilen bölge sayısı (m), seçilen m bölge içindeki en iyi bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı (nep), kalan ($m-e$) bölgeye gönderilen arı sayısı (nsp), bölge boyutu (ngh) ve durdurma kriteri (itr) parametrelerini içermektedir. Bu parametrelerin optimizasyonda neleri ifade ettikleri tablo şeklinde aşağıda verilmiştir (Tablo 4)[31] [37] [38].

Tablo 4. Arı Algoritması parametreleri (Bees algorithm parameters) [31] [37] [38]

AA Parametresi	Açıklama
n	Kâşif arı sayısı
m	Ziyaret edilen ' n ' noktadan seçilen bölge sayısı
e	Seçilen ' m ' bölge içindeki en iyi bölge sayısı (elit bölge)
nep	En iyi ' e ' bölgeye gönderilen arı sayısı
nsp	Kalan ($m-e$) bölgeye gönderilen arı sayısı
ngh	Komşuluk araması boyutu
itr	Durdurma kriteri (iterasyon sayısı)

Pham ve ark. (2006) tarafından hazırlanan temel AA akış şeması Şekil 7' deki gibidir [31] [37] [38];



Şekil 7. Arı Algoritması akış şeması (The flow chart of the Bees Algorithm) [31][37][38].

AA'da kısıtların belirlenmesi önem taşımaktadır. Amaç fonksiyonunda dikkate alınan değişkenlerin alt ve üst sınırları aşağıda verilmiştir.

1,253 cp < Kesme Sıvısı Viskozitesi < 1,364 cp
 0,5 mm < Kesme Derinliği < 1,5 mm
 60 m/dk < Kesme Hızı < 180 m/dk

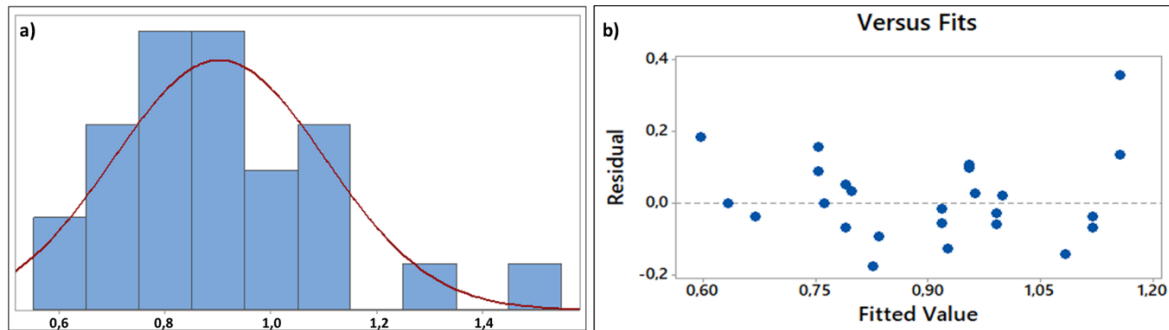
Sınırlayıcılar doğrultusunda ve regresyon denklemi kullanılarak AA ile minimum yüzey pürüzlülüğü için optimum kesme parametreleri araştırılmıştır. AA programında başlangıç kâşif arı sayısı 50 olarak seçildi. Diğer başlangıç parametreleri ise şu şekilde alınmıştır; itr=100; n=70 ; m=8; e=5; nsp=7; nep=10; ngh=0,01 AA için kullanılacak değerler literatürden elde edilmiştir [31] [37] [38].

