Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1823859
CITE: Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering 26(3) (2026) 777-789

Kompakt Grafitli Dökme Demirin Sürdürülebilir Alın Frezelenmesinde Simüle Tavlama Tabanlı Çok Amaçlı Optimizasyonu

*Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 14.11.2025
Kabul/Accepted: 04.04.2026
Yayımlandı/Published: 03.06.2026

Simulated Annealing Based Multi-Objective Optimization For Sustainable Face Milling Of Compacted Graphite Cast Iron

Ali Taner Kuzu*

Işık Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

© 2026 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada kompakt grafitli dökme demir GJV-400'ün alın frezeleme işleminde kesme işlemi kaynaklı enerji tüketimi, karbon ayak izi, yüzey kalitesi ve üretkenlik arasındaki ilişki nicel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü verileri kullanılarak mekanistik freze modeli, genişletilmiş Taylor takım ömrü modeli ve ampirik Ra modeli kalibre edilmiştir. Doğrulanmış mekanistik model üzerinden 100 - 300 m/dak kesme hızı ve 0,10 - 0,30 mm/dev ilerleme aralığında kuvvet, güç, enerji tüketimi ve parça başına 100 000 mm³ kaldırılan hacim için kesme kaynaklı CO_2 emisyonu haritaları elde edilmiştir. Takım gömülü etkisi, WC-Co uçların birim kütle başına gömülü emisyon katsayısı ile takım ömrüne bağlı olarak hesaplanmış ve elektrik kaynaklı emisyonla birleştirilerek toplam karbon ayak izi tanımlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü (min), malzeme kaldırma hızı (max) ve toplam kgCO_2e (min) hedeflerini eşzamanlı iyileştirmek üzere simüle tavlama tabanlı çok amaçlı optimizasyon uygulanmıştır. Dengeli ağırlık seti için elde edilen temsili optimum yaklaşık 300 m/dak kesme hızı ve 0,23 mm/dev ilerlemede 1,03 kg CO_2/parça, 0,47 µm yüzey pürüzlülüğü ve 65.110 mm³/dak düzeyinde MRR sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Karbon ayak izi, alın frezeleme, simüle tavlama optimizasyonu, talaşlı imalat*

Abstract

This study quantitatively investigates the relationship between energy consumption, carbon footprint, surface quality and productivity in face milling of compacted graphite cast iron GJV-400. A mechanistic milling model, an extended Taylor tool life model and an empirical surface roughness model were calibrated using experimentally measured cutting forces, tool wear and Ra data. The validated mechanistic model was then employed to generate maps of cutting force, power, energy consumption and cutting-related CO_2 emissions for a removed volume of 100,000 mm³ over a cutting speed range of 100 - 300 m/min and a feed-per-tooth range of 0.10–0.30 mm/tooth. Tool-embedded emissions were computed from the specific embodied CO_2 of WC-Co inserts and the predicted tool life, and combined with electrical emissions to define the total carbon footprint per part. A simulated-annealing-based multi-objective optimization was carried out to simultaneously minimize surface roughness and total CO_2e and maximize material removal rate. For a balanced weighting set, a representative optimum at about 300 m/min cutting speed and 0.23 mm/tooth feed yields 1.03 kg CO_2 per part, 0.47 µm surface roughness and a material removal rate of approximately 65,110 mm³/min.

Keywords: *Carbon footprint, face milling, Simulated annealing optimization, machining*

1. Giriş

Günümüz imalat sektöründe sürdürülebilirlik; enerji verimliliği, çevresel etki azaltımı ve üretim performansının birlikte ele alınmasını zorunlu hâle getirmiştir. Talaşlı imalatta enerji tüketiminin büyük bölümü kesme işlemi sırasında ortaya çıkmakta olup, bu durum işlem parametrelerinin doğrudan karbon ayak izine yansımasına neden olmaktadır. Son yıllarda, özellikle yüksek enerji maliyetleri ve çevresel regülasyonlar nedeniyle sürdürülebilir işleme yaklaşımlarına yönelik ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bu eğilim, literatürde enerji verimliliği ve sürdürülebilir işleme üzerine yapılan kapsamlı derlemelerde de açıkça görülmektedir (Pawanr ve Gupta 2024, Abdelaoui vd. 2023; Zhou vd. 2016). Özellikle CGI malzemenin işlenebilirliği üzerine Sirtuli vd. (2024) tarafından yapılan güncel derlemede vurgulandığı üzere; bu malzemenin yüksek mukavemeti ve ısıl özellikleri, sürdürülebilir işleme stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Kuru kesme, minimum miktarda yağlama (MQL), hibrit soğutma yöntemleri ve gelişmiş takım malzemeleri gibi yöntemler sürdürülebilirliğin artırılması amacıyla araştırılmaktadır (Goindi ve Sarkar 2017, Hegab vd. 2018). Bu çalışmada, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda kuru kesme stratejisi benimsenmiştir. Literatürde Goindi ve Sarkar

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ali Taner Kuzu e-posta/e-mail: alitaner.kuzu@isikun.edu.tr

(2017) tarafından rapor edildiği üzere, kesme sıvıları ve bunların yönetim sistemleri, işlenen bir parçanın toplam maliyetinin %17'sine kadar ulaşabilmektedir. Ekonomik yükün yanı sıra, Sirtuli vd. (2024) kesme sıvılarının hem çevre hem de insan sağlığı üzerindeki zararlı etkilerine dikkat çekmiş; imalat sektörünün odağının, yağlayıcı kullanımını iyileştirmekten ziyade, çevresel kaygıları ortadan kaldıran kuru işleme yöntemlerini geliştirmeye kayması gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, CGI malzemesinin yapısındaki grafitin sağladığı kısmi katı yağlayıcı etkisi de kuru işlemeyi uygulanabilir kılan bir diğer faktördür. Bu bağlamda, çalışma, imalat süreçlerini yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda ekolojik açıdan bilinçli bir şekilde ilerletme sorumluluğuyla kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Bunun yanı sıra, enerji ve çevresel etkinin modellenmesi de sürdürülebilir işleme çalışmalarının temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir. CNC tezgâhlarının enerji tüketimi, özellikle kesme gücü ile yardımcı sistem yüklerinin birleşik etkisine bağlı olduğundan, enerji modellerinin doğruluğu toplam çevresel değerlendirmeyi doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda Li vd. (2015), CNC tezgâhlarında karbon salınımının nicel olarak modellenebilmesi için elektrik tüketimi ve tezgâh davranışını bir araya getiren bir yaklaşım önermiştir.

Enerji, yüzey kalitesi ve üretkenliğin aynı anda değerlendirilmesi gerektiğinde, optimizasyon yöntemleri sürdürülebilir imalat için kritik bir araç hâline gelmektedir. Çok amaçlı optimizasyon üzerine yapılan güncel derlemeler, gelişmiş yöntemlerin (genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, simüle tavlama vb.) talaşlı imalat parametre optimizasyonunda yaygınlaşmakta olduğunu göstermektedir (Sureban vd. 2019, Soori ve Asmael 2022). Mikro işleme, EDM ve sert tornalama gibi farklı süreçlerde simüle tavlama yönteminin başarılı sonuçlar verdiği rapor edilmiştir (Somashekhar vd. 2012, Chen vd. 2010, Khanghah vd. 2015). Bununla birlikte, bu çalışmaların önemli bir bölümü enerji tüketimini yalnızca tezgâh seviyesinde ele almakta; takım gömülü emisyonu, kesme mekaniği temelli güç modeli ve yüzey pürüzlülüğü gibi çoklu çıktıları bütünleşik bir çerçevede değerlendirmemektedir.

Mevcut literatürde sürdürülebilir işleme üzerine çok sayıda deneysel optimizasyon çalışması bulunmasına rağmen, enerji tüketimi, takım gömülü CO_2 etkisi ve yüzey kalitesinin mekanistik model doğrulaması ile birlikte ele alındığı kapsamlı çalışmalar sınırlıdır. Varghese vd. (2018) ve Manav ve Chinchanikar (2018), çok amaçlı optimizasyonu deneysel verilere dayalı yanıt yüzeyi yöntemleri ile gerçekleştirmiş; ancak kesme kuvveti ve güç kullanımı doğrudan mekanistik modellerle ilişkilendirilmemiştir. Benzer şekilde, Shokrani vd. (2024) ve Jeulin vd. (2024) sürdürülebilir imalat uygulamalarını geniş bir çerçevede incelemiş olsa da, malzeme özelinde detaylı mekanistik enerji modelleri ve takım gömülü etkilerinin entegrasyonu sınırlı kalmıştır. Duan vd. (2024), CGI frezelemede sürdürülebilirlik değerlendirmesi ve optimizasyonun önemine dikkat çekmiştir. Bununla birlikte Zhang vd. (2025), CGI frezelemesinde mikro dokulu takımların etkisini 3D-FEM destekli olarak incelemiş ve optimize edilmiş yüzey dokularının, temel aşınma mekanizmasını değiştirmeden takım ömrünü uzattığını ortaya koymuştur. Ancak mekanistik kuvvet modelleri ile takım gömülü karbon ayak izinin bütünleşik entegrasyonu konusundaki boşluk devam etmiştir.

