



Empirical modelling of cutting forces by using build-up factor and cutting parameters in turning operation

Bahattin Yılmaz*^{ID}, Abdulkadir Güllü^{ID}

Department of Manufacturing Engineering, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

Highlights:

- Modeling of cutting forces by curve fitting method
- Effects of cutting parameters on built-up factor
- The relationship between cutting forces and built-up factor

Keywords:

- Cutting forces
- Mathematical model
- Cutting parameters
- Build-up factor
- AISI 1050

Article Info:

Research Article
Received: 08.03.2019
Accepted: 13.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.537386

Correspondence:

Author: Bahattin Yılmaz
e-mail:
bahattinyilmaz@gazi.edu.tr
phone: +90 312 202 8676

Graphical/Tabular Abstract

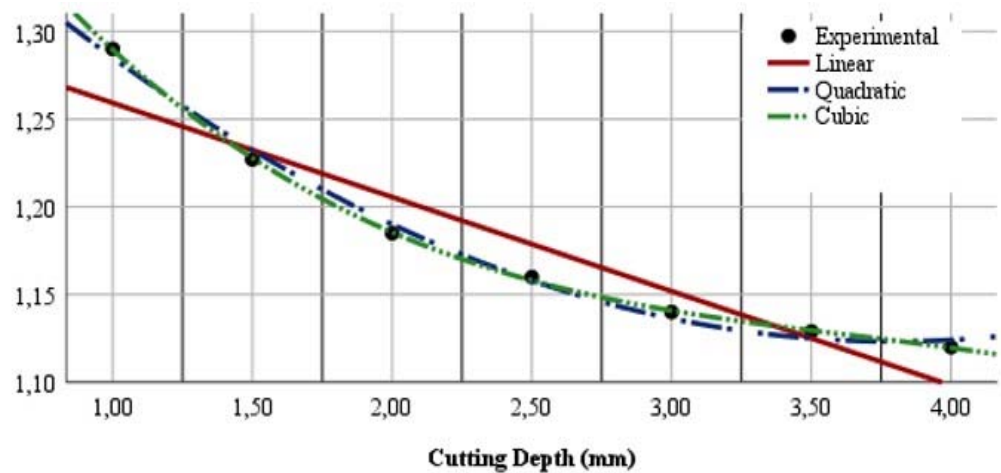


Figure A. Three different equation types used in curve fitting studies

Purpose: The purpose of this study is to determine the effects of cutting parameters cutting forces and built-up factor during turning operation and to model these effects by using three different equation types. It is aimed to model by establishing a relationship between cutting force and built-up factor with new concepts derived. It is aimed to develop a different approach apart from the cutting parameters in modeling of forces and built-up factor with the models created.

Theory and Methods:

In the scope of this research, statistical and experimental studies were used. As a result of turning tests performed by using different cutting parameters, the cutting forces were measured and the data were collected. These data were input values for different statistical analyzes and curve fitting studies. As a result of statistical studies, the modeling of cutting forces was carried out by using different equation types.

Results:

The most effective cutting parameters for cutting forces and built-up factor and the change of forces and built-up factor depending on these parameters were determined. Curve fitting studies were performed by using three different types of equations to model the cutting forces. Equations are derived by determining the correlation coefficient for the types of equations. New concepts based on cutting forces and built-up factors were developed and the forces were modeled on the built-up factor. Control experiments were performed to verify the accuracy of their models.

Conclusion:

It was determined that the most effective parameter on the cutting forces was the depth of cut and the feed rate, and the increase of these parameters increased the forces. It has been determined that the most effective parameters for the built-up factor are the depth of cut and the feed rate, increasing the built-up factor with increasing feed speed, and the increasing depth of cut decreases the built-up factor. The developed models showed acceptable results.