3. Deneysel Sonuçlar, Analiz ve Tartışma (Experimental Results, Analysis and Discussion)

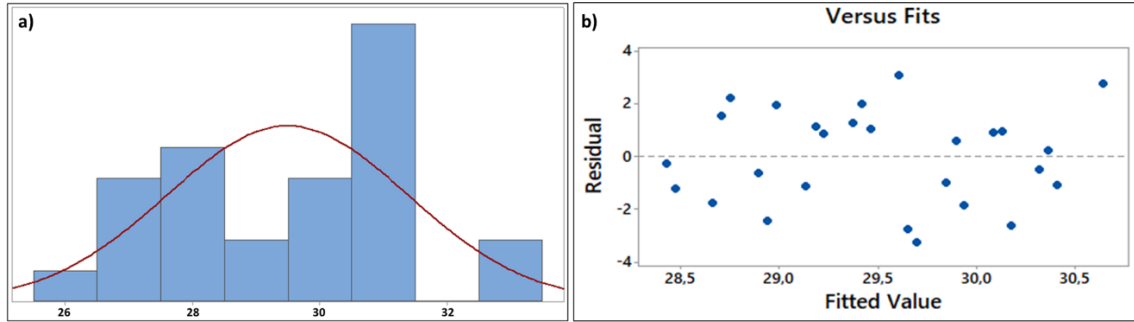
Frezeleme deneylerinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama 0,90 μm ve standart sapma değeri 0,20 μm olarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen histogram grafiği ve saçılım grafiği Şekil 8'de verilmiştir. Elde edilen grafik normal dağılım eğrisi ile uyum göstermektedir. Tablo 6'da verilen ANOVA ile elde edilen sonuçlarda regresyon katsayısı değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Regresyon katsayısı değerinin yüksek olmasına bağlı olarak fit değerleri de merkez regresyon eğrisi etrafında konumlanmış ve çok düşük sapma değerleriyle (maksimum 0,4) regresyon doğrusundan uzaklaşmıştır. Bu duruma bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü verilerinin istatistiksel olarak anlamlılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Sertlik için ortalama değer 29,492 HRC ve standart sapma değeri 1,896 HRC olarak elde edilmiştir. Yüzey sertliği için elde edilen histogram grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Elde edilen grafiğin normal dağılım eğrisi ile uyum göstermediği görülmektedir. Sertlik parametresi için elde edilen saçılım grafiğinde fit değerlerinin regresyon eğrisinden uzaklaştığı görülmektedir. Bu durum normal dağılım grafiğini destekler nitelikte olup sertlik verilerinden istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilemeyeceği öngörülmüştür. İstatistiksel anlamlılığın ileri analizi amacıyla hem yüzey pürüzlülüğü hem de sertlik için elde edilen varyans analizi tabloları ve regresyon katsayısı değerleri Tablo 6 (Ra) ve Tablo 7'de (HRC) verilmiştir.

Tablo 5. Talahlı imalat proses parametrelerine bağlı GGG-70 malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Change of surface roughness of GGG-70 material depending on machining process parameters)

Deneş No	Kesme Sıvısı(cp)	Kesme Derinliği (d; mm)	Kesme Hızı (v; m/dk)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)			Sertlik (HRC)		
				1.Deneş	2.Deneş	3.Deneş	Genel Ort.	Genel Ort.	
1	Bor Yağı	0,5	60	0,92	0,97	0,93	0,94	33,40	
2			120	0,90	0,85	0,84	0,86	29,30	
3			180	0,77	0,90	0,85	0,84	27,55	
4		1	1,5	60	1,03	1,01	1,11	1,05	28,05
5				120	1,03	1,15	1,01	1,06	26,45
6				180	0,71	0,76	0,68	0,72	30,50
7		0,5	1,5	60	1,55	1,46	1,52	1,51	30,10
8				120	1,02	0,92	0,94	0,96	30,95
9				180	0,60	0,71	0,64	0,65	30,95
10	Yarı Sentetik Yağ	0,5	60	1,03	0,90	0,88	0,94	30,60	
11			120	0,84	0,94	0,92	0,90	31,10	
12			180	0,91	0,86	0,97	0,91	30,50	
13		1	1,5	60	1,09	1,08	1,06	1,08	26,87
14				120	1,12	0,98	1,05	1,05	31,40
15				180	0,85	0,88	0,78	0,84	30,30
16		0,5	1,5	60	1,33	1,21	1,33	1,29	26,50
17				120	0,93	1,03	0,82	0,93	30,23
18				180	0,65	0,64	0,67	0,65	27,23
19	Bitkisel Yağ	0,5	60	0,84	0,75	0,82	0,80	29,80	
20			120	0,81	0,74	0,72	0,76	31,00	
21			180	0,83	0,80	0,71	0,78	28,85	
22		1	1,5	60	1,08	0,99	0,91	0,99	32,70
23				120	0,82	0,82	0,85	0,83	30,65
24				180	0,67	0,57	0,64	0,63	28,00
25		0,5	1,5	60	1,04	1,03	1,00	1,02	28,27
26				120	0,77	0,68	0,78	0,74	26,87
27				180	0,61	0,66	0,61	0,63	28,17



Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğü verileri için normal dağılım grafiği (Normal distribution plot for surface roughness data)



Şekil 9. Sertlik verileri için normal dağılım grafiği (Normal distribution plot for surface hardness data)