Bu çalışma, mevcut sürdürülebilir işleme çalışmalarından farklı olarak GJV-400 alın frezelemesi için enerji, kalite ve üretkenliği tek bir çerçevede birleştirmektedir. Literatürde çoğu çalışma makine düzeyinde güç ölçümleri ve istatistiksel yanıt modelleri ile sınırlıyken, burada mekanistik kuvvet modeline dayalı elektrik kaynaklı CO_2 ve takım gömülü etkisi, deneysel takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü modelleriyle entegre edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, MRR ve parça başına toplam CO_2, kesme kuvveti ve güç kısıtları altında simüle tavlama tabanlı çok amaçlı optimizasyon ile eşzamanlı olarak iyileştirilerek GJV-400 için sayısal bir sürdürülebilir çalışma penceresi ortaya konmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada iş parçası malzemesi olarak EN 16079 standardına uygun GJV-400 (kompakt grafitli dökme demir) kullanılmıştır. Malzemenin fiziksel/mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1'de özetlenmiştir. Deneylerde kullanılmak üzere, döküm bloklardan alınan numuneler frezeleme öncesinde yüzey taşlama ile düzleştirilmiş, talaş kaldırma esnasında tezgâh tablasına sabitlenmiştir.

Çizelge 1. GJV-400 malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Çekme dayanımı	MPa	400
Yüzde uzama	%	2
Elastiklik modulü	GPa	140
Sertlik	HB	210
Termal iletkenlik katsayısı	W/m·K	39
Termal genleşme katsayısı	µm/(m·K)	11
Özgül ısı	J/kg·K	475

Frezeleme deneyleri, Spinner VC-650 düşey CNC işleme merkezinde kuru kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kesici takım olarak, 50 mm çapında, çok uçlu bir yüzey freze gövdesi kullanılmış ve her gövdeye K20D kalitesinde, TiCN+Al_2O_3 CVD kaplı karbür uçlar takılmıştır.

Kesme parametrelerinin etkilerini incelemek üzere, kesme hızı Vve diş başına ilerleme $f_t$için üçer seviye seçilerek 3×3 tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmıştır (Çizelge 2). Eksenel talaş derinliği, 1 mm'de sabit tutulmuş, iş parçası genişliği 29 mm olarak seçilmiş ve freze çapı 50 mm ile kısmi radyal katılım koşulunda yüzey frezeleme yapılmıştır. Bu geometri için takım–iş parçası etkileşim bölgesi dikkate alınarak, klasik yüzey frezeleme kinematiği kullanılarak (Altıntaş 2012) giriş ve çıkış kesme açıları hesaplanmış ve bu çalışmada sırasıyla $\varphi_{\text{giriş}} = 54°$ve $\varphi_{\text{çıkış}} = 126°$değerleri esas alınmıştır.

Çizelge 2. CGI deneyleri için frezeleme parametre matrisi

Kesme hızı V (m/dak)	100, 200, 300
Diş başına ilerleme f_t (mm/dev)	0,1, 0,2, 0,3

Frezeleme deneyleri sonrasında, işlenmiş GJV-400 yüzeylerinin kalitesi aritmetik ortalama pürüzlülük (Ra) parametresi ile karakterize edilmiştir. Ölçümler, temaslı bir profilometre kullanılarak, ISO 4287 standardına uygun kesme ve değerlendirme uzunluklarıyla gerçekleştirilmiştir. Her bir deney koşulu için iş parçası üzerinde farklı konumlarda en az üç tekrar ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması parça başına temsilî Ra olarak raporlanmıştır.

Takım ömrü, literatürde yaygın olarak kabul edilen sınır değere uygun biçimde VB = 0,30 mm eşiğine ulaşıncaya kadar geçen süre veya talaş kaldırma miktarı olarak tanımlanmıştır. Elde edilen takım ömrü verileri, kesme hızı ve diş başına ilerlemeye bağlı genişletilmiş Taylor takım ömrü bağıntısı ile modellenmiştir:

$$T = \frac{C}{V^p f_t^q} \tag{1}$$

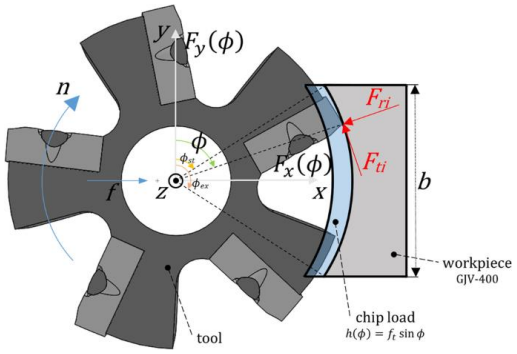
Burada T takım ömrünü (dakika), Cdeneysel sabiti, $p$ve $q$ise sırasıyla kesme hızı ve ilerleme üstel katsayılarını ifade etmektedir. Deneysel olarak ölçülen $T(V, f_t)$verileri, en küçük kareler yöntemi ile bu bağıntıya uydurularak C, $p$ve $q$katsayıları tahmin edilmiştir. Bu model, ilerleyen bölümlerde takım gömülü emisyonunun parça başına dağıtılmasında kullanılmıştır.

Frezeleme esnasında oluşan kesme kuvvetleri, Şekil 1'de şematik olarak gösterilen takım–iş parçası etkileşim geometrisi temel alınarak, literatürde yaygın biçimde kullanılan mekanistik frezeleme modeli ile hesaplanmıştır (Kara vd. 2023).

Modelde, her bir diş için anlık talaş kalınlığı $h(\varphi)$, diş başına ilerleme f_t, takımın dalma açısı ve radyal katılım dikkate alınarak dalma açısının (φ) fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış açıları $\varphi_{\text{giriş}}$–$\varphi_{\text{çıkış}}$ aralığında, teğetsel, radyal ve eksenel kuvvet bileşenleri sırasıyla F_t, $F_r$ve $F_a$ile gösterilmiş ve dönel koordinat sisteminde tanımlanmıştır.

Anlık talaş kalınlığı $h(\varphi)$, takımın dalma açısı φile periyodik olarak değişir ve Eşitlik 2'deki gibi tanımlanır.

$$h(\varphi) = f_t \sin\varphi \tag{2}$$



Şekil 1. Frezeleme kuvvet bileşenlerinin şematik gösterimi (Kara vd. 2023)

Bu iş parçası genişliği ise b = 29 mm olarak alınmıştır. Her yöndeki kesme kuvvetleri, kenar temas boyu a ve kesilmemiş talaş alanı esas alınarak aşağıdaki mekanistik denklemlerle ifade edilir:

$$F_t(\varphi) = K_{tc}\, a\, h(\varphi) + K_{te}\, a \tag{3}$$

$$F_r(\varphi) = K_{rc}\, a\, h(\varphi) + K_{re}\, a \tag{4}$$

$$F_a(\varphi) = K_{ac}\, a\, h(\varphi) + K_{ae}\, a \tag{5}$$

Burada K_{tc}, K_{rc}, K_{ac}sırasıyla teğetsel, radyal ve eksenel yönlerde kayma kaynaklı kesme katsayıları; K_{te}, K_{re}, K_{ae}ise kenar katsayılarıdır.K_{tc}, K_{rc}, K_{ac} aşağıdaki gibi hesaplanır(Altıntaş 2012):

$$K_{tc} = \frac{\tau_s}{\sin\phi}\ \frac{(\cos(\beta-\alpha)+\tan i\ \tan\eta\ \sin\beta)}{\sqrt{cos^2(\phi+\beta-\alpha)+\tan^2\eta\ \sin^2\beta}} \tag{6}$$

$$\mathrm{K_{rc}} = \frac{\tau_s}{\sin\phi\ \cos i}\ \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sqrt{\cos^2(\phi+\beta-\alpha)+\tan^2\eta\ \sin^2\beta}} \tag{7}$$

$$\mathrm{K_{ac}} = \frac{\tau_s}{\sin\phi}\ \frac{(\cos(\beta-\alpha)\tan i-\tan\eta\ \sin\beta)}{\sqrt{\cos^2(\phi+\beta-\alpha)+\tan^2\eta\ \sin^2\beta}} \tag{8}$$

Bu çalışmada mekanistik freze modelinde kullanılan kesme katsayıları, kompakt grafitli dökme demirin delinmesi için geliştirilen termal ve kuvvet modeline dayanan literatür verilerinden alınmıştır. Özellikle, teğetsel, radyal ve eksenel kesme bileşenleri için kayma ve kenar kesme katsayıları, Kuzu ve ark.'nın kompakt grafitli dökme demirde delme işlemi için raporladığı dik kesme sonuçları temel alınarak kullanılmıştır (Kuzu et al., 2016). Söz konusu çalışmada, CGI sınıfı malzeme için deneysel olarak kalibre edilen bu katsayılar, malzeme–takım etkileşimini temsil eden büyüklükler olduğundan,

bu çalışmada GJV-400 yüzey frezeleme kuvvetlerinin hesaplanmasında doğrudan benimsenmiş; frezeleme geometrisine özgü dalma açıları, talaş kalınlığı ve kuvvet bileşenlerinin projeksiyonları ise bu çalışmada yeniden tanımlanmıştır. Ayrıca mekanistik kuvvet modeli, işleme parametrelerinin makinenin güç sınırları içinde kalmasını sağlamak açısından kritik olan milli güç tüketimini kestirmeyi mümkün kılar. Dalma açısı aralığı ve diş sayısı üzerinden nümerik integrasyon yapılarak ortalama kuvvet bileşenleri elde edilmiştir. Teğetsel kuvvetin bileşeni kullanılarak anlık kesme gücü,

$$P(\varphi) = F_t(\varphi)\, V \tag{9}$$

şeklinde hesaplanmış; burada V_c kesme hızıdır. Dalma açısı boyunca ortalama alınarak ortalama kesme gücü P_{ort} elde edilmiş ve bu değer enerji ve karbon ayak izi hesaplarının temel girdisi olarak kullanılmıştır.

