

Kutay Aydın*^{ID}Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya/TürkiyeUlvi Şeker^{ID}Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat
Mühendisliği Bölümü, Ankara/Türkiye

AISI 4140 Çelik Alaşımın Sert Tornalanmasındaki Karbon Emisyon Miktarının Sonlu Elemanlar ve Regresyon Yöntemleri ile Analizi

Bu çalışmada, yüksek mekanik özellikleri sebebiyle endüstride yaygın tercih edilen AISI 4140 çelik alaşımın sert tornalama sürecinde karbon emisyon miktarları araştırılmıştır. Bu kapsamda, ilk olarak farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri ile tornalama sonlu elemanlar metodu (SEM) ile analizleri yapılmıştır. SEM analizleri sonucunda elde edilen kesme güçleri ve diğer karbon emisyon faktörleri kullanılarak toplam karbon emisyon değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında, Varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizleri ile karbon emisyon modeli kurulmuştur. Sonuç olarak, en düşük karbon emisyon miktarı 100 m/dk kesme hızı, 0.3 mm/dev ilerleme ve 1.5 mm kesme derinliği parametrelerinde elde edilmiştir. Karbon emisyon üzerindeki en etkili kesme parametresi, %37,58 oranla kesme hızı olduğu anlaşılmıştır. Ek olarak, toplam karbon emisyon miktarının yaklaşık %51'inin atık talaş ve yaklaşık %41'inin iş malzemesi kaynaklı karbon emisyon bileşenlerinin oluşturduğu görülmüştür.

Bu çalışma, 1-3 Kasım 2024 tarihleri arasında gerçekleşen 12. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu'nda (UTIS 2024) tam metin tebliğ olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı imalat, Sert tornalama, AISI 4140, SEM. ANOVA. Karbon emisyonu

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 12 Şubat 2025

Kabul: 8 Nisan 2025

*Sorumlu Yazar: Kutay Aydın

Email: kutay.aydin@amasya.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1638750>

1. GİRİŞ

AISI 4140 (42CrMo4) çelik alaşımı, krom (Cr), mangan (Mn) ve molibden (Mo) alaşım elementleri içeren, yüksek dövülebilme kabiliyeti, korozyon direnci, süneklik, mukavemet ve tokluk vb. mekanik özellikleri sebebiyle dikkat çeken bir çelik alaşımdır. Bu özellikleri nedeniyle otomotiv, imalat, inşaat, havacılık vb. sektörlerde yaygın olarak tercih edilir. Makine parçaları, krank milleri, dişliler, akslar, soğuk çekme miller, yaylar, fren halka ve kolları, türbin motor parçaları, gemi zincirleri vb. sayısız kullanım örneği bulunmaktadır [1-3]. Günümüzde

yaşanılan iklim değişimi, sera gazı salınımı ve çevre kirliliği sorunları, öncelikli ilgilenilmesi gereken büyük küresel problemler arasında yer almaktadır. Bu nedenlerle bilimsel açıdan, ulaşım, taşımacılık, imalat, inşaat, altyapı, tarım, petrol vb. birçok endüstride karbon emisyonları, sürdürülebilirlik, verimlilik, yenilenebilir enerji kaynakları, güvenilirlik, geri dönüşüm vb. kavramların önemi artmaktadır [4-7].

Literatürde, AISI 4140 çelik alaşımın işlenmesi üzerine deneysel, sayısal, makine öğrenmesi ve istatistiksel tabanlı çalışmalar bulunmaktadır. Akbar vd., AISI 4140 çeliğin kaplamasız ve TiN kaplı kesici takımlarla yüksek hızda tormalanması sırasında kesici takımlar üzerindeki ısı dağılımını deneysel ve SEM analizi ile değerlendirmişlerdir [8]. Tzotzis vd., seramik kesici takım ile AISI-4140 çeliğin sert tormalanmasında farklı kesme parametrelerinin sürtünme kuvvetleri, ısı transferi ve takım-talaş temas alanı gerilmeleri üzerindeki etkilerini SEM analizi ile araştırmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [9]. Rafighi, AISI 4140 çeliğin sert tormalanmasında kuru kesme koşulları altında kaplamalı karbür kesici takımlar kullanarak kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin titreşim, motor akımı, işleme gürültüsü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Ayrıca elde edilen veriler ile yüzey pürüzlülüğü tahmini yapılmıştır [10]. Gürbüz ve Gönülaçar, farklı kesme parametrelerinin ve kuru, ıslak ve minimum miktar yağlama işleme koşullarının AISI 4140 çeliğin sürdürülebilirliği ve işlenebilirliği üzerindeki etkisini deneysel ve istatistiksel olarak araştırmışlardır [11]. Makhesana vd., talaşlı imalatla sürdürülebilirliği ve enerji tasarrufunu artırmak için AISI 4140 çeliğin kuru, bitkisel yağ bazlı minimum miktar yağlama ve minimum miktar katı yağlayıcı koşullarında işleme performansını, işleme verimliliği, toplam enerji tüketimi, karbon emisyonu, yüzey pürüzlülüğü, talaş-takım arayüz sıcaklığı ve takım ömrü açısından değerlendirmişlerdir [12]. Asiltürk vd., AISI 4140 çeliğin kuru tormalanmasında farklı kesme parametrelerinin titreşim, yüzey pürüzlülüğü ve akustik emisyonlar üzerindeki etkilerini deneysel ve bulanık mantık makine öğrenme algoritması ile araştırmışlardır [13]. Bagga ve diğerleri, AISI 4140 çeliğin kuru tormalanmasında karbür kesici takımlar kullanarak farklı kesme koşullarının kesici takım ömrü üzerindeki etkisini deneysel ve YSA yöntemi ile araştırmışlardır [14]. Chavoshi ve Tajdari, CBN kesici takım kullanarak AISI 4140 çeliğin sert tormalanmasında yüzey pürüzlülük değerlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile regresyon ve YSA yöntemini kullanarak yüzey pürüzlülüğü modellemesi oluşturmuşlardır [15]. Rafighi vd., kriyojenik işlemle sertliği artırılmış AISI 4140 çeliğinin sert tormalama işleminde CBN kesici takım kullanarak farklı kesme parametreleri ile ekonomik ve sürdürülebilir işleme açısından işleme performansını araştırmışlardır [16]. Literatürde talaşlı imalat sürecinde karbon emisyonlarının dikkate alındığı birçok çalışma mevcuttur. Zhou vd., yaptıkları çalışmada talaşlı imalat sürecinde işleme süresi ve işleme maliyeti faktörlerini dengelemek amacıyla karbon emisyon miktarlarını da dikkate alarak kesme parametreleri için bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir [17]. Cao vd., imalat sektöründe düşük karbonlu üretimin sağlanabilmesi