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analiz tablosu (Variance analysis table for surface roughness)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Etki
Kesme Sıvısı	2	0,14727	0,073633	13,08	0,003	14,09
Kesme Derinliği	2	0,02629	0,013144	2,34	0,159	2,55
Kesme Hızı	2	0,49020	0,245100	43,55	0,0002	46,95
Kesme Sıvısı*Kesme Derinliği	4	0,02278	0,005694	1,01	0,456	2,18
Kesme Sıvısı*Kesme Hızı	4	0,02627	0,006567	1,17	0,394	2,51
Kesme Derinliği*Kesme Hızı	4	0,28604	0,071511	12,71	0,002	27,40
Error	8	0,04502	0,005628			4,32
Total	16	1,04387				100

R-Sq: %95,69 R-Sq (Adj): %85,98

Tablo 7. Yüzey sertliği için varyans analiz tablosu (Variance analysis table for surface hardness)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	% Etki
Kesme Sıvısı	2	0,5619	0,2809	0,07	0,929	0,63
Kesme Derinliği	2	9,1883	4,5941	1,21	0,346	9,83
Kesme Hızı	2	2,0572	1,0286	0,27	0,769	2,20
Kesme Sıvısı*Kesme Derinliği	4	22,9982	5,7496	1,52	0,284	24,61
Kesme Sıvısı*Kesme Hızı	4	20,2763	5,0691	1,34	0,335	21,70
Kesme Derinliği*Kesme Hızı	4	8,0617	2,0154	0,53	0,716	8,63
Error	8	30,2737	3,7842			32,40
Total	26	93,4173				

R-Sq: %67,59 R-Sq (Adj): %0,00

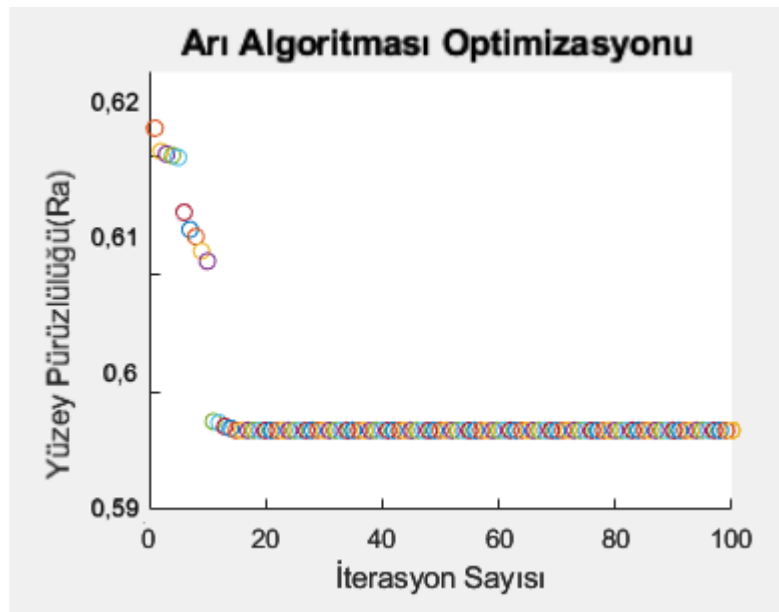
Varyans ve regresyon analizi sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünün %85,98 uyumlulukta modellenildiği (Tablo 6), fakat yüzey sertliği analizinde bu değer için R-Sq değeri %67,59 oranında elde edilmiş olsa da, çoklu parametre ile çalışıldığı için R-Sq (Adj) değerinin dikkate alınması gerekmektedir. Sertlik değeri için elde edilen sıfır değeri ile varyans analizi sonuçları da uyumludur. Tablo 7’de verilen %95 güven aralığındaki “p” değerlerine göre, frezeleme parametrelerinin sertlik değişimi üzerinde istatistiksel ve fiziki olarak anlamlı bir değişim meydana getirmediği ($p < 0,05$: anlamlılık seviyesi) belirlenmiştir [39]. Sertlik değişimi belirleyen temel parametre, malzemenin işlenmesi esnasında oluşan ısınma ve ani soğuma etkisidir. Frezeleme esnasında kesme sıvısı kullanıldığı için kesme ara yüzeyinde maksimum 400 ile 650°C sıcaklık oluştuğu iddia edilebilir [40][41]. Bu değerlerin menevişleme sıcaklığı değerleri olması sebebiyle parça yüzeyinde bir miktar yumuşama etkisi olmuş ve sertlik değerlerinde ~2 HRC değerinde düşüş meydana gelmiştir. İlâveten, oluşan sıcaklık değerlerinin değişim aralığı kesme parametrelerinin değişiminden anlamlı derecede etkilenmediği için sertlik değişiminde de anlamlı bir değişim elde edilememiştir. Elde edilen bu sonuca göre Arı Algoritması ile optimizasyon için sertlik değeri dikkate alınmamıştır.