Kesme gücünün elde edilmesi. Mekanistik modelden açısal katılım boyunca hesaplanan anlık teğetsel kuvvet $F_t(\varphi)$ ile kesme hızı V kullanılarak anlık güç

$$P_t(\varphi) = \frac{F_t(\varphi)\, V}{60}\,[\text{W}] \tag{10}$$

olarak hesaplanır. Buradaki 60, V'nin m/dak biriminden m/s'ye dönüşümü içindir. Tüm dişler ve katılım aralığı üzerinde ortalama alınarak ortalama kesme için harcanan güc elde edilir:

$$P_{\text{kesme}} = \langle P_t(\varphi) \rangle_{\varphi,\, \text{diş}}\,[\text{W}] \tag{11}$$

Hesaplamalarda, makinenin çalışmaya hazır haldeki ve yardımcı ünitelerinden (hidrolik, soğutma sıvısı pompası, kontrol paneli vb.) kaynaklanan sabit güç tüketimi ihmal edilmiştir. Dolayısıyla sunulan enerji ve emisyon değerleri, yalnızca talaş kaldırma işlemi için harcanan aktif kesme enerjisini temsil etmektedir. Elektrik tüketimine karşılık gelen karbon ayak izi, ülkeye özgü şebeke emisyon faktörü EF_{grid}[kg CO_2e/kWh] kullanılarak

$$\text{CF}_{\text{el}} = \left(\frac{P_{\text{kesme}}}{1000}\right) \cdot \frac{t_m}{60} \cdot EF_{\text{grid}} \tag{12}$$

şeklinde parça başına hesaplanmıştır. Parça başına işlem süresi t_m(dakika), V_{kesme} ile ifade edilen kaldırılacak hacmin talaş kaldırma hızına bölünmesi ile bulunur.

$$t_m = \frac{V_{\text{kesme}}}{\text{MRR}} \tag{13}$$

Bu çalışmada, Türkiye şebekesi için T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayımlanan en güncel veriler esas alınarak, şebeke emisyon faktörü $0{,}442$ kg CO_2e/kWh olarak kullanılmıştır (ETKB, 2024).

Çalışmada takım kaynaklı çevresel etki hesaplanırken, sert metal ucun (insert) üretiminden kaynaklanan toplam gömülü emisyon dikkate alınmıştır. Bir takım değişimi sırasında kullanılan kesici ucun toplam kütlesi ($m_{takım}$) 0,0124 kg olup, uç üzerinde sekiz adet kullanılabilir kesici kenar bulunmaktadır. Birim kütle başına gömülü emisyon katsayısı $EF_{takım}$, Li vd. (2015) çalışmasına dayanarak 29,6 kgCO_2e/kg kabul edilmiştir. Takım gömülü emisyonunun parça başına düşen payı hesaplanırken, ucun tüm ekonomik ömrünün değerlendirilmesi esas alınmıştır. Bu doğrultuda, bir ucun toplam faydalı ömrü (T_{toplam}), Denklem (29) ile hesaplanan tek bir kenarın ömrünün, toplam kenar sayısı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir ($T \times Z_n$). Buna göre, parça başına düşen takım emisyonu ($CF_{takım}$), ucun toplam karbon yükünün, o uçla kullanım ömrü boyunca işlenebilecek toplam parça sayısına oranlanmasıyla şu şekilde hesaplanmıştır:

$$CF_{\text{takım}} = \frac{m_{\text{takım}}\, EF_{\text{takım}}}{\frac{T \times Z_n}{t_m}} \tag{14}$$

Burada t_m, parça başına işlem süresidir. Bu yaklaşım, ucun tüm kenarları körelene kadar kullanıldığı ve toplam kütlenin bu süreçte üretilen tüm parçalara paylaştırıldığı fiziksel gerçeği yansıtmaktadır.

Her bir kesme parametresi kombinasyonu için toplam karbon ayak izi ise, elektrik tüketimi ve takım gömülü emisyonunun toplamı olarak tanımlanmıştır:

$$CF_{\text{toplam}} = CF_{\text{el}} + CF_{\text{tool}} \tag{15}$$

Elde edilen tüm sonuçlar kg CO_2e/parça cinsinden raporlanmıştır.

Kesme kuvveti, güç, enerji tüketimi, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı ve ilerleme ile değişimini sistematik olarak inceleyebilmek için, V ve f_t kesme parametre aralıkları üzerinde yoğun bir ızgara oluşturulmuştur. Bu kapsamda, 100 - 300 m/dak ve 0,1 – 0,3 mm/dev aralıkları, deneysel çalışmayı kapsayacak şekilde uzatılmış; ızgara üzerindeki her nokta için mekanistik kuvvet–güç modeli, enerji ve karbon ayak izi hesapları ile takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü tahminleri kullanılarak performans haritaları elde edilmiştir.

Bu haritalar, ilerleyen bölümde sunulan simüle tavlama (Simulated Annealing) tabanlı çok amaçlı optimizasyon algoritmasının girdisi olarak kullanılmış; böylece V–f_t uzayında, enerji tüketimi ve karbon ayak izi düşük, yüzey pürüzlülüğü kabul edilebilir ve takım ömrü/üretkenlik düzeyi yüksek olan aday kesme parametresi bölgeleri belirlenmiştir.

3. Optimizasyon Yöntemi

Bu çalışmada GJV-400 yüzey frezeleme işlemi için kesme hızı V ve diş başına ilerleme f_t parametrelerinin, yüzey kalitesi, üretkenlik ve toplam karbon ayak izi kriterlerini

birlikte dikkate alacak şekilde ayarlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, çok amaçlı optimizasyon problemi önce matematiksel olarak tanımlanmış, ardından Simüle Tavlama (Simulated Annealing, SA) tabanlı stokastik bir arama algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Optimizasyonun karar değişkenleri kesme hızı ve diş başına ilerleme olarak tanımlanmıştır. Karar değişkenleri aşağıdaki sınırlar içinde seçilmiştir:

$$100 \text{ m/dak} \leq V \leq 300 \text{ m/dak} \quad (16)$$

$$0{,}10 \text{ mm/dev} \leq f_t \leq 0{,}30 \text{ mm/dev} \quad (17)$$

Her bir kesme hızı ve diş başına ilerleme kombinasyonu için, çalışmanın önceki kısmında tanımlanan kesme kuvveti, enerji, karbon ayak izi ve yüzey pürüzlülüğü modelleri kullanılarak ilgili çıktılar hesaplanmıştır. Bu kapsamda, işlenmiş yüzey kalitesini temsil eden yüzey pürüzlülüğü, küçültülmesi hedeflenen bir performans göstergesi olarak ele alınmıştır. Birim zamanda kaldırılan talaş hacmini ifade eden malzeme kaldırma hızı, üretkenliği artırmak amacıyla büyütülmesi istenen bir kriter olarak değerlendirilmiştir. Elektrik enerjisi tüketimi ile takımın gömülü emisyonunun toplamına karşılık gelen toplam karbon ayak izi ise çevresel etkiyi azaltmak için küçültülmesi hedeflenen bir diğer performans büyüklüğü olarak tanımlanmıştır. Böylece, her bir kesme parametresi seti için aynı anda kalite, üretkenlik ve çevresel etkiyi nicel olarak karşılaştırmaya imkân veren çok kriterli bir değerlendirme çerçevesi oluşturulmuştur. Ek olarak, iş parçası–tezgâh sisteminin mekanik ve termal sınırlarını temsil eden aşağıdaki türde kısıtlar tanımlanmıştır:

$$F_{\text{ort}}(\text{x}) \leq F_{\max} \quad (18)$$

$$P_{\text{ort}}(\text{x}) \leq P_{\max} \quad (19)$$

Bu sayede, yalnızca hem performans hem de makine güvenliği açısından uygulanabilir kesme parametreleri arama uzayı içinde tutulmuştur.