Tornalama operasyonunda yığılma faktörü ve kesme parametreleri kullanılarak kesme kuvvetlerinin ampirik modellenmesi

Bahattin Yılmaz*^{ORCID}, Abdulkadir Güllü^{ORCID}

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Eğri uydurma yöntemi ile kesme kuvvetlerinin modellenmesi
- Kesme parametrelerinin yığılma faktörü üzerindeki etkileri
- Kesme kuvvetleri ve yığılma faktörü arasındaki ilişki

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.03.2019

Kabul: 13.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.537386

Anahtar Kelimeler:

Kesme kuvvetleri,
matematiksel model,
kesme parametreleri,
yığılma Faktörü,
AISI 1050

ÖZET

Talaşlı imalat diğer üretim yöntemlerine göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Talaşlı imalat operasyonlarında proses verimliliğini belirleyen parametrelerin başında kesme kuvvetleri gelmektedir. Kesme kuvvetleri operasyon sırasında tüketilen enerjinin büyüklüğü hakkında bilgi verir. Belirli şartların sağlanmasıyla düşük kesme kuvvetlerinin oluşturulması maliyetleri düşürür. Bu ise, kesme parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Bu çalışmada; AISI 1050 çeliği kullanılarak üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinde deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda, kesme kuvvetleri için en etkili kesme parametreleri belirlenmiştir. Yığılma faktörü incelenerek yeni kavramlar tanımlanmıştır. Tanımlanan bu kavramlar ve işleme parametreleri ile kesme kuvvetleri arasındaki ilişki, oluşturulan matematiksel modellerle ifade edilmiştir. Bu çalışma ile geliştirilen matematiksel modeller sayesinde kuvvet oluşumu parametreler üzerinden açıklanmış, ideal kuvvet değerleri için uygun işleme parametrelerinin daha kolay belirlenmesi sağlanmıştır.

Empirical modelling of cutting forces by using build-up factor and cutting parameters in turning operation

H I G H L I G H T S

- Modeling of cutting forces by curve fitting method
- Effects of cutting parameters on built-up factor
- The relationship between cutting forces and built-up factor

Article Info

Research Article

Received: 08.03.2019

Accepted: 13.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.537386

Keywords:

Cutting forces,
mathematical model,
cutting parameters,
build-up factor,
AISI 1050

ABSTRACT

Metal cutting is widely used than other production methods. Cutting forces are the leading parameters that determine process efficiency in machining operations. Cutting forces inform us about the magnitude of energy consumption during the operation. By providing certain conditions, the creation of low cutting forces reduces the costs. This is due to the accurate determination of the cutting parameters. In this study, the experiments were performed with three different cutting speeds, three different feed rates and three different cutting depths by using of AISI 1050. As a result of the experiments, the most effective cutting parameters were determined in order to keep under control of cutting forces values and get the best results. New concepts are defined by analyzing the build-up factor. These defined concepts and the relationship between machining parameters and cutting forces are expressed by mathematical models. Thanks to the mathematical models developed with this study, the force formation is explained through parameters and the appropriate processing parameters are provided for the ideal force values.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: bahattinyilmaz@gazi.edu.tr, agullu@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 202 8676