için takım tezgahlarının karbon emisyonlarının azaltılması gerektiğine odaklanmışlardır. Bunun için takım tezgahlarının yaşam döngüsünü, karbon emisyonları açısından anlamak ve nicel olarak tanımlamak gerekmektedir. Tezgah verimi, işleme süresi ve malzeme kaldırma hacmi, ekipmanlar gibi faktörleri dikkate alarak yaptıkları vaka çalışmasında enerji verimliliğinin artırılabilirdiği ve karbon emisyonlarının azaltılabildiği sonucuna ulaşmışlardır [18]. Pawanr vd., artan çevresel sorunlar sebebiyle imalat sektöründe düşük karbon emisyonlu işleminin gerekliliğine vurgu yapmaktadırlar. Çalışmalarında silindirik iş parçalarının işlenmesindeki karbon emisyonları ölçmek için ampirik bir model geliştirmişlerdir. Modelde, takım tezgahının tüm bileşenlerinin tükettiği enerji, iş parçası tüketimi, kesme sıvısı tüketimi, takım aşınması, atık talaşın geri dönüşümü gibi faktörleri dikkate almışlardır. Ayrıca yaptıkları vaka çalışmalarıyla geliştirdikleri modelin, talaşlı üretim endüstrisinde uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalardan anlaşıldığı üzere giderek ciddileşen iklim değişimi ve çevre kirliliği sebebiyle, bilimsel çalışmalarda karbon emisyonu, sürdürülebilirlik ve güvenilirlik gibi konularının önemi giderek artmaktadır [19-21].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde AISI 4140 çelik alaşımın talaşlı işlenmesinde karbon emisyon miktarı, sürdürülebilir ve çevreye duyarlı işleme konularındaki çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada, birçok endüstride yaygın olarak kullanılan AISI 4140 çelik alaşımın talaşlı imalat sürecinde atmosfere salınan karbon emisyon miktarlarına odaklanılmıştır. Bu kapsamda, farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametreleri kullanılarak tam faktöriyel tasarımda sert tormalama SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizlerinden elde edilen kesme gücü sonuçları ve diğer karbon emisyon faktörleri kullanılarak toplam karbon emisyon miktarları hesaplanmıştır. Sonrasında, ANOVA ve regresyon analizleri ile karbon emisyon modellemesi kurularak optimum kesme şartları belirlenmiştir.

2. SONLU ELEMANLAR METODU (SEM)

SEM analizleri AdvantEdge® yazılımı ile sürdürülmüştür. AdvantEdge® yazılımı, talaşlı imalat operasyonları için geliştirilmiş bir SEM yazılımıdır. Çözüm sırasında updated-Lagrangian yaklaşımı ve otomatik yeniden ağ oluşturma tekniğini kullanmaktadır. Çalışmada 3 boyutlu tormalama SEM analizleri sürdürülmüştür. Kesici takım gövdesi için tungsten karbür malzeme ve 2,5 µm kalınlığında TiN kaplama uygulanmıştır. Tormalama için, kesici takım gövdesi rijit yapıda ve ISO standardına uygun CCGW-120408 olarak tanımlanmıştır. Kesici takımın geometrik parametreleri, 80° köşe açılı baklava dilimi (C) profil, boşluk açısı 7°, burun yarıçapı ve kesici

kenar yuvarlama yarıçapı 0,04 mm olarak belirlenmiştir. İş parçası olarak AISI 4140 malzeme seçilmiş, kesme parametreleri olarak, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği kullanılmıştır. Her kesme parametresi için üçer seviye belirlenmiştir (Tablo 1). Talaş kaldırma işlemleri kuru işleme şartlarında sürdürülmüştür. SEM analizleri çıktısı olarak kesme güçleri elde edilmiş ve elde edilen kesme gücü verileri, karbon emisyon değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. İş parçası için; talaşlı işleme SEM analizlerinde yüksek oranda gerçekleşen gerilim, şekil değişimi, ısı üretimi vb. dinamik faktörlerin doğru anlaşılması ve çözüm doğruluğunun artırılması açısından uygun malzeme modeli olan “Johnson-Cook malzeme modeli” tanımlanmıştır. Johnson-Cook malzeme modelinin genel denklemi Eşitlik 1’de, AISI 4140 çelik için Johnson-Cook model parametreleri Tablo 2’de, mekanik özellikleri ise Tablo 3’te verilmiştir. SEM analizlerinin çözüm doğruluğu açısından iş parçasının malzeme modeli kadar ağ yapısı da son derece önemlidir. Bu nedenle, iş parçası ve kesici takım gövdelerinin ağ yapısında 4 nokta ve 12 serbestlik derecesine (dof) sahip dört yüzlü (tetrahedral) sonlu elemanlar kullanılmıştır. Maksimum düğüm sayısı 24000 olarak tanımlanmıştır. Üç boyutlu SEM modeli, ağ yapısı ve sınır şartları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. SEM analizlerinde kullanılan kesme parametreleri

Seviye	Faktör		
	Kesme hızı, v (m/dk)	İlerleme, f (mm/dev)	Kesme derinliği, ap (mm)
1	100	0,1	0,5
2	200	0,2	1
3	300	0,3	1,5
Cevap	Karbon emisyon, CE (kgCO ₂)		

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastik}} \underbrace{\left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viskozite}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{ortam}}{T_{erime} - T_{ortam}}\right)^m\right]}_{\text{Termal Yumuşama}} \quad (1)$$

Burada σ , ε , $\dot{\varepsilon}$ ve $\dot{\varepsilon}_0$ sembolleri sırasıyla akış gerilimini, gerinim, gerinim oranı ve referans gerinim oranını ifade etmektedir. T kesme sıcaklığı, T_{erime} iş parçası erime sıcaklığı ve T_{ortam} ise ortam veya başlangıç sıcaklığını göstermektedir. A , B , n , C ve m sembolleri sırasıyla akma dayanımı, pekleşme modülü, pekleşme katsayısı, gerinim oranı bağımlılık katsayısı ve termal yumuşama katsayısı olarak ifade edilmektedir. SEM analizlerinde, Coulomb sürtünme modeli kullanılmıştır (Eşitlik 2).

$$F_f = \mu F_n \quad (2)$$

Burada F_f , μ ve F_n sembolleri sırasıyla sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve normal kuvvet olarak ifade edilmektedir. Tungsten karbür ile AISI 4140 çelik alaşım arasındaki sürtünme katsayısı önceki çalışmalar referans alınarak 0,5 olarak tanımlanmıştır [22,23].