Çok amaçlı yapının SA algoritması içinde tek bir maliyet fonksiyonu ile temsil edilebilmesi için tüm amaç fonksiyonları önce boyutsuz hâle getirilmiş ve aynı yönlü olacak şekilde normalize edilmiştir. Minimize edilmek istenen bir büyüklük için normalize edilmiş terim şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\hat{f}_{\text{min}}(\text{x}) = \frac{f(\text{x}) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (20)$$

Burada kullanılan en küçük ve en büyük değerler, ilgili performans büyüklüğünün kesme hızı ve diş başına ilerleme düzlemi üzerindeki minimum ve maksimum değerlerini ifade etmektedir. Maksimize edilmek istenen büyüklük için (örneğin MRR), yüksek değerlerin daha küçük "ceza" ile ifade edilebilmesi amacıyla tersine çevrilmiş boyutsuz bir ölçüt tanımlanmıştır:

$$\widehat{MRR}(\text{x}) = 1 - \frac{MRR(\text{x}) - MRR_{\min}}{MRR_{\max} - MRR_{\min}} \quad (21)$$

Böylece, tüm normalize edilmiş terimler ($\widehat{Ra}$, $\widehat{MRR}$, $\widehat{CF}_{\text{toplam}}$) 0–1 aralığına çekilmiş ve küçük değerler daha iyi performansı temsil eder hâle getirilmiştir. Son aşamada, bu boyutsuz performans büyüklükleri, uygulama önceliklerini gösteren ağırlık katsayıları ile ağırlıklı toplam formunda birleştirilmiştir:

$$F(\text{x}) = w_{Ra}\,\widehat{Ra}(\text{x}) + w_{MRR}\,\widehat{MRR}(\text{x}) + w_{CF}\,\widehat{CF}_{\text{toplam}}(\text{x}) \quad (22)$$

Burada w_{Ra}, w_{MRR}ve w_{CF}sırasıyla yüzey pürüzlülüğü, üretkenlik ve karbon ayak izine verilen göreli önemi ifade etmekte ve

$$w_{Ra} + w_{MRR} + w_{CF} = 1 \quad (23)$$

koşulunu sağlamaktadır. Farklı ağırlık kombinasyonları seçilerek, kalite-üretkenlik-çevresel etki arasında farklı önceliklere sahip çözüm kümeleri elde edilmiştir. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış skaler amaç fonksiyonu $F(\text{x})$, Simüle Tavlama (SA) algoritmasının maliyet fonksiyonu olarak kullanılmıştır. SA, yerel minimumlardan kaçabilen stokastik bir küresel arama yöntemi olduğundan, kesme parametrelerinin süreksiz ve çok tepeli olabilen cevap yüzeylerinde etkin bir tarama yapabilmektedir.

Her bir ağırlık seti $(w_{Ra}, w_{MRR}, w_{CF})$için algoritma aşağıdaki adımlarla yürütülmüştür:

1. Başlangıçta, kesme hızı ve diş başına ilerleme için tanımlanan sınırlar içinde fiziksel olarak anlamlı bir ilk nokta seçilmiş ve buna karşılık gelen başlangıç sıcaklığı belirlenmiştir.
2. Her iterasyonda, mevcut çözüm noktasının yakınında, kesme hızı ve diş başına ilerleme değerlerine küçük rassal değişiklikler uygulanarak yeni bir aday çözüm üretilmiştir. Aday çözüm tanımlanan sınırların dışına çıkarsa, bu değerler yeniden izin verilen aralığa geri getirilmiştir.
3. Bu değerlendirme sonucunda aday çözümün amaç fonksiyonu değeri, mevcut çözüme göre daha düşük ise aday çözüm doğrudan kabul edilerek bir sonraki iterasyonda yeni mevcut çözüm olarak kullanılmıştır."
    - Eğer $F(\text{x}') < F(\text{x})$ise yeni çözüm doğrudan kabul edilmiştir.
    - Aksi durumda, yeni çözüm, klasik Metropolis kriteri ile

$$P_{\text{kabul}} = \exp\left(-\frac{F(\mathrm{x}')-F(\mathrm{x})}{T}\right) \quad (24)$$

olasılığıyla kabul edilmiş; böylece yüksek sıcaklıklarda geniş, düşük sıcaklıklarda ise yerel odaklı bir arama sağlanmıştır.

4. Sıcaklık güncellemesi ve durdurma koşulu olarak her iterasyon sonunda sıcaklık

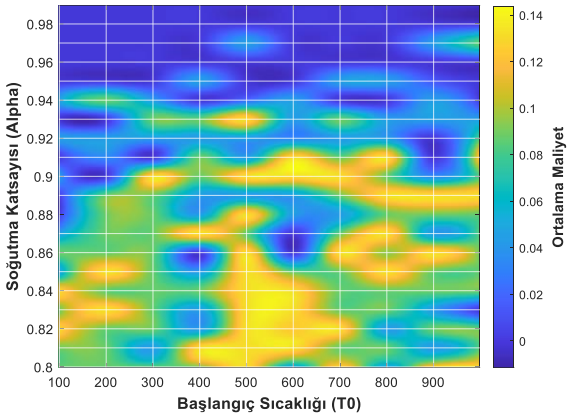
$$T_{\text{yeni}} = \alpha\, T \quad (25)$$

ifadesine sahip geometrik soğutma planı ile güncellenmiştir; burada $\alpha < 1$soğutma katsayısıdır. Sıcaklık önceden tanımlanan minimum sıcaklık $T_{\min}$ değerinin altına düştüğünde veya maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında algoritma sonlandırılmıştır.

Algoritmanın performansını maksimize eden kontrol parametrelerini belirlemek için kapsamlı bir parametre taraması gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de sunulan ısı haritası, başlangıç sıcaklığı ve soğutma katsayısının farklı kombinasyonlarında elde edilen ortalama maliyet değerlerini göstermektedir. Analiz, düşük soğutma katsayılarının $(\alpha < 0{,}9)$ algoritmanın erken yakınsamasına ve yerel minimumlarda (sarı bölgeler) kalmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, başlangıç sıcaklık parametresinin 300-500 aralığında ve α değerinin 0,95'in üzerinde olduğu bölgede, çözümün istikrarlı bir şekilde global minimum havzasına (koyu mavi bölge) yerleştiği görülmektedir. Bu nedenle, çalışmada hesaplama verimliliği ve çözüm kalitesi dengesini sağlayan başlangıç sıcaklığı 400, soğutma oranı 0,99 olarak parametre seti tercih edilmiştir. Algoritmanın durdurma kriteri olarak belirlenen sıcaklık eşiği 104 ve maksimum iterasyon sayısı, yapılan ön yakınsama testlerine dayanmaktadır. Analizler, maliyet fonksiyonunun yaklaşık 10.000 iterasyonda kararlı duruma ulaştığını göstermiştir. Bundan dolayı belirlenen 100.000 iterasyonluk üst sınır global optimumun yakalanması için güvenli bir marj sağlamaktadır. Komşu çözümlerin üretiminde kullanılan pertürbasyon büyüklükleri 1 m/dak, 0,01 mm/dev ise keyfi bir seçimden ziyade, endüstriyel CNC tezgâhlarının kontrollerinin uygunluk ve optimizasyon verimliliği gözetilerek belirlenmiştir. Bu parametre seti, hem çözüm uzayının hassas taranmasına hem de algoritmanın yerel minimumlara takılmadan global optimuma yakınsamasına olanak tanımaktadır.

Farklı ağırlık setleri için elde edilen optimum noktalar, Ra, MRRve CF_{toplam} eksenlerinde birlikte değerlendirilmiştir. Bu sayede:

- Karbon ayak izi düşük, ancak MRR'nin kısmen azaldığı "çevresel açıdan avantajlı ama daha yavaş" kesme koşulları,
- MRR'nin yüksek, fakat Raveya CF_{toplam}değerlerinin artma eğiliminde olduğu "agresif ve üretken" koşullar,
- Hem yüzey kalitesi hem üretkenlik hem de karbon ayak izi arasında dengeli bölgeler ayırt edilmiştir.



Şekil 2. Başlangıç sıcaklığı ve soğutma katsayısının optimizasyon maliyet fonksiyonu üzerindeki etkisini gösteren parametre hassasiyet analizi.

4. Bulgular

Bu çalışmada kesme kuvvetleri, frezeleme işlemleri için yaygın olarak kullanılan standart mekanistik model kullanılarak öngörülmüştür. Modelde ihtiyaç duyulan kesme katsayıları, Kuzu ve arkadaşlarının takım–iş parçası çifti özelinde yürüttüğü ortogonal kesme deneylerinden elde edilen sürtünme açısı, kayma açısı ve kayma gerilmesi parametrelerine dayanarak hesaplanmıştır (Kuzu et al., 2016).

$$\tau_s = 302.4 + 1598\, f_t - 0.001103\, V - 5615\, f_t^2 + 2.224\, f_t V \quad (26)$$

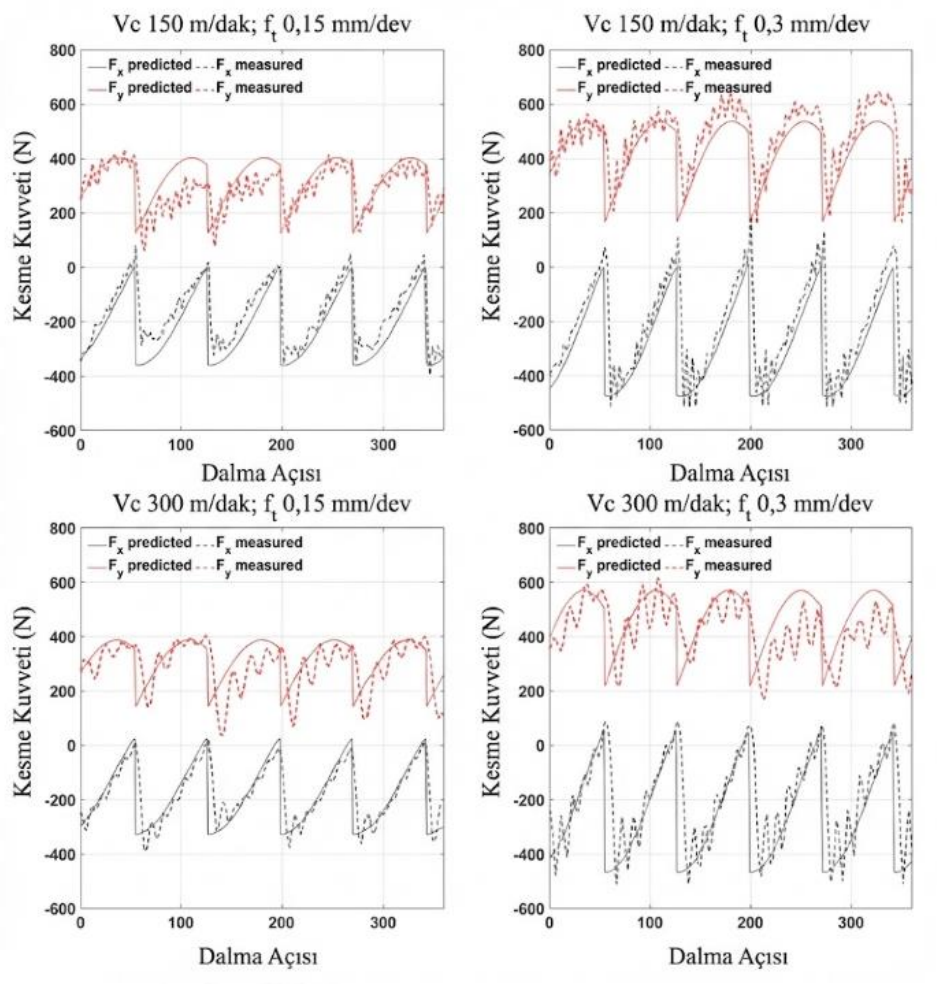
$$\varphi = 13.53 + 0.01109\, V + 33.28\, f_t \quad (27)$$