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat operasyonlarından yüksek verimin alınabilmesi; iş parçasının özelliklerinin iyi bilinmesi ve diğer girdi parametrelerinin iyi seçilmesi ile mümkündür. İş parçası ve diğer girdi etkileşimleri “İşlenebilirlik” başlığı altında değerlendirilebilir. İşlenebilirlik, bir malzemenin uygun kesici ile ve doğru kesme koşullarında işlenmesinin göreceli kolaylığını gösterir. İşlenebilirliği değerlendirmek için kullanılan kriterlerden biri de kesme kuvvetleridir [1]. Talaş kaldırma işleminin temelini yüksek gerinme hızları ve biçimlendirme sırasında sıcaklık oluşumuna sebep olan plastik deformasyon oluşturur [2]. Kesme düzleminde gerçekleşen plastik deformasyon kesme kuvvetlerini ve harcanan gücü etkilediği gibi talaş geometrisini de önemli ölçüde etkilemektedir. Plastik deformasyonun bir sonucu olarak çıkan toplam talaş boyu (w') teorik kesme uzunluğundan (w) daha kısa olmaktadır. Bu durum, talaş akış hızının kesme hızından daha küçük olmasına neden olmaktadır [3]. Söz konusu boyutsal farklılık deforme olmuş talaş kalınlığının kesme derinliğinden daha büyük gerçekleşmesini sağlamaktadır. Talaş kalınlığı (a_2) ve kesme derinliği (a_1) oranı ile yığılma faktörü (λ) tanımlanmaktadır [4]. Yığılma faktörü; tanımı değişse de çeşitli kaynaklarda farklı isimler (talaş oranı, talaş kalınlık oranı, kesme oranı vb.) ile ifade edilmektedir [1, 3, 4]. Yığılma faktörü kesici takım ve iş parçası özellikleri ile yakından ilgilidir. Talaş yapısının konu alındığı çalışmalar içeriğinde yığılma faktörüne yer verilmiştir [5, 6]. Yığılma faktörü kavramı kayma düzlem çizgisi ve takım-talaş temas mesafesinin tahmini için geliştirilen analitik çalışmalarda da kullanılmıştır [7-10]. Yığılma faktörü (a_2/a_1) ve a_1/L oranı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu, a_1/L oranı arttıkça a_2 değerinin belirli bir seviyeye kadar azaldığı bildirilmiştir. Bu çalışma kapsamında takım-talaş mesafesi L ile sembolize edilmiştir [10-12]. Deformasyonun bir sonucu olarak açığa çıkan yığılma faktörü ile deformasyonu oluşturan kesme kuvvetleri arasında bir etkileşim vardır. Bu çalışmada bu etkileşimin ortaya konulması amaçlanmıştır.

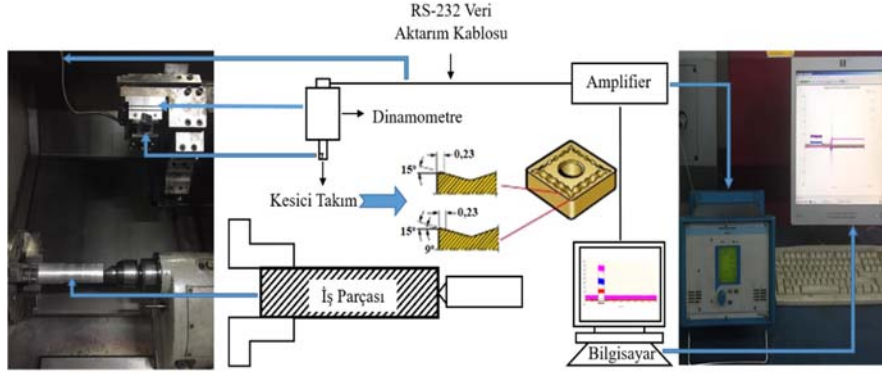
Talaş kaldırma işlemlerinde talaşı iş parçasından ayırmak için büyük bir güç gerekir. Talaş kaldırmak için harcanan bu güç ile kesme kuvvetleri arasında bir ilişki vardır [4]. Kesme sırasında oluşan kuvvetler, önemli maliyet kalemlerinden biri olan güç tüketimi hakkında ipuçları vermektedir. Kesme kuvvetleri güç gereksinimi yanında, ısı oluşumu, takım ömrü, işlenen yüzeyin kalitesi ve iş parçası boyutları üzerinde de önemli etkiye sahiptir [13]. Kesme kuvvetlerinin maliyetler açısından büyük önem taşıması, kuvvet oluşumunun modellenmesini gerekli kılmaktadır. Kesme kuvvetlerine birden çok parametre etki etmektedir. Kesme kuvvetleri; takım tezgâhı rijitliği, kesme parametreleri, kesici takım geometrisi, iş parçası malzemesi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişiklik gösterir [13]. Kesme kuvvetlerini etkileyen bu kadar çok değişkenin olması araştırmacıları kuvvet oluşumunun modellenmesi konusunda çalışmaya teşvik etmiştir [14]. Matematiksel model, elde edilen verileri kullanarak sistemin tamamını temsil amacıyla oluşturulan sabit katsayı ve değişken