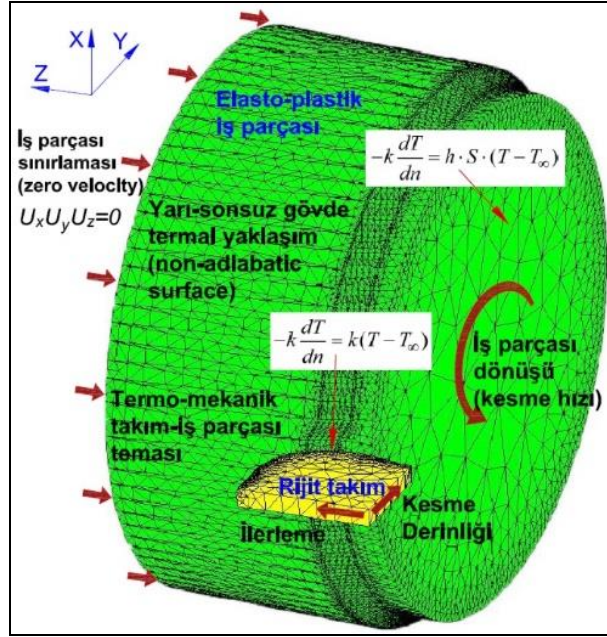
Literatürdeki deneysel ve SEM analizi çalışmalarında AISI 4140 çeliğin Johnson-Cook malzeme model parametrelerinin doğruluğu gösterilmiştir [24,26]. Yine de literatürdeki deneysel bir çalışmadan elde edilen kesme kuvveti bulguları ile SEM analizleri doğrulanmıştır [27]. Literatürdeki çalışmalarda, bu çalışma ile karşılaştırılabilecek kesme gücü verileri yer almadığı için SEM analizleri, kesme kuvveti verileri ile doğrulanmıştır. Doğrulama analizleri Tablo 4’te gösterilmiştir. Tabloda deneysel ve SEM analizi çalışmalarından elde edilen bileşke kesme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Hata oranları %7’nin altında elde edilmiştir. Böylece, AISI 4140 çelik için tanımlanan Johnson-Cook malzeme modelinin bu çalışma için uyumlu ve kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 2. AISI 4140 çelik alaşım için Johnson Cook malzeme model parametreleri [24,23]

A (MPa)	B (MPa)	n	T _{erime} (°C)	T _{ortam} (°C)	m	C	α (1/s)
598	768	0,2092	1416	20	0,807	0,0137	1

Tablo 3. AISI 4140 çelik alaşımın mekanik ve fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Termal iletkenlik (W/mK)	41,7
Özgül ısı (J/kgK)	361
Yoğunluk (kg/m ³)	7850
Termal genleşme katsayısı (1/°C)	1,19E-5
Young modülü (GPa)	200
Poisson oranı	0,3



Şekil 1. Tornalama işlemi için SEM modelinin sınır şartları ve ağ yapısı [25]

Tablo 4. SEM analizlerinin doğrulanması

Literatür	Kesme hızı, v (m/dk)	İlerleme, f (mm/dev)	Kesme derinliği, ap (mm)	Bileşke Kesme kuvveti, Deneysel (N)	Bileşke Kesme kuvveti, SEM (N)	Hata (%)
[27]	180	0,2	0,5	342,526	356,979	4,22
	215	0,15	0,5	266,176	284,008	6,70
	250	0,1	0,5	205,925	219,175	6,43
[22]	150	0,11	0,3	267,669	259,801	2,94
	150	0,14	0,3	316,885	303,108	4,35
	115	0,14	0,3	300,924	293,652	2,42
[28]	550	0,2	0,75	1292,720	1168,900	9,58
	700	0,3	0,75	918,218	857,886	6,57
	850	0,3	0,375	225,610	216,747	3,93

3. AISI 4140 ÇELİK ALAŞIMIN SERT TORNALANMASI İÇİN KARBON EMİSYON MODELİ

Tornalama süresindeki karbon emisyon miktarını tespit etmek için kullanılan elektrik enerjisi, iş parçası ve kesici takımın üretimi ve talaşın geri dönüşümü faktörlerinin her birinden açığa çıkan karbon emisyonlarının hesaplanması gerekmektedir. Kuru tornalama için karbon emisyonunun hesaplanması için genel denklem Eşitlik 3'te verilmiştir [29].

$$CE_{torna} = CE_{elek} + CE_{işp} + CE_{takım} + CE_{talaş} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (3)$$

Burada, CE_{torna} , CE_{elek} , $CE_{işp}$, $CE_{takım}$, ve $CE_{talaş}$ sembolleri sırasıyla kuru tornalama için toplam karbon emisyonu, kesme enerjisinden kaynaklanan karbon emisyonu, iş parçasının

üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu, kesici takımın üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ve atık talaşlardan kaynaklanan karbon emisyonu olarak ifade edilmektedir.

Kesme enerjisinden kaynaklanan karbon emisyonu Eşitlik 4'te gösterilmiştir [29]. Tornalama işleminde, işleme tezgahındaki eksen hareketleri, boşta bekleme vb. dolaylı olarak kesme enerjisini etkileyen elektrik enerji tüketimi mevcuttur. Bu çalışma SEM tabanlı yapıldığı için tezgahın elektrik tüketimi ihmal edilmiştir. Hesaplamalara SEM analizlerinden elde edilen kesme gücü dahil edilmiştir. Kesme enerjisi ve kesme süresi, sırasıyla Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da gösterilmiştir [29]. Tornalama işleminde kesme parametrelerine ek olarak kesme süresini etkileyen faktörler mevcuttur. Bu faktörler, işlenen malzeme kütlesi sabit 1 kg

olacak şekilde belirlenmiştir. Böylece, iş parçası çapı $D=40\text{mm}$, işlenen iş parçasının uzunluğu $L=507\text{mm}$, toplam işleme derinliği $\Delta=2\text{mm}$ olarak tanımlanmıştır. Elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü olarak (CEF_{elek}), dünyanın farklı coğrafik bölgeleri için elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörlerinin ortalaması kullanılmıştır (Tablo 5).

$$CE_{elek} = CEF_{elek} \times E_{kesme} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (4)$$

$$E_{kesme} = P_{kesme} \times t_{kesme} \text{ (kWsa)} \quad (5)$$

$$t_{kesme} = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta}{60 \cdot 1000 \cdot v \cdot f \cdot ap} \text{ (saat)} \quad (6)$$

Burada, CEF_{elek} , E_{kesme} , P_{kesme} , ve t_{kesme} sembolleri sırasıyla elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü, kesme enerjisi, kesme gücü ve kesme süresi olarak gösterilmektedir. D , L , ve Δ sembolleri ise iş parçası çapı, işleme uzunluğu (paso) ve toplam işleme derinliğin ifade etmektedir.

Tablo 5. Dünyadaki farklı coğrafik bölgeler için elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörleri

Coğrafik bölge	CEF_{elek} (kgCO ₂ /kWsa) [30,31]
Afrika	0,8665
Asya	0,5102
Avrupa	0,3619
Orta doğu	0,4804
Kuzey Amerika	0,2613
Güney Amerika	0,2088
Dünya ortalaması	0,4482

İş parçasının üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu, kesici takımın üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ve atık talaşlardan kaynaklanan karbon emisyonu sırasıyla Eşitlik 7, Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'da gösterilmiştir [29]. Bu karbon emisyon bileşenlerinin hesaplanabilmesi için karbon emisyon faktörlerinin bilinmesi gerekir. Çelik iş parçası üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü (CEF_{isp}), karbür kesici takımların üretiminden kaynaklanan karbon emisyon faktörü ($CEF_{takım}$), atık çelik malzemenin geri dönüşümünden kaynaklanan karbon emisyon faktörü ($CEF_{talaş}$) Tablo 6'da verilmiştir. İş parçası için mühendislik çeliği üretimi ve atık talaş için mühendislik çeliği atığına en verimli geri dönüşüm yöntemi uygulandığında elde edilen karbon emisyon değerleri kabul edilmiştir. Kesici takım için hem karbür malzemesi hem de tornalama insertinin üretiminden kaynaklanan karbon emisyonları kabul edilmiştir. Karbür tornalama kesici uç kütlesi 0,015 kg olarak tanımlanmıştır [29].