Yüzey pürüzlülüğü sonuçları için elde edilen varyans analizi tablosunda ise (Tablo 6) “p” değerlerine göre, frezeleme parametrelerinin Ra değişimi üzerinde istatistiksel ve fiziki olarak anlamlı bir değişim meydana getirdiği görülmektedir. Kesme sıvısı ve kesme hızı için elde edilen “p” değerleri 0,05 değerinden küçük olarak hesaplanmıştır. Kesme sıvısı Ra değerini %14,09, kesme hızı ise %46,95 oranında etkilemiştir. Elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur [42][43]. Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen R-Sq (Adj) değeri %85,98 değeri ile yeterli anlamlılık seviyesindedir. İlâveten, farklı parametre değişkenleri ile yapılan deneylerin matematiksel modeli Minitab programında regresyon Analizi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu matematiksel model (Denklem 2) yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri ile olan ilişkisini göstermektedir. Matematiksel model optimizasyondaki amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada Arı Algoritmasının modellenmesi için regresyon denklemi yani amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

$$Ra = -0,730 + 1,426s + 0,0717d - 0,002755v \quad (2)$$

Arı Algoritması optimizasyonu işleminde, amaç fonksiyonunun iterasyon sayısı ile değişimi Şekil 10'da görülmektedir. Arı Algoritmasında minimizasyon hedefi için modelleme yapılmıştır. Arı Algoritması Matlab programında çalıştırılmış ve optimum yüzey pürüzlülük değerinin 40. iterasyondan sonra sabit kaldığı belirlenmiştir. Optimizasyon sonucu işleme parametrelerinin en uygun değerleri; kesme sıvısında bitkisel yağ, kesme derinliğinde 0.5 mm ve kesme hızında 180 mm/dk olarak bulunmuştur. Bu değerler sonucu elde edilen tahmini yüzey pürüzlüğü değeri (Ra) 0,59 μm 'dir. Ra minimizasyonunda en uygun kesme sıvısının bitkisel yağ olması bor yağına kıyasla sürdürülebilir çevre açısından önem arz etmektedir.

Bitkisel yağın viskozite değerinin diğer yağlara kıyasla ~%8 oranında daha az olması, bitkisel yağın takım-talaş arayüzüne daha iyi penetre olmasını sağlamış ve artan tribolojik kabiliyete bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri minimum seviyede elde edilmiştir. Artan penetrasyon kabiliyeti kesme ara yüzeyinde hem sıcaklığın azalmasını sağlamış hem de daha fazla alanda yağlama etkisi oluşturmuştur [20][44] [45].

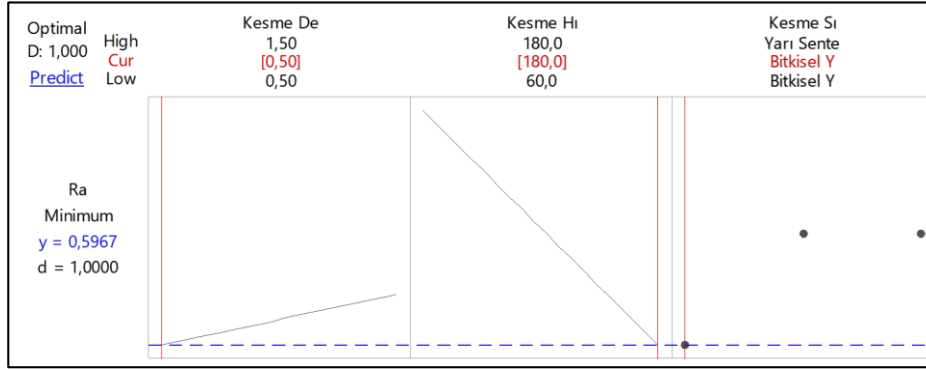


Şekil 10. Amaç fonksiyonunun Arı Algoritması optimizasyonunda yakınsama grafiği (Convergence graph in optimization of objective function with Bees Algorithm)

Elde edilen ortalama pürüzlülük değerinin 0,90 μm değerinde elde edilmesi MMY'nin kullanılabilirliği açısından önem taşımaktadır. 0,90 μm değeri, genel makine imalatında yüksek yüzey kalitesi standartlarını ifade etmektedir. MMY kullanımı ile elde edilen bu değer, MMY'nin frezeleme işlemlerinde kullanım açısından teknik yeterlilik seviyesinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca kullanılan soğutma-yaglama sıvısı miktarının minimize edilmesi çevresel sürdürülebilirlik ve karbon ayak izinin minimizasyonu açısından büyük önem taşımaktadır.

