

Yusuf Tansel İç  
Doç. Dr.

F. Selin Akkoç  
End. Müh.

Nergis Gümüşboğa  
End. Müh.

Zeynep Ballı  
End. Müh.

Başkent Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Endüstri Müh. Bölümü  
Ankara

# Tornalama İşleminde Karbon Emisyonunu En Aza İndiren Bir Modelin Geliştirilmesi

*Son günlerde birçok araştırmacı büyük miktarda enerji tüketen ve atmosfere karbon salan imalat işlemleri üzerinde yoğunlaşmışlardır. Karbon salınımını azaltmayı amaçlayan düşük karbonlu üretim literatürde popüler bir konu başlığıdır. Bu çalışma, geleneksel tornalama işleminde karbon salınım miktarının belirlenmesine yönelik bir bütünlük model sunmaktadır. Çalışmada kesici takım, elektrik sistemi, iş parçası ve kesici takım malzeme özellikleri ve talaş kaldırma gibi geleneksel torna tezgahı alt sistemlerinin toplam karbon emisyonuna katkıları araştırılmıştır. Ardından tekil alt sistemlerin toplam karbon salınımı miktarını nicel olarak ortaya koyan bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model geleneksel bir torna tezgahında farklı kesme faktörlerinin karbon salınımına etkilerini tespit etmek için bir tornalama işlemine uygulanmıştır.*

*Anahtar Kelimeler: Karbon salınımı; talaşlı imalat; tornalama; Taguchi Yöntemleri; enerji tüketimi.*

## 1. GİRİŞ

Karbon salınımı karbon içerikli yakıtların (fosil yakıtlar, petrol, doğalgaz, kömür vb.) yanması sonucu karbondioksitin oluşarak atmosfere karışmasıdır.

Endüstri sektörlerinin önemli bir parçası olan talaşlı imalat işlemleri küresel ekonomide oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, talaşlı imalatın gerçekleştirildiği üretim süreçlerinde enerji tüketiminin azaltılması, çevreye duyarlı üretim açısından önemli bir konu haline gelmiştir. Bilindiği üzere; fosil yakıtların, özellikle endüstriyel sektörlerde giderek daha yaygın kullanılması, atmosferde sera gazlarından biri olan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) miktarında önemli bir artışa yol açmaktadır. Bu nedenle karbon salınımının çevre üzerindeki olumsuz etkisi reddedilemez bir gerçek haline gelmektedir.

Küresel ısınma konusundaki kaygıların artmasına paralel olarak, büyük ölçüde enerji tüketip, atmosfere karbon salan endüstriyel etkinliklerde karbon salınımının azaltılması günümüzün önemli konularından biri haline gelmiştir. Karbon salınımını büyük ölçüde arttıran enerji tüketimi ile paralel olarak artan çevre kirliliği ve küresel ısınma konusundaki kaygılar da gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle karbon yoğunluğunu azaltarak, kaynak kullanımını iyileştirmeyi amaçlayan düşük karbonlu üretim yöntemlerine yönelik araştırma ve çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu çalışmada, bir tornalama işleminde tornalama işlemine katkısı olan alt

sistemlerin karbon salınımını (emisyonunu) en aza indirmek üzere, tornalama işlemi kesme parametrelerinin eniyilenmesine yönelik bir model geliştirilmiştir. Çalışmada öncelikle; elektrik sistemi, kesici takım sistemi, iş parçası ve kesici takım malzeme özellikleri ve talaş oluşumu gibi, bir torna tezgahının toplam karbon emisyonu değerine katkıda bulunan alt sistemler için karbon salınımı değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Daha sonra, tekil bazdaki alt sistemler sonucunda ortaya çıkan karbon salınımı miktarları toplanarak tornalama işlemi için toplam salınım miktarının hesaplanabildiği bir uygulama geliştirilmiştir. Ardından tornalama işleminde karbon salınımını en aza indiren kesme koşullarının belirleneceği bir model Taguchi yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde talaşlı imalatla ilgili olarak karbon salınımı değerine etki eden faktörleri sınıflayan ve alt sistemler bazında karbon salınımının hesaplanabildiği formülasyonları ayrıntılı olarak ortaya koyan nitelikteki bir çalışma Li v.d. [1] tarafından gerçekleştirilmiştir. Diğer bir çalışmada Herrmann ve Thiede [2] üretim sistemlerinde farklı katmanlardaki enerji verimliliğini artırmak için bir süreç zinciri benzetim yöntemi ortaya koymuştur. Tian [3] enerji değerlendirme yöntemi ve ilişkiyi süreç planlama için olasılıklı eniyileme modelleri üzerinde çalışmıştır.

Rahimifard [4], hangi enerji verimsizliklerinin kolayca belirlenerek iyileştirilebileceğine bağlı bir model önermiştir. Gutowski [5] ise kaynak tüketim özelliklerinin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin araştırılmasını sağlayan bir çerçeve çalışması sunmuştur. Neugebauer [6], Gutowski'nin çalışmasına benzer bir çalışmayı metal kesme takımları için gerçekleştirmiştir. Diaz [7] ise yine Gutowski'nin çalışmasına benzer bir çalışmayı freze tezgahı takımlarının enerji tüketimi azaltma stratejileri için gerçekleştirmiştir. Yukarıda belirtilen çalışmalara benzer türde yine kesici takımlarının, işlemlerin ve sistemlerinin enerji verimliliklerini ortaya koymak üzere geliştirilen modellerle ilgili literatürdeki diğer çalışmalar Tablo 1'de sunulmuştur.