$$\beta = 23.11 + 12.02\, f_t - 0.04772\, V \quad (28)$$

Burada V kesme hızı, f_t diş başına ilerleme olup denklemlerinden elde edilen τ_s, φve β değerleri kesme katsayılarının hesaplanmasında kullanılmıştır.

Modelin performansı Şekil 3'de sunulan karşılaştırma ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla, hesaplanan ve ölçülen kuvvetler aynı grafik üzerinde verilmiştir: düz siyah eğriler tahmin edilen F_x, kesikli siyah eğriler ölçülen F_x; düz kırmızı eğriler tahmin edilen F_y, kesikli kırmızı eğriler ölçülen F_y bileşenlerini göstermektedir. Grafikler, belirlenen kesme parametreleri aralığında model ve ölçüm arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu mekanistik modelleme yaklaşımının GJV-400 alın frezeleme operasyonundaki başarısı ve doğruluğu, aynı malzeme-takım çiftini kullanıldığı çalışmada da nicel olarak kanıtlanmıştır (Kara vd., 2023). Bu çalışmada, modelin deneysel verilerle karşılaştırılmasında kök ortalama kare hatası (RMSE)

değerlerinin teğetsel ve radyal kuvvet bileşenleri için 8,64 N ile 15,11 N aralığında değiştiği raporlanmıştır (Çizelge 3). Bu hata oranları, ortogonal verilerden türetilen katsayıların, frezeleme sürecinin kesintili doğasına başarıyla doğrulamaktadır.



Şekil 3. Ölçülen ve modellenen kesme kuvvetlerinin dalma açısı ile değişimi (Kara vd., 2023).

Çizelge 3. Mekanistik kuvvet modelinin doğrulanması için hesaplanan Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değerleri (Kara vd., 2023).

Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	RMS Hata (Fx)	RMS Hata (Fy)
150	0,15	8,79 N	6,82 N
150	0,30	14,38 N	10,76 N
300	0,15	8,64 N	7,70 N
300	0,30	15,11 N	13,24 N

Şekil 4'te, üç diş başına ilerleme seviyesinde (a) 0,1 mm/dev, (b) 0,2 mm/dev ve (c) 0,3 mm/dev) takım aşınmasının zamana bağlı ilerleyişi gösterilmektedir. Grafikler, serbest yüzey aşınmasının (VB) hem kesme hızı hem de ilerleme arttıkça hızla yükseldiğini ortaya koymaktadır. Her ilerleme seviyesinde, 300 m/dak kesme hızında çalışan takımlar en agresif aşınma davranışını sergilemiş ve çoğu durumda VB = 300 µm kritik sınırını en kısa sürede aşmıştır. Buna karşılık, 100 m/dak kesme hızında tüm ilerleme koşullarında en düşük aşınma hızları gözlenmiştir. Bulgular, artan kesme hızı ve ilerlemenin kesici uç kenarında ısıl ve mekanik yükleri yükselterek takım bozulmasını hızlandırdığı yönündeki beklenen eğilimi doğrulamaktadır. Bu gözlemler, Taylor tipi takım ömrü modelinin parametrelerinin belirlenmesi ve geçerlenmesi açısından kritiktir.

Deneysel aşınma verilerine doğrusal olmayan regresyon uygulanarak (R^2 %98) takım ömrü, kesme hızı ve diş başına ilerlemeye bağlı bir değiştirilmiş Taylor denklemi ile modellenmiştir. Elde edilen bağıntı Eşitlik 29'da verilmiştir.

$$T = \frac{879.1}{V^{1.22}\, f_t^{1.129}} \quad (R^2\ \%98) \tag{29}$$

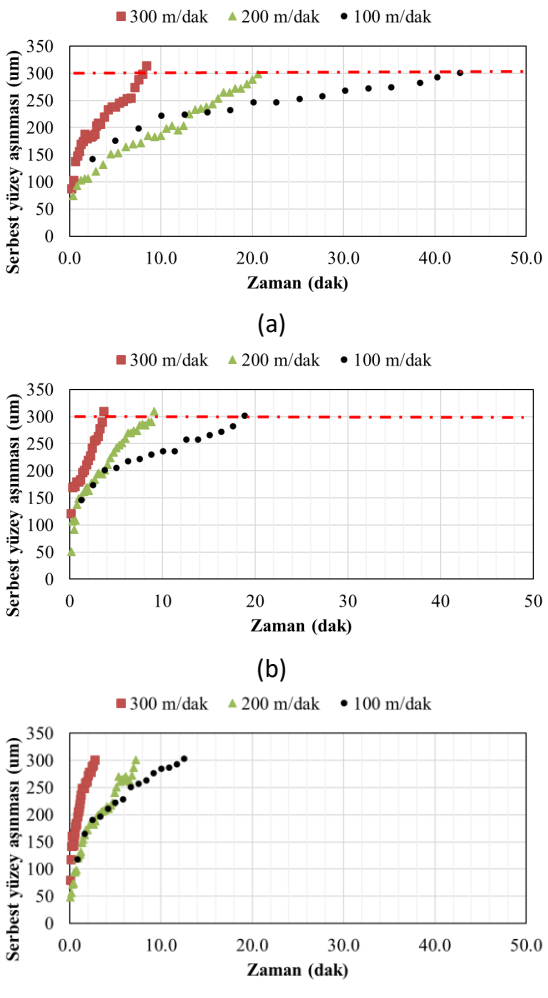
Çizelge 4**,** ilerlemenin artışıyla yüzey pürüzlülüğünün belirgin biçimde yükseldiğini ve kesme hızının artışıyla azaldığını göstermektedir; ayrıca yüksek hızlarda bu azalışın, ilerlemenin olumsuz etkisini kısmen sönümlediği gözlenir. Bu tablodaki sonuçlara dayanarak yapılan en küçük kareler regresyonu, çalışmanın parametre aralığı için aşağıdaki modeli vermektedir:

$$R_a = 1.19 - 0{,}01049\,V + 8{,}061\,f_t + 1{,}974 \times 10^{-5}\,V^2\,0{,}01729\,V f_t \quad (30)$$

Elde edilen modelin istatistiksel güvenilirliğini doğrulamak ve kısıtlı veri setinden kaynaklanabilecek aşırı öğrenme riskini değerlendirmek amacıyla, model başarısı ek hata metrikleri ile analiz edilmiştir. Bu kapsamda, modelin belirleme katsayısı R^2 %95 olarak hesaplanırken; parametre sayısını dikkate alan düzeltilmiş R^2 değeri %79,0 ve kök ortalama kare hatası (RMSE) 0,236 µm olarak elde edilmiştir.

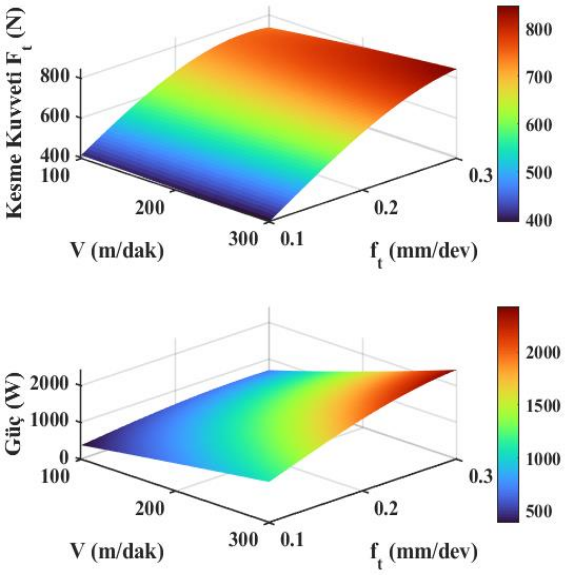
Çizelge 4. Farklı kesme hızı ve ilerleme kombinasyonları için yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.