Talaşlı imalat prosesinde sezgisel optimizasyon metotların kullanılması, çevre ve sağlık açısından bitkisel yağın kullanılabilirliğinin araştırılması ve minimum miktarda yağlayıcı ile prosesin gerçekleştirilmesi ürün ve proses kalitesi açısından kazanımdır. Çalışma kapsamında kullanılan Arı Algoritmasının güvenilirliğinin araştırılması için Minitab programından elde edilen ve regresyon denkleminin bağlı çalışan optimizasyon modülü ile de en uygun Ra değeri ve parametreler araştırılmıştır. Şekil 11'de verilen optimizasyon grafiğine göre optimum parametrelerin kesme sıvısı için bitkisel yağ, kesme hızı için 180 mm/dk. ve talaş derinliği için 0,5 mm olduğu görülmektedir. Belirlenen optimum parametrelerde beklenen Ra değeri 0,59 μm 'dir. Regresyon denkleminin bağlı optimizasyon modülü kullanılarak Minitab'dan elde edilen sonuçlar ile Arı Algoritmasının çalıştırıldığı Matlab programından elde edilen sonuçlar aynıdır. Bu duruma bağlı olarak Arı Algoritmasının talaşlı imalat işlemlerinde yüksek güvenilirlikte kullanılabileceği söylenebilir. Optimum parametreler dikkate alınarak laboratuvar ortamında yapılan doğrulama deneylerinde de ~%4'lük (ortalama 0,62 μm) kabul edilebilir bir sapma değeri ile optimum sonuca yaklaşılmıştır. Diğer yandan, Şekil 11'e göre kesme hızı arttıkça Ra değeri azalmış, talaş derinliği arttıkça da Ra değeri artmıştır. Elde edilen bu sonuç literatürle

uyumludur [46][47]. Ayrıca, bitkisel yağ minimum Ra değerini verirken, yarı sentetik ve bor yağı bitkisel yağla kıyasla daha yüksek fakat yakın değerlerde Ra değeri vermiştir. Bu durum viskoziteye bağlı olarak açıklanabilir. Tablo 2’de, laboratuvar ortamında elde edilen bor ve yarı sentetik yağın viskozite değerlerinin yakın seviyede olduğu, bitkisel yağın ise ~%8 daha düşük seviyede olduğu görülmektedir. Viskozite değeri düştükçe tribolojik performans artmıştır. Fakat bu aşamada bitkisel yağın yüksek oksitlenme eğilimi nedeniyle diğer iki yağla kıyasla daha kısa ömürlü kullanım sağlayacağı söylenebilir. Bu aşamada çevresel faktörler ve fayda-maliyet unsurları dikkate alınarak yağlayıcı seçimi yapılması gerekmektedir.



Şekil 11. Regresyon tabanlı optimizasyon grafikleri (Regression based optimization graphs)