Bu çalışmamızda, ülkemizde imalat sanayiinde önemli bir paya sahip olan talaşlı imalat sektöründe

en yaygın kullanıma sahip işlemlerden biri olan tornalama işlemi için karbon salınımını en aza indirecek bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin literatürdeki çalışmalardan en önemli farkları; modelin Türkiye Enerji Verimliliği değerleri ve ilgili parametreleri kullanılarak geliştirilmiş olması, karbon emisyonu modelinin tornalama işlemi için en uygun kesme şartlarını sunabilmesi, tornalama süresini formülasyonlar kullanarak hesaplamak yerine, gerçek zamanlı tornalama işlemi deneyleri gerçekleştirilerek yapılması ve böylece deneye etki eden kontrol edilemeyen unsurların da sonuçlar üzerine etkisinin yansıtılabilmesidir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, kesme parametrelerinin en iyi değerlerinin hesaplandığı bir deney tasarımı modeli de çalışmada sunulmuştur.

Tablo 1. Karbon emisyonu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar

Kaynak No	Yazar	Yıl	Açıklama
[8]	Jia v.d.	2013	İşleme proseslerine yönelik bir enerji talebi modelleme yöntemini incelenmiştir.
[9]	Krishnan v.d.	2004	Çevre değer sistemlerinin analizini kullanarak, yarı iletken ekipmanların karbon ayak izinin ölçümünü yapmıştır.
[10]	Jeswiet ve Kara	2008	Üretimde enerji tüketimi ile karbon emisyonu arasındaki ilişkiyi göstermek amacıyla elektrik karbon emisyon faktörü kavramını ortaya atmıştır.
[11]	Tridech ve Cheng	2008	Karbon emisyon analizini, düşük karbonlu üretimin özelliklerini modellemeyecek biçimde genişletmiş ve daha sonra, hem tesis ortamında, hem de tedarik zinciri düzeyinde düşük karbonlu üretim için iki işletim modeli ortaya atmış ve benzetim modelini sunmuştur.
[12]	Diaz v.d.	2010	Freze tezgahlarının enerji tüketimini temel alarak, bu tezgahların çevreci tasarım ve işletim stratejilerini araştırmıştır.
[13]	Song ve Lee	2010	Malzeme listesinden hareketle, entegre bir düşük karbon salımlı ürün tasarım sistemi öne sürmüş ve ürün parçalarının karbon emisyonlarını da çalışmasına dahil etmiştir.
[14]	Rajemi v.d.	2010	İşlenmiş bir ürünün enerji ayak izinin optimizasyonu için yeni bir model ve metodoloji geliştirmiştir.
[15]	Le ve Lee	2011	Küresel tedarik zinciri ağının ekolojik – çevresel etkisini analiz etmek için bir model geliştirmiştir.
[16]	Halavi v.d.	2011	Tahrik takımlarının boşa bekleme zamanını kontrol ederek bir enerji tüketimi azaltma yöntemi geliştirmiştir.
[17]	Chen v.d.	2011	Çin enerji sektöründeki düşük karbonlu üretim teknolojilerinin ayrıntılı bir senaryo analizi, kapsamlı bir güç karışımı planlama modeline dayanılarak gerçekleştirilmiştir.
[18]	Fang v.d	2011	Enerji tüketimi ve bununla ilişkili karbon ayak izinin yanı sıra çevrim zamanını dikkate alan atölye tipi çizelgeleme çalışmasını ortaya koymuştur.
[19]	Duflou v.d.	2012	Enerji ve kaynak verimliliğine sahip üretime yönelik metodoloji ve teknolojilerin kapsamlı bir değerlendirmesi verilmiştir.

### 3. TORNALAMA İŞLEMİ İÇİN KARBON SALINIMI MODELİ

Tezgah bazlı karbon salınımı modelleri genellikle her biri takım tezgahı, bağlantıları, kesici takımları, iş parçaları ve bunlar gibi bileşenlerden oluşan bir veya daha fazla unsuru içerir [1]. Bu tür sistemlerin karbon salınımları ise dolaylı olarak, tezgah işletim sistemlerinin çalışması sonucu ortaya çıkar. Bir takım tezgahı elektrikle çalışır. Tezgahın çalışması için gereken elektrik kullanımı karbon salınımı ortaya çıkarmasa dahi, elektrik santralinin ürettiği elektrik miktarını artırması nedeniyle karbon salınımına katkıda bulunur. Dolayısıyla tezgah daha az zorlanarak daha uygun kesme koşullarında çalışırsa, daha az elektrik tüketerek daha az karbon salınımı yapılmasına katkıda bulunur.