150 m/dak		300 m/dak	
0,15 mm/dev	0,3 mm/dev	0,15 mm/dev	0,3 mm/dev
0,588	1,668	0,363	0,404
0,909	2,026	0,348	0,485
0,891	1,279	0,379	0,489
0,944	1,668	0,297	0,608
0,812	1,873	0,405	0,459
0,892	2,546	0,409	0,61
0,62	2,144	0,443	0,567
0,786	1,27	0,384	0,65
0,882	1,445	0,45	0,631



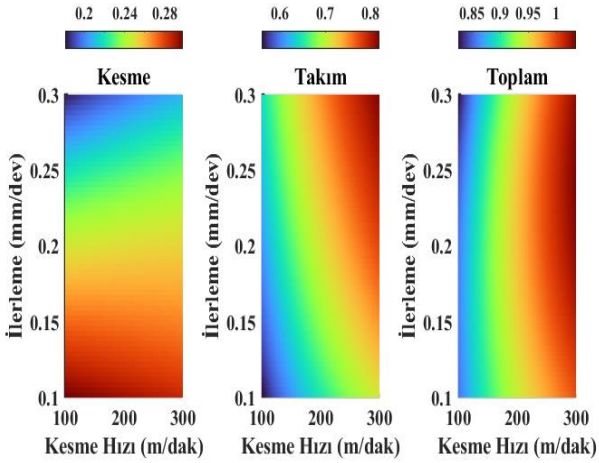
Şekil 4. Farklı kesme koşullarında serbest yüzey aşınması ilerlemesi: (a) $f_t = 0{,}1$mm/dev; (b) $f_t = 0{,}2$mm/dev; (c) $f_t = 0{,}3$mm/dev.

Şekil 5'te, mekanistik modele dayalı olarak elde edilen kesme kuvveti ve kesme gücü haritaları gösterilmektedir. Üstteki harita, 100 - 300 m/dak kesme hızı ve 0,10 - 0,30 mm/dev ilerleme aralığında kesme kuvvetinin yaklaşık 400-800 N arasında değiştiğini ortaya koymaktadır; kuvvet özellikle ilerlemenin artışına duyarlı olup, kesme hızındaki artışın etkisi daha sınırlıdır. Alttaki harita ise aynı parametreler için kesme gücünün yaklaşık 500-2500 W aralığında yükseldiğini ve hem kesme hızı hem de ilerleme tarafından birlikte artırıldığını göstermektedir.



Şekil 5. 100-300 m/dak kesme hızı ve 0,1-0,30 mm/dev ilerleme aralığında mekanistik modelden elde edilen kesme kuvveti (üstte) ve kesme gücü (altta) haritaları.

Şekil 6'da, kesme hızı ile diş başına ilerlemenin parça başına CO_2e bileşenleri üzerindeki etkisi, 100 000 mm³ kaldırılan hacim için harita biçiminde sunulmaktadır. Her panelde yatay eksen kesme hızını, düşey eksen diş başına ilerlemeyi temsil etmekte; renk ölçekleri ise kesme kaynaklı, takım gömülü ve toplam CO_2e değerlerini kg/parça cinsinden göstermektedir.



Şekil 6. 100 000 mm³ kaldırılan hacim için kesme, takım ve toplam kgCO_2e haritaları.

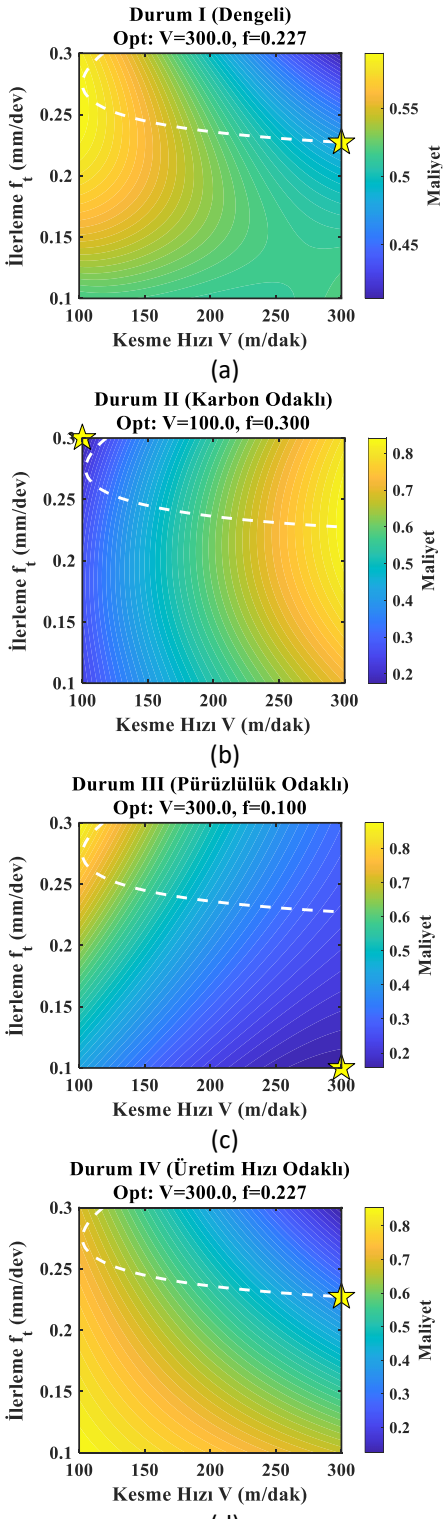
Kesme bileşeni yaklaşık 0,18 ile 0,3 kg/parça aralığında değişmekte, kesme hızı arttıkça azalma, ilerleme arttıkça ise artma eğilimi sergilemektedir; bu durum, daha yüksek hızların çevrim süresini kısaltarak elektrik tüketimini sınırlaması, artan ilerlemenin ise talaş kesitini büyütmesi ile uyumludur. Takım gömülü emisyon bileşeni 0,55 ile 0,85 kg/parça bandında yer almakta; kesme hızına belirgin biçimde duyarlı olup hız arttıkça artmakta, ilerlemenin etkisi ise görece daha sınırlı kalmaktadır. Bu iki eğilimin bileşkesi olarak toplam CO_2e 0,7 ile 1,2 kg/parça aralığında değişmekte ve özellikle kesme hızındaki artışla yükselmektedir. Haritalar, yüksek kesme hızlarında elektrik tasarrufu sağlanmasına rağmen, takım ömründeki hızlı düşüşün getirdiği gömülü emisyon yükünün baskın hale geldiğini ve toplam emisyonu yukarı çektiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, karbon ayak izi açısından en verimli bölgenin, takım ömrünün korunduğu düşük-orta kesme hızları ve yüksek ilerleme kombinasyonlarında oluştuğu görülmektedir.

Şekil 7'de gösterilen Simüle Tavlama sonuçları ve çizelge 5'teki sayısal değerler incelendiğinde, ağırlık vektörlerindeki değişimin optimum çalışma noktasını belirgin biçimde kaydırdığı görülmektedir. Dengeli senaryoda (Durum I) optimum nokta, arama uzayının üst sınırındaki 300 m/dak kesme hızı ve 0,23 mm/dev ilerleme değerinde oluşmuştur. Bu kombinasyon, 0,473 µm yüzey pürüzlülüğü ve 65.109 mm³/dak gibi yüksek bir malzeme kaldırma hızı (MRR) sağlarken, karbon ayak izi 1,029 kgCO_2e/parça seviyesinde hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Simüle tavlama ile elde edilen optimum kesme parametreleri ve performans değerleri

Durum	V (m/dak)	f_t (mm/dev)	CF_{toplam} (kgCO_2)	Ra (µm)	MRR (mm³/dak)
I	300	0,227	1,029	0,473	65109,7
II	100	0,300	0,821	2,238	28647,9
III	300	0,100	0,990	0,107	28647,9
IV	300	0,227	1,029	0,473	65109,7

Çevresel etkinin baskın kılındığı Enerji odaklı (Durum II) senaryoda algoritma enerji tüketimini minimize etmek adına 100 m/dak kesme hızı ve 0,300 mm/dev ilerleme noktasına yakınsamıştır. Yüksek ilerlemenin tercih edilmesi işlem süresini kısalttığı için toplam emisyon 0,821 kgCO_2e/parça ile en düşük değerine ulaşımış ve MRR 28.647,9 mm³/dak seviyesine çıkmıştır. Ancak, yüksek ilerleme nedeniyle yüzey pürüzlülüğü 2,238 µm seviyesine yükselerek kalite açısından taviz verilmiştir. Yüzey kalitesinin önceliklendirildiği (Durum III) senaryoda ise, optimum nokta düşük ilerleme ve yüksek hız bölgesine kaymıştır. Bu strateji, 0,107 µm ile en iyi yüzey kalitesini sunarken, emisyon değerini dengeli duruma göre 0,990 kgCO_2e/parça seviyesine çıkarmıştır. Üretkenlik ağırlıklı (Durum IV) senaryoda, optimum sonuç Dengeli Senaryo (Durum I) ile aynı noktada (300 m/dak, 0,23 mm/dev) birleşmiştir. Bu durum, süreç kısıtları (Güç ve Kuvvet) altında ulaşılabilen maksimum verimlilik noktasının, dengeli ağırlıklandırmada dahi baskın bir çözüm olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. 100 000 mm³ kaldırılan hacim için Simüle Tavlama ile elde edilen çok amaçlı optimizasyon sonuçları. Kesikli beyaz çizgi kesme kuvveti sınırını, düz beyaz çizgi güç sınırını ifade eder. (a) wCF=0,33, wRa=0,33, wMRR=0,34; (b) wCF=0,8, wRa=0,1, wMRR=0,1; (c) wCF=0,1, wRa=0,8, wMRR=0,1; (d) wCF=0,1, wRa=0,1, wMRR=0,8.