İşlenen malzeme kütlesi Eşitlik 10'da verilmiştir [29].

$$CE_{isp} = CEF_{isp} \times M_{talaş} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (7)$$

$$CE_{takım} = CEF_{takım} \times M_{takım} \times \frac{t_{kesme} \cdot 60}{T} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (8)$$

$$CE_{talaş} = CEF_{talaş} \times M_{talaş} \text{ (kgCO}_2\text{)} \quad (9)$$

$$M_{talaş} = \frac{v \cdot f \cdot ap \cdot t_{kesme} \cdot \rho \cdot 60}{10^6} \text{ (kg)} \quad (10)$$

Burada $M_{takım}$, $M_{talaş}$ ve T sembolleri sırasıyla kesici takım kütlesi, işlenmiş iş parçası kütlesi (talaş kütlesi) ve kesici takım ömrü olarak gösterilmiştir.

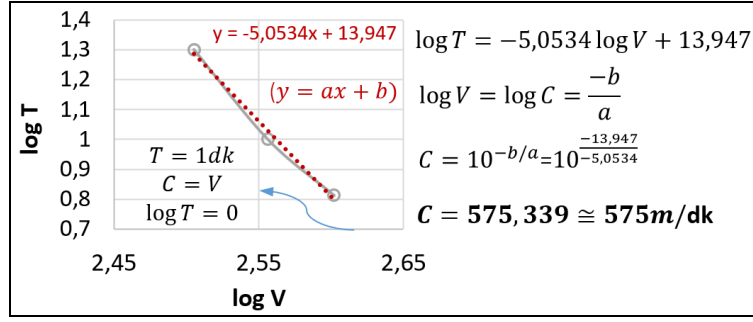
Tablo 6. İşleme malzemeleri için karbon emisyon faktörleri

Malzeme	CEF (kgCO ₂ /kg)
Mühendislik çeliği üretimi (CEF_{isp})	1,27 [32]
Karbür kesici takım üretimi ($CEF_{takım}$)	104,6 [29]
Atık mühendislik çeliği geri dönüşüm süreci ($CEF_{talaş}$)	1,58 [32]

Takım ömrü hesaplaması için genişletilmiş Taylor eşitliği kullanılmıştır (Eş. 11). AISI 4140 çelik kullanılarak yapılmış literatürdeki deneysel takım ömrü çalışmalarından elde edilen deneysel veriler üzerinde non-lineer regresyon uygulanarak genişletilmiş Taylor eşitliği elde edilmiştir (Eş. 12). Literatürde yer alan AISI 4140 çelik ile yapılmış takım ömrü çalışmalarında, farklı işleme parametreleri, farklı takım geometrileri ve takım kaplamaları bulunmaktadır (Tablo 7). Ayrıca literatürde birçok takım aşınması çalışması bulunmasına rağmen takım ömrü verileri bulunan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu sebeple bu çalışmada Taylor eşitliği (Eş. 12) oluşturulurken, AISI 4140 çelik için genel ve ortalama bir takım ömrü modeli kurulmuştur. Literatürden elde edilen takım ömrü verileri (Tablo 7) kullanılarak kurulan Non-lineer regresyon modeli sonucunda Eş. 11'deki n , m , l ve k katsayıları elde edilmiştir. Deneysel ve non-lineer regresyon modeli ile tahmin edilen takım ömrü karşılaştırmaları Şekil 3'te gösterilmiştir.

$$C = T \cdot v^n \cdot f^m \cdot ap^l \cdot k \quad (11)$$

Burada C bir dakikalık kesici takım ömrü için kesme hızıdır. C değerleri, Tablo 7'de belirtilen literatürdeki takım ömrü çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak Şekil 2'deki örnekte gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Takım ömrü modelinde (Eş. 12), Tablo 7'deki tüm C değerlerinin ortalaması olan 576 m/dk değeri kullanılmıştır.



Şekil 2. Literatürdeki takım ömrü verilerinden C değerinin hesaplanmasına bir örnek [33]

$$T = \frac{576}{(v^{3,04385} \cdot f^{-0,307951} \cdot ap^{0,149435} \cdot 6,77E-7)} \text{ (dk)} \quad (12)$$

Tablo 7. Deneysel ve non-linear regresyon yönteminden elde edilen takım ömrü karşılaştırmaları

Referans	Üretici	Tornalama ucu ISO kodu	Kaplama malzemesi	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	C hız değeri (m/dk)	Takım ömrü (dk) Deneysel	Takım ömrü (dk) Non-linear regresyon tahmini
[33]	Seco	TNMG 160408	TiN	320	0,25	1	575	20	13,15
			+Al2O3	360	0,25	1	575	10	9,19
			+TiCN	400	0,25	1	575	6,5	6,67
[34]	Korloy	TNMG 220408	TiN	150	0,25	2	337	73,7	119,02
			+Al2O3	200	0,25	2	337	15,5	49,58
			+TiCN	250	0,25	2	337	5,5	25,14
				300	0,25	2	337	1,72	14,43
				350	0,25	2	337	0,84	9,03
[35]	Tungaloy	SNGA 120408	Al2O3 +TiC	200	0,06	0,1	765	61	49,99
				220	0,04	0,1	765	58	33,01
				220	0,06	0,1	765	45	37,40
				220	0,08	0,1	765	34	40,87
				240	0,06	0,1	765	35	28,70
[36]	Kennametal	VBMT 160408	TiAlN	210	0,14	1	630	48,5	39,65
				260	0,14	1	630	19,5	20,70
				310	0,14	1	630	8,5	12,12
				360	0,14	1	630	7	7,69
				410	0,14	1	630	5	5,17