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada östemperlenmiş küresel sfero dökme demir (GGG70) malzemenin frezelenmesinde minimum yüzey pürüzlülüğünü sağlayan optimum kesme parametreleri Arı Algoritması ile araştırılmıştır. GGG70 malzemelerin yüksek mekanik özellikleri endüstriyel kullanım açısından bir avantaj oluşturmalarına rağmen işlenebilirlikleri zayıftır. Bu sebeple çalışma kapsamında temel işleme parametrelerinin yanında kesme sıvılarının ve MMY kullanımının da etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Talaşlı imalat prosesinden sonra yüzey tribolojik özelliklerinden olan yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Farklı kesme parametreleri ile yapılan deneyler sonunca yüzey pürüzlülüğü en fazla 1,51 μm iken en düşük 0,63 μm değerinde elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama 0,90 μm değeri elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda minimum yüzey pürüzlülük değeri, maksimum yüzey pürüzlülük değerine kıyasla %58,27 iyileşme, ortalama yüzey pürüzlülük değerine kıyasla % 30 iyileşme ile elde edilmiştir.
- Frezeleme işleminde farklı kesme parametrelerinin yüzeydeki sertlik değişimine etkisinin anlamsız olduğu varyans analizi ile belirlenmiştir.
- Arı Algoritması optimizasyonuna göre ideal proses parametreleri; kesme sıvısı olarak bitkisel yağ, kesme hızı için 180 mm/dk ve talaş derinliği için 0,5 mm'dir. Frezeleme deneylerinde ilerleme hızı (0,05 mm/diş) sabit tutulmuştur. Optimizasyon sonucunda elde edilen yakınsama grafiğine göre Ra değeri 0,59 μm 'dir.
- Minitab programında regresyon denkleminin optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçlar ile Matlab programında Arı Algoritması ile yapılan optimizasyondan elde edilen sonuçlar aynıdır. Netice olarak frezeleme işleminde proses parametrelerinin optimizasyonunda AA metodun kullanılabileceği belirlenmiştir.
- Optimizasyon sonucu elde edilen optimum kesme parametrelerini doğrulamak için yapılan frezeleme deneyleri neticesinde ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 0,62 μm (~%4'lik sapma) bulunmuştur ve optimum sonuca yaklaşılmıştır.
- GGG-70 malzemenin frezeleme prosesinde minimum Ra değerini veren kesme sıvısı bitkisel yağdır. Bu durum viskoziteye bağlı olarak açıklanabilir. Bitkisel yağ deneylerde kullanılan diğer yağlara (bor yağı, yarı sentetik yağ) kıyasla daha düşük viskoziteye sahiptir. Takım ve talaş arasında daha iyi pülverize olmuştur. Kesme sıvıları minimum miktarda yağlayıcı (MMY) ile talaşlı imalatta kullanılmıştır.
- GGG-70 malzemesinin frezelenmesi işleminde kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu bir etkisi vardır, kesme hızı arttıkça Ra değeri azalmıştır. Talaş derinliğinin artması

yüzey kalitesini düşürmüş yani yüzey pürüzlülük değeri artmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı (Conflict of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] D. Handayani, "The machinability of austempered ductile irons (ADI), " Ph.D. dissertation, The Pennsylvania State Univ., Pennsylvania, America, 2017.
- [2] G. Gider, "Farklı oranlarda silisyum içeren küresel grafitli dökme demirlerin mikro yapılarına çift kademeli östemperlemenin etkisi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [3] A. Sinlah, D. Handayani, R. C. Voigt, K. Hayrynen, R. M. Saoubi and C. Saldana, "Effects of microstructure and strength on wear performance in rough milling of austempered ductile iron", *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 29, pp. 62-67, August 2015. doi:10.1179/1743133615Y.0000000026
- [4] D. Eraslan, A. Balci, B. Çetin, N. Uçak, A. Çiçek, O.D. Yılmaz, K. Davut, "Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions" *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 11, pp. 1443-1456, January 2021. doi:10.1016/j.jmrt.2021.01.123
- [5] A. Pınarbaşı, M. K. Külekçi, C. Boğa, U. Eşme, "Optimization of the Effect of Processing Parameters on Surface Roughness and Cutting Energy in CNC Milling of Al-7075 Material", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol 35 (2), pp. 345-355, Haziran 2020. doi:10.21605/cukurovaummfd.792420
- [6] P. Parhad, V. Dakre, A. Likhite and J. Bhatt, "The impact of cutting speed and depth of cut on cutting force during turning of austempered ductile iron" *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 663-669, July 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.750
- [7] J. Datt, U. Batra, "Influence of Composition and Austempering Temperature on Machinability of Austempered Ductile Iron", *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering*, vol.7 No:2, January 2013. waset.org/Publication/9996961
- [8] A. Eltaggaz, P. Zawada, H. A. Hegab, I. Deiab, H. A. Kishawy, "Coolant strategy influence on tool life and surface roughness when machining ADI", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, pp. 3875-3887, February 2018. doi:10.1007/s00170-017-1088-1
- [9] M. Arft, F. Klocke and D. Lung, "Evaluation of the machining aspects of Austempered Ductile Iron" *Int. J. Met. Cast.*, vol.1A, pp. 36-42, 2012. doi:10.1007/BF03355537
- [10] M. T. Adır, "Isıl işlem yardımıyla mekanik özellikleri iyileştirilmiş GGG70 dökme demirin işlenebilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2021.
- [11] P. Sahoo, "Fractal characterization and optimization of electroless Ni-P coatings", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, pp.9, January 2008, doi:10.1088/0022-3727/41/2/025310
- [12] A. Rodriguez, L. N. López de Lacalle, O. Pereira, A. Fernandez and I. Ayesta, "Isotropic finishing of austempered iron casting cylindrical parts by roller burnishing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 110, pp. 753-761, August 2020. doi:10.1007/s00170-020-05894-7
- [13] D. Manivel, R. Gandhinathan, "Optimization of surface roughness and tool wear in hard turning of austempered ductile iron (grade3) using Taguchi method", *Measurement*, vol. 93, pp. 108-116, June 2016. doi: 10.1016/j.measurement.2016.06.055
- [14] G. Uzun, "Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons", *Measurement*, vol. 142, pp. 122-130, April 2019, doi:10.1016/j.measurement.2019.04.059
- [15] P. Yan, Y. Rong and Gang Wang, "The effect of cutting fluids applied in metal cutting process", *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*, vol.230, pp.19-37, May 2015. doi:10.1177/0954405415590993
- [16] O. Aydoğan, "Takım Malzemelerinde Aşınma Hasarlarını Önleyecek İşlemler ve Yağlayıcıların Belirlenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [17] T. Prakash, A. Arun, A. Sachin, "Investigation of non-edible vegetable oil as cutting fluid in boring operation using MQL technique for CEW-1 steel", *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, pp. 1462-1466, September 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.09.346
- [18] E. A. Rahim, M. R. Ibrahim, A. A. Rahim, S. Aziz, Z. Mohid, "Experimental investigation of minimum quantity lubrication (MQL) as a sustainable cooling technique", *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Germany, 2015, pp. 351-354. <https://gcsu.edu/Malaysia/>
- [19] A. Sharma and R. Kumar, "Potential use of minimum quantity lubrication (MQL) in machining of biocompatible materials using environment friendly cutting fluids: An overview", *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 5315-5319, 2021, doi:10.1016/j.matpr.2021.01.904