Simüle Tavlama algoritmasının önerdiği optimum parametrelerin fiziksel geçerliliğini test etmek amacıyla, Dengeli Senaryo için belirlenen optimum koşullarda bir doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri 0,46 µm olarak elde edilmiştir. Optimizasyon modelinin tahmini olan 0,473 µm değeri ile kıyaslandığında, modelin %3 gibi kabul edilebilir bir sapma ile gerçek üretim sonuçlarını tahmin edebildiği görülmüştür. Bu sonuç, geliştirilen çok amaçlı optimizasyon modelinin endüstriyel uygulamalar için güvenilir bir karar destek aracı olduğunu doğrulamaktadır.

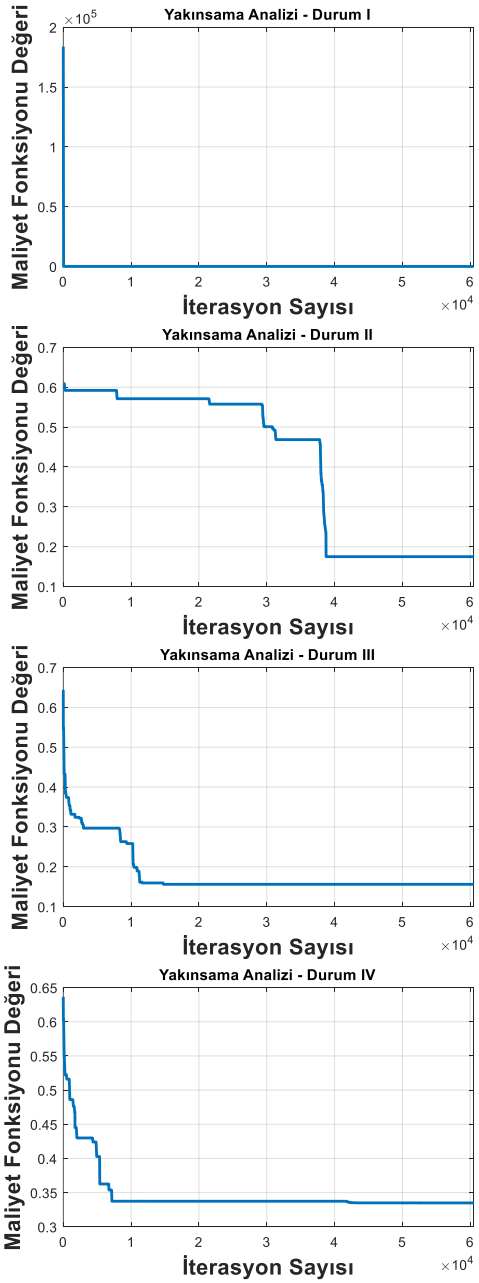
Çalışmada elde edilen bulgular, sürdürülebilir işleme kavramının tek boyutlu bir karbon ayak izi minimizasyonu olarak değil, üretkenlik ve çevre arasındaki bir eko-verimlilik dengesi olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre; Durum II'de 0,821 $kgCO_2e$/parça ile en düşük karbon ayak izi elde edilmesine rağmen, bu noktada yüzey pürüzlülüğü finiş işlemleri için kabul edilemez düzeydedir. Buna karşılık, optimum nokta olarak belirlenen 300 m/dak bölgesinde toplam emisyon yaklaşık %20 artışla 1,029 $kgCO_2e$/parça seviyesine çıkmakta; ancak bu çevresel maliyet karşılığında hem yüzey kalitesi (0,473 µm) korunmakta hem de üretkenlik yaklaşık 2,3 kat artarak 65.109,7 mm^3/dak düzeyine ulaşmaktadır. Bu bağlamda, GJV-400 frezelemesi için önerilen sürdürülebilir çalışma penceresi, subjektif bir tanımdan ziyade şu nicel kriterlerle sınırlandırılmıştır: (i) Yüzey pürüzlülüğünün R_a < 0,6 µm olduğu, (ii) MRR değerinin 50.000 mm^3/dak üzerinde tutulduğu ve (iii) F_t < 750 N güvenlik sınırının aşılmadığı bölge. Bu kriterleri sağlayan hız (250-300 m/dak) ve ilerleme (0,20-0,23 mm/dev) kombinasyonları, birim emisyon artışı başına en yüksek üretim kazancını sunduğu için en uygun operasyonel bölge olarak tanımlanmıştır.

Simüle Tavlama algoritmasının stokastik yapısı nedeniyle sonuçların güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini doğrulamak amacıyla, her bir senaryo için 30 bağımsız optimizasyon koşumu gerçekleştirilmiştir. Bu istatistiksel analizin sonuçları Tablo 6'da, her bir durum için elde edilen yakınsama eğrileri ise Şekil 8'de sunulmuştur.

Tablo 6. 30 bağımsız koşum sonucunda elde edilen istatistiksel performans ve kararlılık göstergeleri

Durum	I	II	III	IV
Min. Mal.	0,478140	0,175000	0,156158	0,334966
Maks. Mal.	0,507928	0,175000	0,156158	0,576781
Ort. Mal.	0,480143	0,175000	0,156158	0,343033
Std. Sap.	0,006292	0	0	0,044148
Süre(s)	1,7	1,73	1,75	1,70

Tablo 6 incelendiğinde, algoritmanın kararlılık seviyesinin senaryoya göre değiştiği ancak genel olarak yüksek güvenilirlik sunduğu görülmektedir. Algoritmanın güvenilirliğini doğrulamak için, 30 bağımsız koşumun her biri farklı rastgele başlangıç noktalarıyla gerçekleştirilmiştir. Özellikle Enerji (Durum II) ve Kalite (Durum III) odaklı senaryolarda standart sapmanın 0 olması, farklı başlangıç noktalarına ragmen algoritmanın 30 koşumun tamamında aynı global optimum noktayı kesinlikle yakaladığını kanıtlamaktadır. Dengeli senaryoda (Durum I) standart sapma 0,0063 gibi kabul edilebilir bir düzeyde seyrederken; Üretkenlik senaryosunda (Durum IV) hesaplanan 0,0441'lik sapma, çözüm uzayının bu bölgesinde birbirine yakın değerlere sahip çoklu yerel optimumların varlığını işaret etmekte, ancak ortalama maliyet (0,343) minimum maliyete (0,335) oldukça yakınsayarak başarılı bir performans sergilemektedir.



Şekil 8. Farklı optimizasyon senaryoları için Simüle Tavlama algoritmasının maliyet fonksiyonu yakınsama analizleri

Şekil 8'deki yakınsama grafikleri incelendiğinde, algoritmanın özellikle zorlu kısıtların olduğu bölgelerde basamaklı bir iyileştirme karakteristiği sergilediği görülmektedir. Durum I'de yüksek maliyetli başlangıç noktasından (muhtemel kısıt ihlali bölgesi) çok hızlı bir düşüşle uygun bölgeye inildiği gözlenirken; Durum II'de yaklaşık 38.000. İterasyonda gerçekleşen keskin düşüş, algoritmanın bir yerel minimum tuzağından başarıyla kurtularak daha derin bir optimum havzasına geçiş yaptığını somut şekilde göstermektedir. Tüm senaryolar için ortalama 1,72 saniye seviyesinde gerçekleşen çözüm süresi, önerilen yöntemin endüstriyel gerçek zamanlı uygulamalar için son derece hızlı ve verimli olduğunu ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada kompakt grafitli dökme demir GJV-400'ün alın frezeleme işlemine yönelik olarak, mekanistik kesme modeli, enerji ve karbon ayak izi modeli ile simüle tavlama tabanlı çok amaçlı optimizasyon bütünleşik bir çerçevede ele alınmıştır. Mekanistik modelden elde edilen kuvvet ve güç haritaları, kesme kuvvetinin başlıca diş başına ilerlemeye, kesme gücünün ise hem kesme hızına hem ilerlemeye duyarlı olduğunu göstermiş; yüksek hız–yüksek ilerleme bölgesinde Ft ve P'nin makine/takım sınırlarına yaklaştığı, düşük hız ve ilerleme bölgesinde ise yüklerin güvenli ancak üretkenliğin sınırlı kaldığı ortaya konmuştur.

100.000 mm^3 talaş hacmi için oluşturulan emisyon haritaları, toplam karbon ayak izinin kesme hızı ile karmaşık bir ilişkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Kesme hızı arttıkça işlem süresi kısaldığı için elektrik kaynaklı emisyon düşmekte; ancak takım ömrünün üstel olarak azalması nedeniyle takım gömülü emisyonu hızla artmaktadır. Bu çalışmada, takım gömülü etkisinin 300 m/dak sınırında baskın hale geldiği ve toplam emisyonu yukarı çektiği gözlemlenmiştir.

Simüle tavlama algoritması ile yürütülen çok amaçlı optimizasyon, farklı üretim stratejileri (ağırlık senaryoları) için şu optimum noktaları belirlemiştir:

Dengeli (Durum I) ve Üretkenlik (Durum IV) Senaryoları: Algoritma, MRR'yi maksimize etmek için teknolojik üst sınır olan 300 m/dak kesme hızı ve 0,23 mm/dev ilerleme değerlerine yakınsamıştır. Bu nokta, 1,03 $kgCO_2e$/parça emisyon ve kabul edilebilir yüzey kalitesi ile sürdürülebilir bir denge sunmaktadır.