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

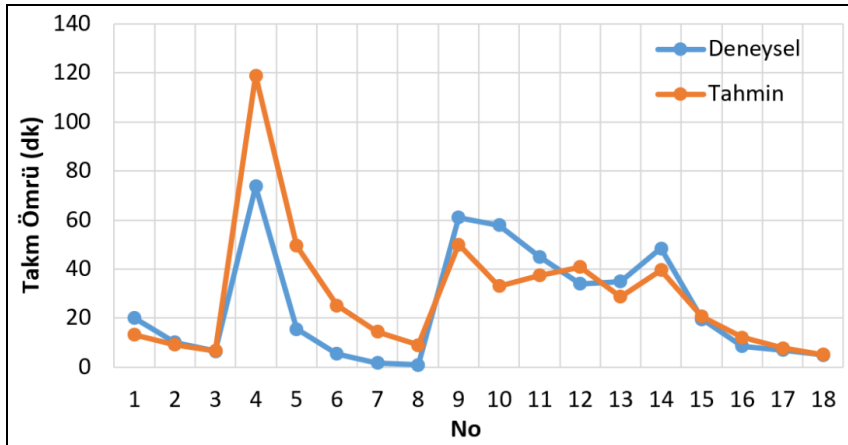
AISI 4140 çelik malzemesinin farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılan tornalama SEM analizleri sonucunda kesme güçleri elde edilmiştir. Kesme gücü ile hesaplanan kesme enerjisi ve diğer karbon emisyon bileşenleri ile tornalama sürecindeki toplam karbon emisyonu hesaplanmıştır. Karbon emisyon değerleri, 1 kg AISI 4140 çelik malzemesinin işlenmesi sonucu elde edilen karbon emisyonudur. Tam faktöriyel düzendeki kesme

parametreleri ve tüm karbon emisyon bileşenleri açısından sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir. Toplam karbon emisyonunun kesme parametrelerine göre değişimini göstermek için etki grafiği oluşturulmuştur (Şekil 4). Etki grafiği incelendiğinde kesme hızı artışı ile karbon emisyonunun arttığı görülmektedir. İlerleme ve kesme derinliği artışı ile karbon emisyonları düşmüştür. Karbon emisyonunun kesme parametrelerine göre değişiminin daha net görülebilmesi için karbon emisyon bileşenlerinin değişimleri Şekil 5’te verilmiştir. İşlenen malzeme

kütlesi sabit 1 kg olduğu için iş malzemesi (CE_{isp}) ve atık talaş ($CE_{talaş}$) kaynaklı karbon emisyon değerleri sabit görülmektedir. Jiang et al. [37], Li et al. [29] ve Jiang et al. [38] yaptıkları çalışmalarda, karbon emisyon değerlerinin kesme hızı ile doğrudan ve dolaylı ilişkilerinin olduğunu raporlamışlardır. Aslında kesme hızı değişimi karbon emisyonlarının yanında bir çok faktörü etkiler. Kesme hızı artışıyla, birim zamanda kaldırılan talaş miktarı diğer bir deyişle talaş kaldırma oranı artar. Kesme hızı artışı ile iş milinin harcadığı enerji miktarı da artar. Bu durumlar karbon emisyonlarının artmasını destekler. Diğer yandan artan kesme hızıyla kesme süresi kısılacağından iş milinin enerji tüketimi de azalır. Bu ise karbon emisyonlarını önemli seviyede azaltıcı etkiye sebep olur. Bu durumların aksine kesme hızı artışı ile takım ömrünün azaldığı bilinen bir olgudur. Takım ömrünün azalması ile kesici takım üretiminden kaynaklanan karbon emisyon bileşeni ($CE_{takım}$) belirgin şekilde artar. Takım ömrü, karbon emisyon değerleri üzerinde baskın rol oynamaktadır [37,38,29]. Kesme hızı ve karbon emisyonu ilişkisini özetlemek gerekirse tornalama sürecinde tüketilen elektrik enerjisi ile kesme süresi ters orantılı olduğu için kesme enerjisinden kaynaklanan karbon emisyon bileşeninin (CE_{elek}) toplam karbon emisyonu üzerindeki etkisi belirgin değildir. Diğer yandan kesme hızı artışı ile takım ömrü azaldığı için kesici takım üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ($CE_{takım}$) değerleri artmıştır (Şekil 5). Bu sebeple kesme hızı artışı ile toplam karbon emisyonu da artmıştır (Şekil 4). İlerleme ve kesme derinliği artışı ile karbon emisyon değerlerinde belirgin azalma gözlenmiştir (Şekil 4). İlerleme ve kesme derinliği arttırıldığında kesme süresi azalır. Kesme süresi azalınca kesici takım daha az aşınacağı için takım ömrü artar. Böylece kesici takım üretiminden kaynaklanan karbon emisyonu ($CE_{takım}$) azalır (Şekil

5). Sonuçta ilerleme ve kesme derinliği artışı ile toplam karbon emisyonunu azaltır (Şekil 4).

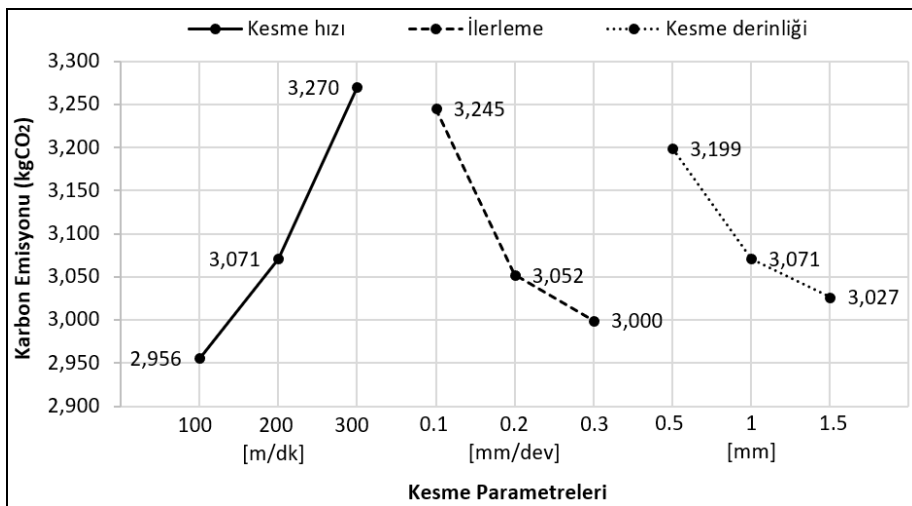
Karbon emisyonu açısından kesme parametrelerinin etki seviyelerinin anlaşılabilmesi için ANOVA analizi ve AISI 4140 çeliğin sert tornalanmasındaki karbon emisyon modellemesi için regresyon analizi yapılmıştır. Analizler %95 güven seviyesi ile yapılmıştır. ANOVA analiz sonuçları, Tablo 9'da gösterilmiştir. Tüm P değerlerinin %5 ($P<0,05$) oranından küçük çıktığı görülmektedir. Buna ek olarak faktörlerin F değerleri ile 0,05'e eşit anlamlılık veya %95 güven seviyesindeki kritik F değerleri de karşılaştırılmıştır. Tüm F değerleri, kritik F değerinden ($F_{0,5,2,26}=3,369$, $F_{0,5,4,26}=2,743$, $F_{0,5,6,26}=2,474$, $F_{0,5,12,26}=2,220$) büyük çıkmıştır. Tüm P ve F değerinin incelemesi sonucunda bağımsız faktörlerin ve seviyelerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğu anlaşılmıştır. Karbon emisyonu açısından en etkili kesme parametresinin %37,58 oranla kesme hızı olduğu görülmektedir. Regresyon analizi sonucu elde edilen model özeti incelendiğinde R^2 , $R^2(\text{adj})$ ve $R^2(\text{pred})$ değerleri sırasıyla %97,88, %93,11 ve %75,84 olarak elde edilmiştir. Buradan, kurulan modelin SEM sonuçları ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Regresyon analizi sonucu oluşturulan matematiksel model Eşitlik 13'te verilmiştir. Regresyon eşitliği, AISI 4140 çelik alaşımın sert tornalama işleminde birim kütle iş parçası başına açığa çıkan karbon emisyon miktarını göstermektedir. Ancak karbon emisyon hesaplamasında kuru tornalama işlemi yapılmış olup, takım tezgah bileşenlerinin elektrik tüketim miktarları hesaplamaya dahil edilmemiştir. Eşitlik 13, AISI 4140 çelik alaşımın sert tornalanması işlemi için gelecek çalışmalarda kullanılabilir ancak ihmal edilen faktörler göz ardı edilmemelidir.