Endüstri sektörlerinin önemli bir parçası olan talaşlı imalat, küresel ekonomide oldukça önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, enerji yoğunluklu işlemlerin atmosferdeki CO<sub>2</sub> düzeyinin hızlı artışında payı büyüktür. Üretimde tüketilen enerji, geçtiğimiz 60 yılda neredeyse iki katına çıkmış olup, bu değer artmaya devam etmektedir. Özellikle çok büyük miktarlarda üretilen, yüksek güç ve uzun kullanım ömrüne sahip takım tezgahları, üretimdeki enerji

tüketiminin ana kaynağını oluşturmaktadır [20]. Dolayısıyla, takım tezgahlarının gerçekleştirdiği üretim süreçlerinde enerji tüketiminin azaltılması, çevreye duyarlı üretim açısından son derece önemli bir konu haline gelmiştir [1]. Çalışmamızda gerçekleştirilecek analizler için ülkemizde halihazırda özellikle küçük ve orta ölçekli işletmelerde yaygın olarak kullanılan geleneksel torna tezgahı tercih edilmiştir. Yine en kötü kesme şartlarının değerlendirilebilmesi için kuru kesme koşulları ele alınmıştır.

#### 3.1. Tornalama İşlemi İçin Karbon Salınımının Nicel Ölçümleri ve İlgili Formülasyonlar

Çalışma kapsamında yapılacak hesaplamalar için gerekli formülasyonlar literatürden derlenerek Türkiye koşullarına uygun bir şekilde yeniden düzenlenmiştir. Tornalama işleminde tezgah bazlı karbon emisyonlarını ifade eden  $CE_{ms}$  formülasyonu aşağıdaki eşitlikte de verildiği üzere; elektrik sistemi, kesme sıvısı sistemi, kesici takım, motor ve talaştan kaynaklanan karbon emisyonu alt bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. Çalışmada kuru kesme koşulları ele alındığı için kesme sıvısı sistemi formülasyonlarda dikkate alınmamıştır. Aşağıda her bir bileşenin hesaplanmasına ilişkin olarak detaylı formüller sunulmaktadır [1, 14]:

*Tornalama İşleminde Karbon Salınımını Hesaplama Formülü:*

$$CE_{ms} = CE_{elek} + CE_{takım} + CE_{motor} + CE_{talaş} \quad (1)$$

$CE_{ms}$ : Tornalama İşleminde tezgah bazlı karbon salınımı ( $kgCO_2$ )

*$CE_{elek}$  Hesaplanması:*

$$CE_{elek} = CEF_{elek} \times EC_{makine} \quad (2)$$

$CE_{elek}$ : İşlemler için gerekli elektrik üretiminin yol açtığı karbon salınımı ( $kgCO_2$ )

$CEF_{elek}$ : Elektrik karbon salınımı faktörü ( $\frac{kgCO_2}{kWh}$ )

$$EC_{makine} = [P_u \times (t_{boşta}) + P_i \times (t_c)] / 3600 \quad (3)$$

$EC_{makine}$ : Tezgahın enerji tüketimi ( $kWh$ )

$t_c$ : Kesme süresi ( $sn$ )

$t_{boşta}$ : Atıl süre ( $sn$ )

$P_u$ : Atıl güç ( $W$ )

$P_i$ : Giriş gücü ( $W$ )

*$CE_{takım}$  Hesaplanması:*

$$CE_{takım} = \left( \frac{t_c}{T_{takım}} \right) \times CEF_{takım} \times W_{takım} \quad (4)$$

$CE_{takım}$ : Kesici takımın yol açtığı karbon salınımı ( $kgCO_2$ )

$$CEF_{takım} = (CEF_{elek} \times K / 3,6) \times (1000 / W_{takım}) \quad (5)$$

$CEF_{takım}$ : Kesici takımın karbon salınımı faktörü ( $\frac{kgCO_2}{kg}$ )

$K$ : Kesici takım enerji tüketim sabiti

$W_{takım}$ : Takımın kütlesi ( $g$ )

$T_{takım}$ : Takımın kullanım ömrü ( $dk$ )

$CE_{motor}$  Hesaplanması

$$CE_{motor} = CEF_m \times M_{talaş} \quad (6)$$

$CE_{motor}$ : Hammadde üretiminin yol açtığı karbon salınımı ( $kgCO_2$ )

$$M_{talaş} = (v_c \times f \times a_p \times t_c \times \rho) / 10^6 \quad (7)$$

$M_{talaş}$ : Talaş kütlesi ( $kg$ )

$$\rho = \text{Malzeme yoğunluğu} \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

$$CEF_m: \text{Malzeme karbon salınımı faktörü} \left( \frac{kgCO_2}{kg} \right) \quad (8)$$

$CE_{talaş}$  Hesaplanması:

$$CE_{talaş} = CEF_{talaş} * M_{talaş} \quad (9)$$

$CE_{talaş}$ : Talaş kaldırma işleminin yol açtığı karbon salınımı ( $kgCO_2$ )

$$CEF_{talaş}: \text{Talaşın karbon salınımı faktörü} \left( \frac{kgCO_2}{kg} \right)$$