Enerji Odaklı (Durum II) Senaryo: Çevresel etkiyi minimize etmek adına çözüm, takım aşınmasını en aza indiren 100 m/dak (alt sınır) kesme hızı ve 0,30 mm/dev ilerleme noktasına kaymıştır. Algoritma bu senaryoda, düşük hız ile takım ömrünü korurken, yüksek ilerleme ile işlem süresini kısaltarak elektrik tüketimini minimize etme stratejisini seçmiştir. Ancak bu durum, yüzey pürüzlülüğünün artması (2,24 µm) pahasına sağlanmıştır.

Kalite Odaklı (Durum III) Senaryo: Yüzey pürüzlülüğünü düşürmek için en düşük ilerleme (0,10 mm/dev) seçilirken, kesme hızı ~280 m/dak seviyesine yükselmiştir. Bu kombinasyon, en düşük yüzey pürüzlülüğünü (0,11 µm) sağlarken, emisyonu 0,99 $kgCO_2e$/parça seviyesinde tutmaktadır.

Optimum noktaların genellikle arama uzayının sınırlarında (100 m/dak veya 300 m/dak) oluşması, ele alınan amaç fonksiyonlarının (Enerji, MRR, Ra) monotonik yapısından kaynaklanmaktadır. Tanımlı aralıkta yerel ekstremumların bulunmaması nedeniyle algoritmanın teknolojik sınırlara yönelmesi, sürecin fiziksel kapasitesinin tam kullanıldığını göstermektedir.

Çalışmanın optimizasyon sonuçları teorik olarak 300 m/dak hızında yüksek verimlilik işaret etse de deneysel veriler bu hızda takım ömrünün 5 dakikanın altına düştüğünü göstermektedir. Endüstriyel pratikte bu denli sık takım değişimi, duruş sürelerini artırarak toplam ekipman verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, üretim planlamasında teorik optimum (300 m/dak) yerine, takım ömrü ve emisyon dengesinin daha kararlı olduğu 200-250 m/dak bandının tercih edilmesi, operasyonel sürdürülebilirlik açısından önerilmektedir.

Bu çalışmada sunulan enerji tüketimi ve karbon ayak izi analizleri, talaş kaldırma işlemi sırasında harcanan 'aktif kesme enerjisine odaklanmıştır. Ancak, Li vd. (2015) tarafından da vurgulandığı üzere, CNC tezgâhlarının hidrolik sistemler, kontrol paneli ve fanlar gibi yardımcı ünitelerinden kaynaklanan bir boşta çalışma gücü mevcuttur. Kullanılan Spinner VC-650 tezgâhı için bu değerin yaklaşık 2 kW seviyesinde olduğu dikkate alındığında; sabit güç tüketiminin toplam enerjiye etkisi, işlem süresine bağlı olarak değişecektir. Özellikle düşük kesme hızlarında işlem süresi uzadığından, bu sabit yükün toplam emisyonu %40-70 oranında artırma potansiyeli bulunmaktadır. Yüksek kesme hızlarında ise işlem süresi kısaldığı için bu etki oransal olarak azalmaktadır. Bu nedenle, çalışmada raporlanan CF değerleri, iyileştirilmiş süreç parametreleri için teorik bir alt sınır olarak değerlendirilmelidir. Gerçek endüstriyel uygulamalarda, tezgâhın baz yükü de hesaplamalara dahil edilerek toplam karbon maliyeti bu alt sınırın üzerine eklenmelidir.

Ayrıca, bu çalışmada sunulan optimizasyon sonuçları ve performans haritaları, sabit 1 mm eksenel talaş derinliği koşulu altında elde edilmiştir. Eksenel talaş derinliği,

kesme kuvvetleri, güç tüketimi ve takım ömrü üzerinde doğrudan ve belirleyici bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, sunulan bulgular spesifik olarak 1 mm koşulu için geçerlidir. Gerçek üretim ortamında talaş derinliğinin değişkenlik gösterebileceği durumlar için, sunulan kuvvet ve takım ömrü modellerinin ilgili derinlik değerlerine göre yeniden kalibre edilmesi ve optimizasyonun tekrarlanması gerekmektedir.

Sonuç olarak; geliştirilen mekanistik model destekli optimizasyon stratejisi, GJV-400 frezelemesinde enerji, maliyet ve kalite hedefleri arasındaki değiş-tokuş ilişkisini başarıyla modellemekte ve karar vericilere sayısal bir yol haritası sunmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazar, tüm etik standartlara uyduğunu beyan eder.

Yazarlık Katkı Beyanı
Kaynaklar, Araştırma, Deneyleme, Biçimsel analiz, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Etik Standartlar Bildirgesi
Yazar tüm etik standartlara uyduğunu beyan eder.

Verilerin Kullanılabilirliği
Yazarlar, bu çalışmanın bulgularını destekleyen ana verilerin makale içerisinde mevcut olduğunu beyan ederler.

Teşekkür / Acknowledgement
Bu çalışma, TÜBİTAK 1002 Programı tarafından desteklenmiştir (121M985).

5. Kaynaklar

Abdelaoui, F.Z.E., Jabri, A. and Barkany, A.E., 2023. Optimization techniques for energy efficiency in machining processes—a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 125(7), 2967–3001. https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y

Altintas, Y., 2012. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press.

Chen, H.C., Lin, J.C., Yang, Y.K. and Tsai, C.H., 2010. Optimization of wire electrical discharge machining for pure tungsten using a neural network integrated simulated annealing approach. Expert Systems with Applications, 37(10), 7147–7153. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.020

Demir, U., Yapan, Y.F., Uysal, M.U. and Uysal, A., 2023. Sustainability assessment and optimization for milling of compacted graphite iron using hybrid nanofluid assisted minimum quantity lubrication method. Sustainable Materials and Technologies, 38. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00756

Goindi, G.S. and Sarkar, P., 2017. Dry machining: a step towards sustainable machining – challenges and future directions. Journal of Cleaner Production, 165, 1557–1571. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.235

Hegab, H.A., Darras, B. and Kishawy, H.A., 2018. Towards sustainability assessment of machining processes. Journal of Cleaner Production, 170, 694–703. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.197

Jeulin, M., Laratte, B., Laheurte, R., Darnis, P. and Cahuc, O., 2024. Sensitivity analysis of dry machining using a Life Cycle Assessment approach. Journal of Manufacturing Processes, 117, 205–212. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.02.063

Kara, M.E., Kuzu, A.T. and Bakkal, M., 2023. The development of a hybrid cutting model for workpiece temperature distribution via advection heat partition approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126, 4283–4295. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11393-2

Khanghah, S.P., Boozarpoor, M., Lotfi, M. and Teimouri, R., 2015. Optimization of micro-milling parameters regarding burr size minimization via RSM and simulated annealing algorithm. Transactions of the Indian Institute of Metals, 68(5), 897–910. https://doi.org/10.1007/s12666-015-0525-9

Kuzu, A.T., Berenji, K.R. and Bakkal, M., 2016. Thermal and force modeling of CGI drilling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 82, 1649–1662. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7466-7

Li, C., Tang, Y., Cui, L. and Li, P., 2015. A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems. Journal of Intelligent Manufacturing, 26(5), 911–922. https://doi.org/10.1007/s10845-013-0812-4

Manav, O. and Chinchanikar, S., 2018. Multi-objective optimization of hard turning: a genetic algorithm approach. Materials Today: Proceedings, 5(5), 12240–12248. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.201

Pawanr, S. and Gupta, K., 2024. A review on recent advances in the energy efficiency of machining processes for sustainability. Energies, 17(15), 3659. https://doi.org/10.3390/en17153659

Shokrani, A., Arrazola, P.J., Biermann, D., Mativenga, P. and Jawahir, I.S., 2024. Sustainable machining: recent technological advances. CIRP Annals, 73(2), 483–508. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.06.001

Soori, M. and Asmael, M., 2022. A review of the recent development in machining parameter optimization. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 16(2), 205–223.

Somashekhar, K.P., Mathew, J. and Ramachandran, N., 2012. A feasibility approach by simulated annealing on optimization of micro-wire electric discharge machining parameters. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 61(9), 1209–1213. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4096-1

Sureban, R., Kulkarni, V.N. and Gaitonde, V.N., 2019. Modern optimization techniques for advanced machining processes – a review. Materials Today: Proceedings, 18, 3034–3042. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.175

Sirtuli, L.J., da Silva, L.R.R., da Silva, R.B., de Paiva, A.P. and Balestrassi, P.P., 2024. Machining of Compacted Graphite Iron: A review. Journal of Materials Processing Technology, 332. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553

Varghese, V., Ramesh, M.R. and Chakradhar, D., 2018. Experimental investigation and optimization of machining parameters for sustainable machining. Materials and Manufacturing Processes, 33(16), 1782–1792. https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1476760

Zhang, Y., Liu, X., Duan, Z., Li, C. and Zhang, Y., 2025. 3D-FEM simulation optimization and tool wear mechanism study of groove-textured tools in precision milling of compacted graphite iron. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. https://doi.org/10.1177/09544054251351362

Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J. and Xu, X., 2016. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. Journal of Cleaner Production, 112, 3721–3734. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093

İnternet kaynakları

ETKB, 2024. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye Elektrik Üretim ve Tüketim Emisyon Faktörleri, https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri (25.01.2026)