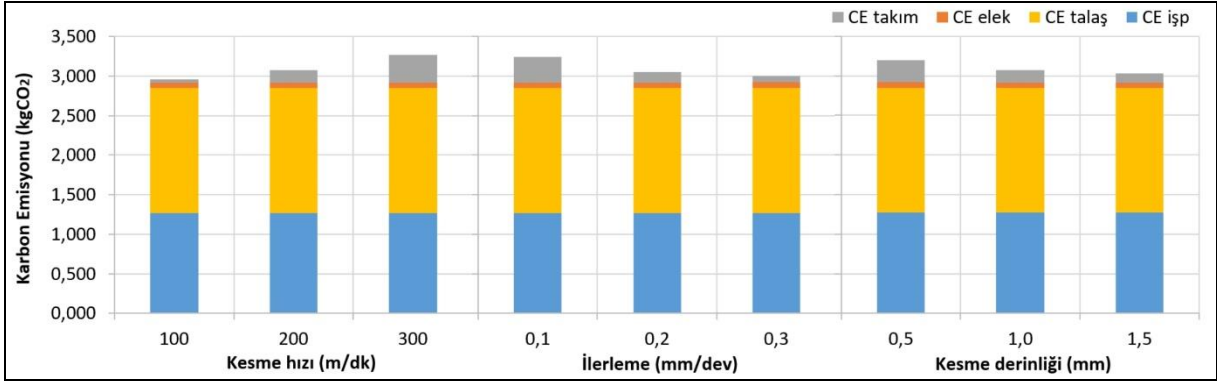
Şekil 3. DeneySEL ve non-lineer regresyon sonuçları açısından takım ömrü karşılaştırma grafiği

Tablo 8. Tam faktöriyel SEM analizleri ve hesaplanan karbon emisyon miktarları

No	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	Kesme gücü (kW)	Kesme süresi (saat)	Takım ömrü (dk)	Kesme enerjisi (kWsa)	CE _{elek} (kgCO ₂)	CE _{isp} (kgCO ₂)	CE _{takım} (kgCO ₂)	CE _{ortal} (kgCO ₂)	CE _{ortal} (kgCO ₂)
1	100	0,1	0,5	0,335	0,425	379,3	0,142	0,064	1,270	0,105	1,580	3,019
2	100	0,1	1	0,661	0,212	342,0	0,140	0,063	1,270	0,058	1,580	2,971
3	100	0,1	1,5	0,995	0,142	321,9	0,141	0,063	1,270	0,041	1,580	2,954
4	100	0,2	0,5	0,756	0,212	469,6	0,161	0,072	1,270	0,043	1,580	2,965
5	100	0,2	1	1,434	0,106	423,4	0,152	0,068	1,270	0,024	1,580	2,942
6	100	0,2	1,5	2,106	0,071	398,5	0,149	0,067	1,270	0,017	1,580	2,934
7	100	0,3	0,5	1,162	0,142	532,1	0,164	0,074	1,270	0,025	1,580	2,949
8	100	0,3	1	2,221	0,071	479,7	0,157	0,070	1,270	0,014	1,580	2,934
9	100	0,3	1,5	3,420	0,047	451,5	0,161	0,072	1,270	0,010	1,580	2,932
10	200	0,1	0,5	0,668	0,212	46,0	0,142	0,064	1,270	0,435	1,580	3,348
11	200	0,1	1	1,304	0,106	41,5	0,138	0,062	1,270	0,241	1,580	3,153
12	200	0,1	1,5	1,963	0,071	39,0	0,139	0,062	1,270	0,171	1,580	3,083
13	200	0,2	0,5	1,462	0,106	56,9	0,155	0,070	1,270	0,175	1,580	3,095
14	200	0,2	1	2,768	0,053	51,3	0,147	0,066	1,270	0,097	1,580	3,013
15	200	0,2	1,5	4,203	0,035	48,3	0,149	0,067	1,270	0,069	1,580	2,986
16	200	0,3	0,5	2,206	0,071	64,5	0,156	0,070	1,270	0,103	1,580	3,023
17	200	0,3	1	4,387	0,035	58,2	0,155	0,070	1,270	0,057	1,580	2,977
18	200	0,3	1,5	6,560	0,024	54,7	0,155	0,069	1,270	0,041	1,580	2,960
19	300	0,1	0,5	1,013	0,142	13,4	0,143	0,064	1,270	0,995	1,580	3,909
20	300	0,1	1	1,904	0,071	12,1	0,135	0,060	1,270	0,552	1,580	3,462
21	300	0,1	1,5	2,975	0,047	11,4	0,140	0,063	1,270	0,391	1,580	3,304
22	300	0,2	0,5	2,262	0,071	16,6	0,160	0,072	1,270	0,402	1,580	3,324
23	300	0,2	1	4,082	0,035	14,9	0,144	0,065	1,270	0,223	1,580	3,138
24	300	0,2	1,5	6,297	0,024	14,1	0,149	0,067	1,270	0,158	1,580	3,074
25	300	0,3	0,5	3,407	0,047	18,8	0,161	0,072	1,270	0,237	1,580	3,159
26	300	0,3	1	6,426	0,024	16,9	0,152	0,068	1,270	0,131	1,580	3,049
27	300	0,3	1,5	9,917	0,016	15,9	0,156	0,070	1,270	0,093	1,580	3,013



Şekil 4. Kesme parametrelerinin karbon emisyonu üzerindeki etki grafiği



Şekil 5. Kesme parametrelerine bağlı olarak karbon emisyon bileşenlerindeki değişimler

Tablo 9. Kesme parametrelerinin karbon emisyonu üzerindeki etkisi için ANOVA sonuçları