Deneyde kullanılacak olan 60 mm çapında 160 mm uzunluğundaki alüminyum malzemeden yapılmış silindirik deney numunesine ilişkin olarak karbon salınımı hesaplamasında yukarıdaki formüllerde kullanılacak iş parçası/tornalama işlemi bağlantılı parametreler ise aşağıda sunulmuştur:

$$CEF_{talaş} = 0,256 \left( \frac{kgCO_2}{kg} \right) \quad (\text{Alüminyum malzeme})$$

$$CEF_m = 16,13 \left( \frac{kgCO_2}{kg} \right) \quad (\text{Alüminyum malzeme})$$

$$d_w = 60 \text{ (mm)}$$

$$L_w = 160 \text{ (mm)}$$

$$\rho = 2,73 \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad (\text{Alüminyum malzeme})$$

$$K: \text{Kesici takım başına enerji} = 5,3 \text{ MJ}$$

$$t_{boşta} = 60 \text{ (sn)}$$

$$W_{takım} = 15 \text{ (g)}$$

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'ndan alınan ve enerji üretiminde en önemli paya sahip olan doğalgaz, taş kömürü ve linyitin Ankara ili için kWh başına “kg  $CO_2$ ” miktarlarını içeren  $CEF_{elek}$  değeri 0,4916 kg  $CO_2$ /kWh olarak belirlenmiştir. Bu değer kullanılarak yukarıda verilen formülasyonlarla birlikte Türkiye koşulları için karbon salınımı değerleri ve gerekli parametreler hesaplanmıştır. Tornalama işleminde farklı unsurların (alt sistemler) ortaya çıkardığı karbon salınımlarının ayrıntılı hesaplamaları Excel programında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ilgili parametre değerlerine göre karbon salınımı hesaplamaları otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4. TAGUCHİ YÖNTEMİ UYGULAMASI

Taguchi yöntemi değişik faktörlerin değişik seviyeleri içerisinde en iyi kombinasyonu bulmak için oldukça faydalı bir yöntemdir. Her bir faktörün

değişik seviyelerini içeren tüm kombinasyonlar için çok fazla deney yapılması gereken durumlarda Taguchi yönteminde ortogonal dizi tablosu [21] kullanılarak çok daha az sayıda deneyle sonuca ulaşmak mümkündür. Yöntemin gerek geniş kullanım alanına sahip olması, gerekse daha az deney yaparak hem zaman kazancı, hem de daha az maliyetle sonuçların elde edilmesine imkân sağlaması gibi avantajlar sunması, çalışma kapsamında Taguchi yönteminin kullanılmasında etkili olmuştur. Literatürde oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan ve iyi bilinen Taguchi Yönteminin uygulama aşamalarının açıklamasına bu çalışmada yer verilmemiş olup, ilgilenen araştırmacılar yöntemin uygulanmasına ilişkin detaylı bilgilere [21-23 ] numaralı kaynaklardan ulaşabilirler.

Çalışmanın bu bölümünde, deneyde tornalama işlemine tabi tutulacak olan iş parçası alüminyum malzemeden yapılmış olan 60 mm çapında, 160 mm uzunluğunda silindirik bir iş parçasıdır. Deneyde 3 farklı kesici takım kullanılmıştır. 1 numaralı kesici takım tungsten carbide alaşımı (KNUX160405 R11H01), 2 numaralı kesici takım titanyum kaplamalı tungsten carbide alaşımı (KNUX160405 R11DP30), 3 numaralı kesici takım ise alaşım oranları 2 numaralı takımından farklı olan yine titanyum kaplamalı tungsten carbide alaşımıdır (KNUX160405 R117010). Kesme hızı, kesici takım tipi ve kesme derinliği olmak üzere tespit edilen kesme parametrelerinin 3'er seviyesi (Tablo 2) kullanılarak Taguchi'nin L9 tasarımı (Tablo 3) doğrultusunda bir deney tasarımı oluşturulmuş ve 3 tekrarlı deney sonuçları elde edilmiştir. Deneylerde yanıt olarak işlem tamamlanma süresi alınmıştır. Deneyde kullanılan geleneksel torna tezgahının resmi Şekil 4'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Faktörler ve seviyeleri

Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Kesme Hızı (Faktör A)	1,25m/sn	3,75m/sn	6,25m/sn
Kesici Takım (Faktör B)	1.tip	2.tip	3.tip
Kesme Derinliği (Faktör C)	1mm	1,5mm	2mm

Tablo 3. L9 ortogonal tasarım

Deney No	Faktör A	Faktör B	Faktör C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2



Şekil 4. Torna tezgahı ve iş parçası

Deneyin başlangıç aşamasında, 3 kez tekrarlanacak deney seti için üç farklı gün ve günün farklı saatleri seçilmiştir. Her bir deney setinde gerçekleştirilecek deneyler için deney senaryolarının

sıralaması 1-9 arasında rassal sayı oluşturularak belirlenmiştir (Tablo 4).

Tablo 4'de koyu yazı karakteriyle belirtilen 1. Gün gerçekleştirilen ilk deney için karbon emisyonu hesaplama detayı aşağıda sunulmuştur:

Tablo 4. Deney sonuçları

Deney	Faktörler			Yanıt	
	Kesme Hızı (m/sn)	Kesici Takım Tipi	Kesme Derinliği (mm)	t <sub>c</sub> (Ölçülen Süre,sn)	Karbon Salınımı (kg CO <sub>2</sub> )
1.gün	1,25	3	2	452	10,20
	1,25	1	1	456	5,20
	3,75	1	1,5	131	6,63
	6,25	1	2	92	10,31
	6,25	2	1	83	4,66
	1,25	2	1,5	455	7,73
	3,75	2	2	136	9,16
	3,75	3	1	125	4,22
	6,25	3	1,5	85	7,15
	1,25	3	2	455	10,27
2.gün	1,25	2	1,5	452	7,68
	1,25	1	1	450	5,13
	1,25	3	2	451	10,18
	3,75	2	2	128	6,52
	3,75	1	1,5	129	6,52
	3,75	3	1	128	4,32
	6,25	1	2	84	9,41
	6,25	3	1,5	85	7,15
	6,25	2	1	84	4,72
	3.gün	6,25	2	1	84
3,75		2	2	126	8,48
1,25		2	1,5	454	7,71
3,75		3	1	127	4,29
6,25		3	1,5	86	7,23
3,75		1	1,5	129	6,52
1,25		1	1	449	5,12
6,25		1	2	83	9,30

$$a) Eş. (3)'den; EC_{makine} = [(0,42 \times 60) + (1,091 \times 452)] / 3600 = 0,144 \text{ kWh} \quad (10)$$

$$Eş.(2)'den; CE_{elek} = 0,4916 \times 0,144 = 0,07 \text{ kgCO}_2 \quad (11)$$

$$b) Eş(5)'den; CEF_{takım} = 0,4916 \times (1,5/3,6) \times (1000/9,5) = 21,56 \text{ kgCO}_2/\text{kg} \quad (12)$$

$$Eş(4)'den; CE_{takım} = (452/100 \times 60) \times 21,56 \times (15/1000) = 0,0244 \text{ kgCO}_2 \quad (13)$$

$$c) Eş.(7)'den; M_{talaş} = (1,25 \times 0,2 \times 2 \times 452 \times 2,73) / 1000 = 0,617 \text{ kg} \quad (14)$$

$$Eş.(6)'dan; CE_{motor} = 16,13 \times 0,617 = 9,95 \text{ kgCO}_2 \quad (15)$$

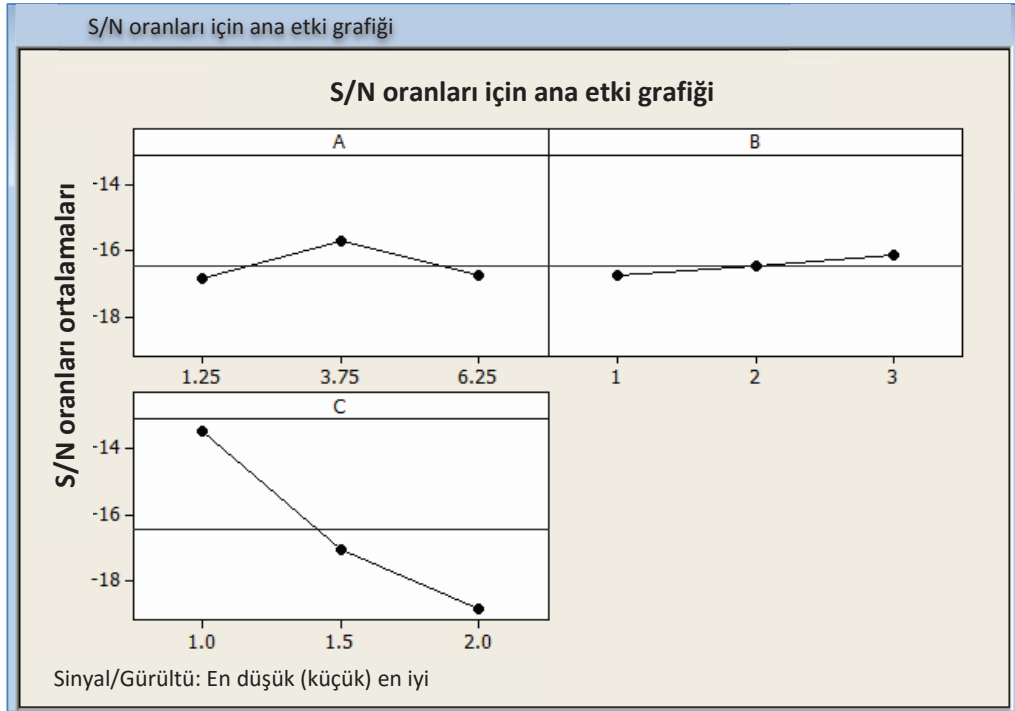
$$d) Eş.(9)'dan; CE_{talaş} = 0,256 \times 0,617 = 0,158 \text{ kgCO}_2 \quad (16)$$

Toplam karbon emisyonu ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$CE_{ms} = CE_{elek} + CE_{takım} + CE_{motor} + CE_{talaş} = 0,07 + 0,0244 + 9,95 + 0,158 = 10,20 \text{ kgCO}_2 \quad (17)$$

Yapılan deneylerde ölçülen süreler doğrultusunda yukarıdaki örnek hesaplamada olduğu gibi tüm süreler ve kesme parametreleri senaryoları için karbon emisyonu değerleri hesaplanmıştır. (Tablo 4, son sütun). Ardından elde edilen emisyon değerleri Taguchi yönteminde yanıt olarak

kullanılarak karbon emisyonu değerlerini en aza indirecek kesme parametreleri elde edilmiştir (Tablo 5). Bu sonuca göre en düşük karbon salınımı (emisyonu) için en iyi faktör seviyeleri A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub> olarak belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. S/N oranları için ana etkiler