- [20] I. S. Afonso, J. Pereira, A.E. Ribeiro, J.S. Amaral, N. Rodrigues, J. R. Gomes, R.Lima, J. Ribeiro, "Analysis of a Vegetable Oil Performance in a Milling Process by MQL Lubrication", *Micromachines (Basel)*, vol.13(8), pp. 1254, August 2022. doi:10.3390/mi13081254
- [21] A. Alshibi, A. Nasreldin, S. Pervaiz, "Sustainable Vegetable Oil-Based Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining of AZ91 Magnesium Alloy: A Grey Relational Analysis-Based Study", *Lubricants*, vol 11(2), pp 79, February 2023. doi:10.3390/lubricants11020079
- [22] D. B. Cönger, "Nano molibden disülfid katkılı bitkisel esasl kesme sıvısı kullanarak minimum miktarda yağlama ile alüminyumun frezelenmesinde işlem parametrelerinin talaş kaldırma performansına etkilerinin incelenmesi ", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2019.
- [23] K. M. Li, S.Y. Chou, " Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, No. 15, pp.2163–2170, July 2010. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.07.031
- [24] A. Uysal, F. Demirena, E. Altana, "Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano MoS₂ Reinforced Vegetable Cutting Fluid", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol.195, pp. 2742 – 2747, 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.06.384
- [25] E. Kuram, B. T.Simsek, B.Ozcelik, E.Demirbas, S. Askin, "Optimization of the cutting fluids and parameters using Taguchi and ANOVA in milling", In Proceedings of the world congress on engineering, London, U.K (Online) , vol. II, pp. 1-5, WCE 2010. <https://www.iaeng.org/publication/WCE2010/>
- [26] B. Çelik, "Küresel grafitli ggg-70 dökme demirin minimum miktarda yağlama tekniği kullanılarak frezelenmesinde işlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi ", Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2018.
- [27] M. H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram, E. Demirbas, "Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method", *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 2049-2056, July 2011. doi:10.1016/j.jclepro.2011.07.013
- [28] M. A. Makhesana, J. A. Baravaliya, R. J. Parmar, B. K. Mawandiya, K. M. Patel, "Machinability improvement and sustainability assessment during machining of AISI 4140 using vegetable oil-based MQL", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 43, pp. 1-14, July 2021. doi:10.1007/s40430-021-03256-2
- [29] J. Lu, Z. Zhang, X. Yuan, J. Ma, S. Hu, B. Xue, X. Liao, "Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression", *Measurement*, 157: 1-11, February 2020. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107578
- [30] Y.Fedai, A. Ünüvar, "Frezelemede optimum kesme parametrelerini belirlemek için yapay zeka sistemlerinden oluşan adaptif bir sanal operatörün geliştirilmesi", *5.Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ekim 2014, pp. 129, Bursa, Türkiye.
- [31] D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, "The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems ", *Intelligent Production Machines and Systems*, pp. 454-459. December 2006, doi:10.1016/B978-008045157-2/50081x
- [32] H. Kedia, A. Pandey, A. Kumar, A. Majumdar, J. De, N. Ghosh, "Optimization of process parameters in machining of Inconel 718 super alloy on HMT (NH22) capstan lathe using genetic algorithm subject to minimization of surface roughness", *Materials Today: Proceedings*, vol. 66, pp. 3910-3915, July 2022, doi:10.1016/j.matpr.2022.06.390
- [33] B. Choudhuri, R. Sen, "Optimization of WEDM parameters for machining inconel 800 by ann based bayesian hybrid algorithm", *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp.1098-1101, May 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.04.318
- [34] B. Wang, M. He, G. C. Barber, J. D. Schall, C. Tao, X. Sun, "Rolling contact fatigue resistance of austempered ductile iron processed at various austempering holding times", *Wear*, vol. 398, pp.41-46, March 2018. doi:10.1016/j.wear.2017.11.022
- [35] Y.A. A. Ahmida, S. Korkmaz, S. K. Kilincarslan, O. C. Sirvan, M H. Cetin, "Investigation of interaction of extreme pressure additive, load and sliding speed parameters with silver nano-particles in wear environment", vol. 4, pp.4., November 2021. doi:10.1088/2051-672X/ac311f
- [36] R.Düzce , G. Samtaş, "GG25 dökme demirin frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkisi ve optimizasyonu", *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, vol. 2, pp. 20-33, November 2021, doi:10.52795/mateca.1019186
- [37] M. A. Şen, M. Kalyoncu, " Optimisation of a PID controller for an inverted pendulum using the Bees Algorithm", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 789-790, pp 1039-1044, May 2015, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.1039
- [38] D. T. Pham, E. Koç, M. Kalyoncu, M. Tınkır, "Hierarchical PID controller design for a flexible link Robot manipulator using the Bees Algorithm", *Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, , pp. 757-765, October 2008, Sakarya, Turkey. www.imss.sakarya.edu.tr
- [39] E. Nas, H. Gökkaya, "Experimental and Statistical Study on Machinability of the Composite Materials with Metal Matrix Al/B4C/ Graphite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 48, pp. 5059–5067, 2017. doi:10.1007/s11661-017-4237-0