Kaynak	DF	SS	MS	F Değeri	P Değeri	Katkı %	Yorum
Model	18	1,18776	0,065987	20,51	0,000	97,88	
Lineer	6	0,90065	0,150108	46,65	0,000	74,22	Anlamlı
v	2	0,45607	0,228033	70,87	0,000	37,58	Anlamlı
f	2	0,30053	0,150266	46,7	0,000	24,77	Anlamlı
ap	2	0,14405	0,072024	22,38	0,001	11,87	Anlamlı
2 Yönlü	12	0,28712	0,023927	7,44	0,004	23,66	Anlamlı
Etkileşimler							
v×f	4	0,16524	0,04131	12,84	0,001	13,62	Anlamlı
v×ap	4	0,07253	0,018132	5,64	0,019	5,98	Anlamlı
f×ap	4	0,04935	0,012338	3,83	0,050	4,07	Anlamsız
Hata	8	0,02574	0,003218				
Toplam	26	1,21351					
Model Özeti							
S= 0,056725				R ² (adjusted)= %93,11			
R ² = %97,88				R ² (predicted)= %75,84			

$$CE_{torna} = 2,701 + (0,005263 \times v) - (0,201 \times f) - (0,113 \times ap) - (0,01104 \times v \times f) - (0,001480 \times v \times ap) + (1,183 \times f \times ap) \quad (13)$$

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AISI 4140 çelik alaşımın sert tormalanmasında sürdürülebilirliği artırmak açısından karbon emisyon miktarı araştırılmıştır. Farklı kesme parametreleri kullanılarak yapılan üç boyutlu SEM analizleriyle kesme güçleri elde edilmiştir. Kesme güçleri ve diğer faktörler ile toplam karbon emisyon miktarları hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen bulgular ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1 kg kütleli AISI 4140 çelik alaşımın sert tormalanma süreci için en düşük karbon emisyonu, 2,932 kgCO₂ olarak 100 m/dk kesme hızı, 0,3 mm/dev ilerleme ve 1,5 mm talaş derinliği parametrelerinde elde edilmiştir.

- En yüksek karbon emisyonu, 3,909 kgCO₂ olarak 300 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme ve 0,5 mm talaş derinliği parametrelerinde elde edilmiştir.
- Kesme parametreleri değişiminin karbon emisyonu üzerindeki etkileri sırasıyla %37,58 oranla kesme hızı, %24,77 oranla ilerleme ve %11,87 oranla talaş derinliği olduğu anlaşılmıştır.
- Kurulan regresyon modelinin karbon emisyonu sonuçlarına ile %97,88 uyumlu olduğu görülmüştür.
- Karbon emisyon bileşenleri açısından; toplam karbon emisyon miktarı ortalamasının yaklaşık %51'ini atık talaş ($CE_{talaş}$) kaynaklı karbon emisyon bileşeni ve yaklaşık %41'ini iş malzemesi ($CE_{iş}$) kaynaklı karbon emisyon bileşeninin oluşturduğu anlaşılmıştır.

- Küresel iklim değişimi ve talaşlı imalatla sürdürülebilirlik açısından mühendislik malzemelerinin üretimi ve geri dönüşümü süreçlerindeki atmosfere salınan karbon miktarlarının azaltılması için endüstrilerin bu konu üzerindeki dikkati artırması gerekmektedir.

Kongre Bilgisi: Bu çalışma, 1-3 Kasım 2024 tarihleri arasında gerçekleşen 12. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu'nda (UTIS 2024) tam metin tebliğ olarak sunulmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı: Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmişlerdir.

Fonlama Bilgileri: Bu çalışma herhangi bir fon tarafından desteklenmemiştir.

Yazar katkısı: Yazarlar, çalışmanın tasarlanması, verilerin toplanması, sonuçların analizi ve yorumlanması ve makalenin hazırlanması ile ilgili sorumluluklarını onaylamaktadır.

Veri Kullanılabilirlik Beyanı: Bu çalışma sırasında üretilen ve/veya analiz edilen veriler kamuya açık değildir, ancak veriler makul bir talep üzerine ilgili yazar tarafından sağlanabilir.

INVESTIGATION OF CARBON EMISSION DURING HARD TURNING OF AISI 4140 STEEL WITH FEM AND REGRESSION METHODS

In this study, carbon emission rates during hard turning of AISI 4140 steel alloy, which is widely preferred in the industry due to its high mechanical properties, were investigated. In this context, firstly, Finite Element Method (FEM) simulations were performed with different cutting speed, feed and cutting depth parameters for turning operations. The total carbon emission values were calculated by using the cutting forces and other carbon emission components obtained from the FEM simulations. Then, the carbon emission model was established by Analysis of Variance (ANOVA) and regression analysis. As a result, the lowest carbon emission amount was obtained at 100 m/min cutting speed, 0.3 mm/rev feed rate and 1.5 mm cutting depth. The most effective cutting parameter on carbon emission was found to be cutting speed with a rate of 37.58%. In addition, about 51% of the total carbon emission amount was found to be waste chips and about 41% was found to be carbon emission components from the workpiece.

This study was presented as a full text paper at the 12th International Congress on Machining (UTIS 2024) held between 1-3 November 2024.

Keywords: Machining, Hard turning, AISI 4140, FEM, ANOVA, Carbon emission

KAYNAKLAR

1. Khan, W.A., Hayat, Q., Ahmed, F., Ali, M., Zain-ul-Abdein, M. 2023. "Comparative Assessment of Mechanical Properties and Fatigue Life of Conventional and Multistep Rolled Forged Connecting Rods of High Strength AISI/SAE 4140 Steel", Metals, Volume 13, Issue 6, Pages 1035.
2. Sun, X., Liu, G., Liang, X., Tong, S. 2023. "Superior Comprehensive Mechanical Properties of a Low-Carbon Medium Manganese Steel for Replacing AISI 4330 Steel in the Oil and Gas Industry", Materials, Volume 16, Issue 2, Pages 490.
3. Mahmood, N., Hussein, A., Hasan, A.S., Ali, O. Effect of AISI 4140 carbon steel heat treatments on specified mechanical properties. In: AIP Conference Proceedings, 2022. vol 1. AIP Publishing,
4. Yadav, P., Singh, J., Srivastava, D.K., Mishra, V. (2021) Environmental pollution and sustainability. In: Environmental sustainability and economy. Elsevier, pp 111-120
5. de la Hoz, J., Martín, H., Guerrero, J.M. 2023. "Technologies and policies for decarbonisation of the industrial and transport sectors", Frontiers in Energy Research, Volume 11, Issue, Pages 1200837.
6. Akšamović, A., Odžak, S. 2023. "Tehnološki napredak i klimatske promjene—tema u obrazovanju inženjera/technological progress and climate change—topic in engineering education", Pregled: časopis za društvena pitanja/Periodical for social issues, Volume, Issue 1, Pages 91-111.
7. Kaygusuz, K. 2021. "Energy efficiency and renewable energy sources for industrial sector", Energy Services Fundamentals and Financing, Volume, Issue, Pages 213-238.
8. Akbar, F., Mativenga, P., Sheikh, M. 2008. "An evaluation of heat partition in the high-speed turning of AISI/SAE 4140 steel with uncoated and TiN-coated tools", Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Volume 222, Issue 7, Pages 759-771.
9. Tzotzis, A., Efklidis, N., Tzetzis, D., Kyratsis, P. FEM-based investigation on machining forces and temperatures induced during AISI-4140 hard turning. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022. vol 1. IOP Publishing, p 012043