Tablo 5. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	A	B	C
1	-16.88	-16.76	<b>-13.43</b>
2	<b>-15.72</b>	-16.46	-17.06
3	-16.76	<b>-16.13</b>	-18.86
Sıra	2	3	1

Taguchi yönteminde Sinyal/Gürültü oranı (S/N:Signal/Noise ratio) olarak bilinen ve deneyde elde edilen yanıtta beklentiye göre 3 farklı amaca (“en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi”) uygun fonksiyon bulunmaktadır. Karbon emisyonu “en küçük en iyi” tipte bir yanıt olduğu için Taguchi’nin tanımladığı “en küçük en iyi” tip S/N oranı kullanılmış ve 3 tekrar sonucu elde edilen CO<sub>2</sub> emisyon değerleri Eş.(18) kullanılarak deney sonuçları tek bir değere dönüştürülmüştür.

En düşük (küçük) en iyi için S/N oranı:

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (18)$$

Eşitlikte  $y_i$  : Karbon emisyonu yanıtının  $i$ . gözlem değeri,  $n$ : bir denemedeki test sayısını ifade etmektedir.

S/N oranları baz alındığında %95 güven düzeyinde A, B ve C faktörlerinden sadece C faktörünün (Kesme Derinliği) sonuçlar üzerinde etkili

faktör olduğu ( $p=0,010<0,05$ ) görülmektedir (Tablo 6-7). Ayrıca elde edilen model için elde edilen R<sup>2</sup> değerinin %96,1 olarak elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç modelin geçerli olduğunu göstermektedir.

Tablo 6.S/N oranları için tahmini model katsayıları

Terim	Katsayı	SE Katsayı	T	P
Sabit	-16,4518	0,1626	-101,163	0,000
A 1,25	-0,4233	0,2300	-1,841	0,207
A 3,75	0,7321	0,2300	3,183	0,086
B 1	-0,3120	0,2300	-1,357	0,308
B 2	-0,0089	0,2300	-0,039	0,973
C 1,0	3,0181	0,2300	13,123	0,006
C 1,5	-0,6115	0,2300	-2,659	0,117

$$S = 0,4879 \quad R\text{-Sq} = 99,0\% \quad R\text{-Sq(ajd)} = 96,1\%$$

Tablo 7. S/N oranları için varyans analizi

Faktör	SD*	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	2	2,4315	2,4315	1,2157	5,11	0,164
B	2	0,6012	0,6012	0,3006	1,26	0,442
C	2	45,8238	45,8238	22,9119	96,26	0,010
Artık Hata	2	0,4760	0,4760	0,2380		
Toplam	8	49,3325				

\*SD:Serbestlik Derecesi

## 5. SONUÇLAR

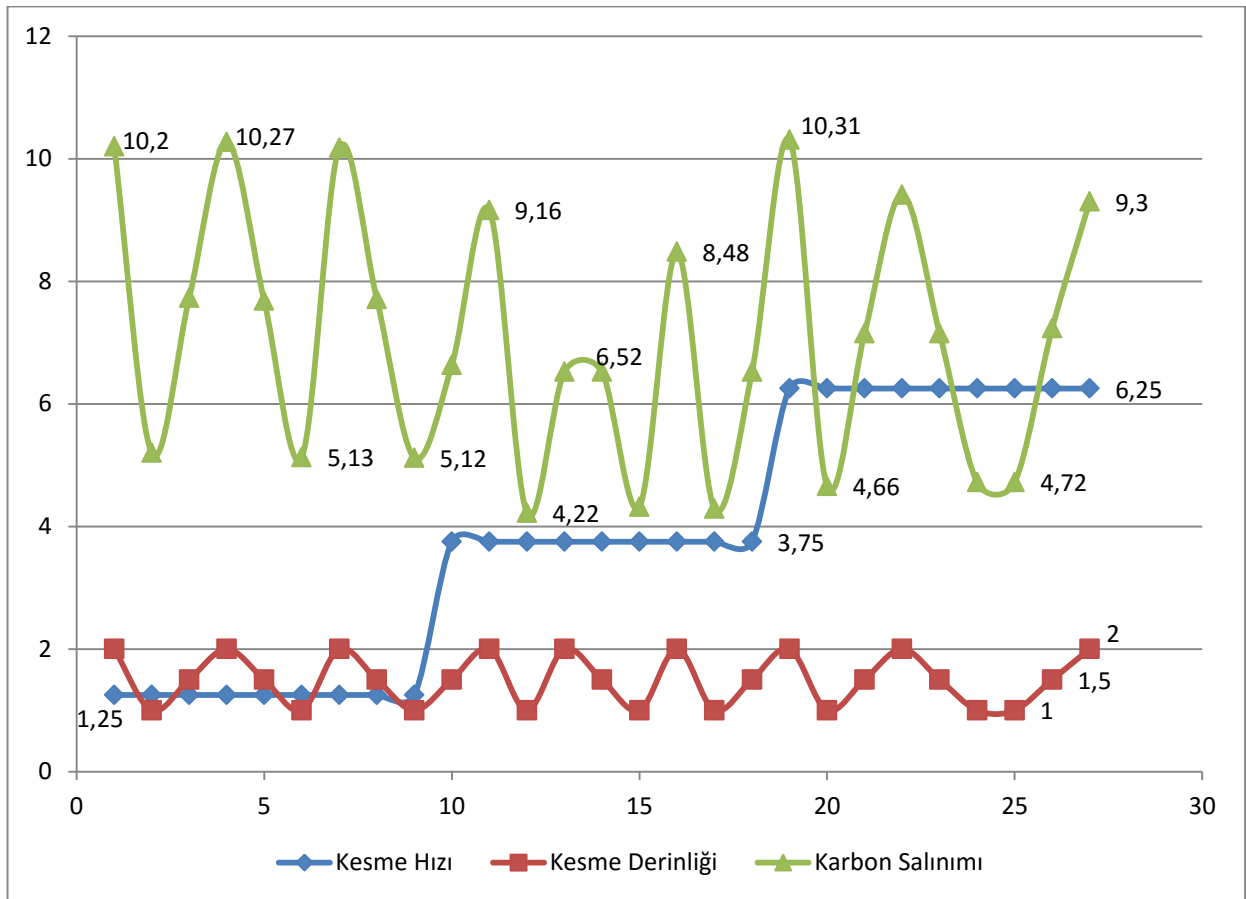
Bu çalışma kapsamında talaşlı imalatta CO<sub>2</sub> salınımının nasıl azaltılabileceği yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki talaşlı imalatla ilgili CO<sub>2</sub> salınımına ilişkin formülasyonlar ve hesaplama