- [40] S. Pang, W. Zhao, T. Qiu, W. Liu, P. Yan, L. Jiao, X. Wang, "Effect of cutting fluid on milled Surface quality and tool life of aluminum alloy", *Materials*, vol 16(6), pp.2198, March 2023, . doi:10.3390/ma16062198
- [41] N.R. Dhar, M.W. Islama, S. Islama, M.A.H. Mithu, "The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171 pp.93-99, June 2005, doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.06.047
- [42] A. H. El-Sinawi, K. Reza, "Improving surface roughness in turning using optimal control of tool's radial position", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.167(1), pp. 54-61, August 2005, doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.09.079
- [43] M. Hüseyinoğlu, " 7075 alüminyum alaşımının freze ile işlenmesinde minimum soğutma sıvısı kullanmanın performans karakteristiklerine etkisi, " Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2008.
- [44] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, and M. Yang, "Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of hightemperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil," *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 29, no. 4, pp. 1084-1095, 2016. doi:10.1016/j.cja.2015.10.012
- [45] S. A. Lawal., I. A. Choudhury., Y. Nukman., Application of Vegetable Oil-Based Metalworking Fluids in Machining Ferrous Metals - A Review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 52, No. 1, pp. 1-12, 2012. doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003
- [46] M. Hamamcı, E. S. Topal, " Yüksek hızlı talaşlı işlemede yüzey kalitesinin iyileştirilmesi", *1st international symposium on innovative technologies in engineering and science ISITES'2013* ,Sakarya, Turkey. Haziran 2013, pp. 528-537. <https://isites.info/PastConferences/ISITES2013/>
- [47] V. Yılmaz, " Frezeleme uygulamalarında işleme parametrelerinin sebep olduğu titreşimlerin incelenmesi " Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.

This is an open access article under the CC-BY license