10. Rafighi, M. 2022. "Effects of shallow cryogenic treatment on surface characteristics and machinability factors in hard turning of AISI 4140 steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Volume 236, Issue 5, Pages 2118-2130.
11. Gürbüz, H., Gönülaçar, Y.E. 2022. "Experimental and statistical investigation of the effects of MQL, dry and wet machining on machinability and sustainability in turning of AISI 4140 steel", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Volume 236, Issue 5, Pages 1808-1823.
12. Makhesana, M., Baravaliya, J., Parmar, R., Mawandiya, B., Patel, K. 2021. "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*, Volume 43, Issue, Pages 1-14.
13. Asiltürk, İ., Kuntoğlu, M., Binali, R., Akkuş, H., Salur, E. 2023. "A Comprehensive Analysis of Surface Roughness, Vibration, and Acoustic Emissions Based on Machine Learning during Hard Turning of AISI 4140 Steel", *Metals*, Volume 13, Issue 2, Pages 437.
14. Bagga, P.J., Makhesana, M.A., Darji, P.P., Patel, K.M., Pimenov, D.Y., Giasin, K., Khanna, N. 2022. "Tool life prognostics in CNC turning of AISI 4140 steel using neural network based on computer vision", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 123, Issue 9-10, Pages 3553-3570.
15. Zare Chavoshi, S., Tajdari, M. 2010. "Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool", *International journal of material forming*, Volume 3, Issue, Pages 233-239.
16. Rafighi, M., Özdemir, M., Das, A., Das, S.R. 2022. "Machinability investigation of cryogenically treated hardened AISI 4140 alloy steel using CBN insert under sustainable finish dry hard turning", *Surface Review and Letters*, Volume 29, Issue 04, Pages 2250047.
17. Zhou, G., Lu, Q., Xiao, Z., Zhou, C., Tian, C. 2019. "Cutting parameter optimization for machining operations considering carbon emissions", *Journal of Cleaner Production*, Volume 208, Issue, Pages 937-950.
18. Cao, H., Li, H., Cheng, H., Luo, Y., Yin, R., Chen, Y. 2012. "A carbon efficiency approach for life-cycle carbon emission characteristics of machine tools", *Journal of Cleaner Production*, Volume 37, Issue, Pages 19-28.
19. Pimenov, D.Y., Mia, M., Gupta, M.K., Machado, Á.R., Pintaude, G., Unune, D.R., Khanna, N., Khan, A.M., Tomaz, Í., Wojciechowski, S. 2022. "Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 166, Issue, Pages 112660.
20. Khanna, N., Agrawal, C., Dogra, M., Pruncu, C.I. 2020. "Evaluation of tool wear, energy consumption, and surface roughness during turning of inconel 718 using sustainable machining technique", *Journal of materials research and technology*, Volume 9, Issue 3, Pages 5794-5804.
21. Ghosh, S., Rao, P. 2019. "Comparison between sustainable cryogenic techniques and nano-MQL cooling mode in turning of nickel-based alloy", *Journal of cleaner production*, Volume 231, Issue, Pages 1036-1049.
22. Öztürk, E. 2022. "FEM and statistical-based assessment of AISI-4140 dry hard turning using micro-textured insert", *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 81, Issue, Pages 290-300.
23. Ma, J., Yong, Y., Lei, S. 3D FEM investigation of the effects of nose radius and edge radius on turning of AISI 4140. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2012. American Society of Mechanical Engineers, pp 1085-1089
24. Lotfi, M., Amini, S., Aghaei, M. 2018. "Tool wear modeling in rotary turning modified by ultrasonic vibration", *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 87, Issue, Pages 226-238.
25. Aydin, K. 2023. "Investigating cutting force and cutting power when turning AA6082-T4 alloy at cutting depths smaller than tool nose radius", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Volume 26, Issue 4, Pages 972-982.
26. Arrazola, P., Ugarte, D., Dominguez, X. 2008. "A new approach for the friction identification during machining through the use of finite element modeling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Issue 2, Pages 173-183.
27. Özdemir, M., Şahinoğlu, A., Rafighi, M., Yilmaz, V. 2022. "Analysis and optimisation of the cutting parameters based on machinability factors in turning AISI 4140 steel", *Canadian Metallurgical Quarterly*, Volume 61, Issue 4, Pages 407-417.
28. Sivaramakrishnaiah, M., Kumar, P.N., Janardhana, G.R. 2015. "Prediction of cutting forces in turning of AISI-4140 steel using

- FEA and experimental validation", i-Manager's Journal on Mechanical Engineering, Volume 6, Issue 1, Pages 24-33.
29. Li, C., Tang, Y., Cui, L., Li, P. 2015. "A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems", Journal of Intelligent Manufacturing, Volume 26, Issue, Pages 911-922.
30. Carbon_Footprint (2022) 2022 Grid Electricity Emissions Factors v0.1 – February 2023. Carbon Footprint. https://www.carbonfootprint.com/docs/2023_02_emissions_factors_sources_for_2022_electricity_v10.pdf. Accessed 20.09.2023
31. Climate_Transparency (2022) Climate Transparency 2022 Report. Climate Transparency. <https://www.climate-transparency.org/>. Accessed 20.09.2023
32. Circular_Ecology (2019) The Inventory of Carbon and Energy (ICE) database v3.0 - November 2019. Circular Ecology. <http://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. Accessed 19.09.2023
33. Motorcu, A., Şahin, Y. 2004. "AISI 4140 Çeliğinin Farklı Kaplamalı Karbür Ve Sermet Kesici Takımlarla İşlenebilirliği", On Birinci Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi, Antalya, Türkiye, Volume, Issue, Pages 13-15.
34. Karayel, B., Nalbant, M. 2014. "Ç4140 Malzemesinin Tornalamasında İlerleme, Kesme Hizi Ve Kesici Takimin Yüzey Pürüzlülüğü, Takim Ömrü Ve Aşınmaya Etkileri", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Volume 11, Issue 3, Pages 11-26.
35. Paengchit, P., Saikaew, C. 2023. "Simulation of the influence of cutting speed and feed rate on tool life in hard turning of AISI 4140 steel", Materials Science-Poland, Volume 41, Issue 2, Pages 311-324.
36. Khrais, S.K., Lin, Y. 2007. "Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel", Wear, Volume 262, Issue 1-2, Pages 64-69.
37. Jiang, Z., Gao, D., Lu, Y., Kong, L., Shang, Z. 2021. "Quantitative analysis of carbon emissions in precision turning processes and industrial case study", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Volume 8, Issue, Pages 205-216.
38. Jiang, Z., Gao, D., Lu, Y., Liu, X. 2019. "Optimization of cutting parameters for trade-off among carbon emissions, surface roughness, and processing time", Chinese journal of mechanical engineering, Volume 32, Issue, Pages 1-18.