yöntemleri derlenerek Türkiye şartlarına göre uyarlanmış (Türkiye Enerji Verimliliği değerleri kullanılarak) ve ilgili formülasyonlar yeniden düzenlenmiştir. Ardından Taguchi yöntemi kullanılarak tornalama işlemindeki temel kesme parametrelerinin karbon salınımını en küçükleyen en iyi değerleri elde edilmiştir. Bu sonuca göre 3,75 m/sn kesme hızında KNUX160405 R117010-titanyum kaplamalı tungsten carbide alaşımı kesici takım kullanılarak ve 1 mm'lik kesme derinliğinde en az karbon emisyonu değerinin elde edildiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara ilişkin olarak Kesme Hızı- Kesme Derinliği-Karbon Salınımı grafiği çizildiğinde kesme hızının her yüksek değerinde karbon salınımının düşmediği, kesme hızı için en iyi bir değer olması gerektiği gözlenmektedir. Kesme hızı arttığında kesici takımın ömrü olumsuz yönde

etkilenmektedir. Diğer bir deyişle, işleme verimliliğini sağlamak için kesme hızının artırılması, her zaman düşük karbon emisyonlarının elde edilmesini sağlamamaktadır. Hem kesici takım, hem işleme verimliliği ve hem de karbon emisyonunun en iyi değeri en iyi kesme hızıyla sağlanabilmektedir. Bu değerlendirme literatürdeki çalışmalarda da vurgulanmakta ancak bu çalışmalarda en iyi hız değerine ilişkin nicel bir değer verilmemektedir. Bu çalışmamızda literatürdeki çalışmalardan farklı olarak hem kesme hızı, hem de kesme derinliği değerine ilişkin nicel değerler de sunulabilmektedir.

Tornalama işlemi için daha sert kesici takım kullanılarak, daha düşük kesme derinliği değerinde ve orta değerlerdeki kesme hızında daha az karbon salınımı elde edilebildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar alüminyum malzeme için gerçekleştirilmiş olup, çelik, dökme demir, bronz, pirinç gibi farklı iş parçası malzemeleri için ve farklı kesici takımlarla ilerleyen dönemlerde benzer çalışmalar gerçekleştirilebilir.



Şekil 6. İş mili hızı artışı ile karbon salınımı değişimi



## Semboller ve Kısaltmalar:

$CE_{ms}$	: Tornalama İşleminde tezgah bazlı karbon salınımı
$CE_{elek}$	: İşlemleri için gerekli elektrik üretiminin yol açtığı karbon salınımı
$CEF_{elek}$	: Elektrik karbon salınımı faktörü
$EC_{makine}$	: Tezgahın enerji tüketimi (kWh)
$t_c$	: Kesme süresi (sn)
$t_{boşta}$	: Atıl süre (sn)
$P_u$	: Atıl güç (W)
$P_i$	: Giriş gücü (W)
$CE_{takım}$	: Kesici takımın yol açtığı karbon salınımı
$K$	: Kesici takım enerji tüketim sabiti
$W_{takım}$	: Takımın kütlesi (g)
$T_{takım}$	: Takımın kullanım ömrü (dk)
$CE_{motor}$	: Hammadde üretiminin yol açtığı karbon salınımı
$M_{talaş}$	: Talaş kütlesi (kg)
$\rho$	: Malzeme yoğunluğu ( $\frac{g}{cm^3}$ )
$CEF_m$	: Malzeme karbon salınım faktörü ( $\frac{kgCO_2}{kg}$ )
$CEF_{talaş}$	: Talaşın karbon salınım faktörü
$K$	: Kesici takım başına enerji (MJ)
$v_c$	: Kesme hızı ( $\frac{m}{sn}$ )
$f$	: ilerleme hızı ( $\frac{mm}{devir}$ )
$a_p$	: Kesme derinliği (mm)
$dk$	: Dakika
$sn$	: Saniye
$mm$	: Milimetre
$m$	: Metre

## DEVELOPMENT OF A MODEL TO MINIMIZE CARBON EMISSIONS OF TURNING PROCESS

Nowadays, much researcher has been focused on manufacturing processes that largely consume energy and emit carbon to the atmosphere. Low-carbon manufacturing, aiming to reduce carbon emission, is a hot topic in the literature. This paper presents an integrated model of quantifying carbon emissions of a conventional turning process. This paper investigates the breakdown of the turning machine tool sub-systems that contribute to the overall carbon emissions of a turning process, such as cutting tools, electricity, work-piece and cutting tool material specifications and chip disposal, etc. The model of quantifying the amount of carbon emissions from individual sub-systems is then developed. The proposed model is applied into a turning process case, in which the impact of different cutting factors on carbon emissions in the conventional turning machine tool is analyzed.

**Keywords:** Carbon emissions, machining, turning process, Taguchi Methods, energy consumption.

## KAYNAKÇA

1. Li, C., Tang, Y., Cui, L., Li, P., A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems, *Int. J. Of Advanced Manufacturing Tech.*, 26 (2015), 911–922.
2. Herrmann, C., Thiede, S., Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1 (2009) 4, 221–229.
3. Tian, G. D., Liu, Y. M., Ke, H., Chu, J. W., Energy evaluation method and its optimization models for process planning with stochastic characteristics: A case study in disassembly decision making, *Computers and Industrial Engineering*, 9(2012) 2, 107–112.
4. Rahimifard, S., Seow, Y., Childs, T., Minimizing embodied product energy to support energy efficient manufacturing, *Manufacturing Technology*, 59(2010) 1, 25–28.
5. Gutowski, T. G., The carbon and energy intensity of manufacturing, *Proceedings of the 40th CIRP international manufacturing systems*, 2007.
6. Neugebauer, R., Wertheim, R., Harzbecker, C., Energy and resources efficiency in the metal cutting industry, *Proceedings of the 8th global conference on sustainable manufacturing*, 36, 247–257, 2011.
7. Diaz, N., Redelsheimer, E., Dornfeld, D., Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use, *Proceedings of 18th CIRP international conference on lifecycle engineering*, 263–267, 2011.
8. Jia, S., Tang, R. Z., Lv, J., Therblig-based energy demand modeling methodology of machining process to support intelligent manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25 (2014) 5, 913-931.
9. Krishnan, N., Raoux, S., Dornfeld, D., Quantifying the environmental foot print of semiconductor equipment using the environmental value systems analysis (EnV-S), *IEEE transactions on Semiconductor Manufacturing*, 17( 2004) 4, 554–561.
10. Jeswiet, J., Kara, S., Carbon emissions and CES in manufacturing, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57 (2008) 1, 17–20, 2008.

11. Tridech, S., Cheng, K., Low carbon manufacturing: Characterisation, theoretical models and implementation, *International Journal of Manufacturing Research*, 6 (2008) 2, 110–121.
12. Diaz, N., Choi, S., Helu, M., Chen, Y. F., Jayanathan, S., Yasui, Y., Kong, D., Pavanaskar, S., Dornfeld, D., Machine tool design and operation strategies for green manufacturing, *Proceedings of 4th CIRP international conference on high performance cutting*, 1–6, 2010.
13. Song, J. S., Lee, K. M., Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions, *Resources Conservation and Recycling*, 54 (2010) 9, 547–556.
14. Rajemi, M. F., Mativenga, P. T., Aramcharoen, A., Sustainable machining: Selection of optimum turning conditions based on minimum energy considerations, *Journal of Cleaner Production*, 18 (2010) 10–11, 1059–1065.
15. Le, T. P. N., Lee, T. R., Model selection with considering the CO<sub>2</sub> emission along the global supply chain, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24 (2013) 4, 653–672.
16. Halevi, Y., Carpanzano, E., Montalbano, G., Koren, Y., Minimum energy control of redundant actuation machine tools, *Manufacturing Technology*, 60 (2011) 1, 433–436.
17. Chen, Q. X., Kang, C. Q., Xia, Q., Guan, D. B., Preliminary exploration of China's power sector, *Energy*, 36 (2011) 3, 1500–1512.
18. Fang, K., Uhana, N., Zhao, F., Sutherland, J. W., A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction, *Journal of Manufacturing Systems*, 30(2011) 4, 234–240.
19. Dufloy, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., et al., Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach, *Manufacturing Technology*, 61(2012) 2, 587–609.
20. Canadell, J. G., Quèrè, C. L., & Raupach, M. R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R. A., Marland, G., Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 104(47), 18866–18870, 2007.
21. İç, Y.T., Yıldırım, S., Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Birlikte TAGUCHI Yöntemini Kullanarak Bir Ürünün Tasarımının Geliştirilmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27(2012) 2, 447-458.
22. Tong, L.I., Chen, C.C., Wang, C.H., Optimization of multi-response processes using the VIKOR method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(2007), 1049–1057.
23. Lan, T-S., Taguchi optimization of multi objective CNC machining using TOPSIS, *Information Technology Journal*, 8(2009) 6, 917-922.