parametre ilişkisini ifade eden sayısal bir yöntemdir. Deneysel verilere dayanarak geliştirilen model denenmeyen ya da önceden tespiti mümkün olmayan verilerin tespitini mümkün kılmaktadır. Eğri benzetme algoritmaları kısıtlı sayıda elde edilen verilerden yola çıkarak en uygun matematiksel modeli oluşturmada kullanılır [15]. Kesme kuvvetlerinin modellenmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan birinde; farklı kesici takımlar, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliklerinin kuvvetler üzerindeki etkisi X40CrMoV5-1 numuneler üzerinde tornalama yapılarak incelenmiştir. Kesme kuvvetlerinin modellenmesinde DEFORM 3D ve varyans analiz kullanılmıştır. Deneysel sonuçta kuvvetler için en etkili parametreler belirlenmiştir [16]. AISI 1050 malzeme kullanılarak yapılan çalışmada ise kesme kuvvetlerinin değişimi kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve talaş kırıcı geometrisine göre değerlendirilmiştir. Regresyon analizi yardımıyla geliştirilen model ile deneysel sonuçların uyumlu bir dağılım sergilediği görülmüştür [2]. Kesme kuvvetlerinin modellenmesini hedefleyen bir diğer çalışmada kaplamalı- kaplamsız takımlar ve farklı kesme parametreleri kullanılmıştır. Kuvvet oluşumu için en etkili değişkenler ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesici takım cinsi olarak belirtilmiştir [17]. Alüminyum malzemenin tornalanması ile gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise kesme parametrelerinin ve iş parçası özelliklerinin kuvvet ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkileri incelenmiştir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki matematiksel model ile ifade edilmiş ve operasyon verimliliği artırılmıştır [18]. Bu çalışmada farklı kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Eğri benzetim algoritmaları ile kesme kuvvetlerinin önceden tahminini mümkün kılan matematiksel modellerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında imalat sektöründe önemli bir yeri olan orta karbonlu çelik AISI 1050 kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, modeller üzerinden hesaplanan değerler ve elde edilen ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuçların doğruluğu için kontrol deneyleri yapılmış bu deneyler üzerinden de hesaplanan ve ölçülen değerler kıyaslanmıştır.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Kullanılan Tezgâh ve Cihazlar (Machine Tools and Devices)

Deneysel çalışmalar kapsamında kesme kuvvetlerinin ölçümü “KISTLER 9257A” tipi piezoelektrik dinamometre ile gerçekleştirilmiştir. KISTLER Type 5019 Amplifier ile elde edilen veriler bilgisayara aktarılmış ve Dyno Ware programı ile zaman-kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde Johnford TC35 marka sanayi tipi CNC torna tezgâhı kullanılmıştır. Kullanılan tezgâhın gücü 10 kW, en yüksek devir sayısı ise 3600 rev/min dir. Deneylerde, Sandvik firması tarafından üretilen SNMG 120408-QM kodlu kesici takım kullanılmıştır. Yığılma faktörünün belirlenmesi sırasında talaş kalınlıkları 0,01 mm hassasiyetindeki dijital kumpas ile ölçülmüştür. Şekil 1’de deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

Tablo 1. AISI 1050 Malzemenin kimyasal karakterizasyon (Chemical characterization of AISI 1050 material)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Fe
0,43	0,21	0,73	0,019	0,039	0,0077	0,007	0,009	0,011	0,005	0,297	98,06

2.2. İş Parçası Malzeme Özellikleri (Workpiece Material Properties)

Deneysel çalışmada endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılan AISI 1050 çeliği kullanılmıştır. İş parçası ham ölçüleri Ø100x400 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler belirlenen parametre kombinasyonları ile sabit 15 mm kesme uzunluğunda gerçekleştirilmiş, oluşan ve ölçülen kuvvet değerleri kaydedilmiştir. İş parçasının kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

2.3. Kesme Parametreleri (Cutting Parameters)

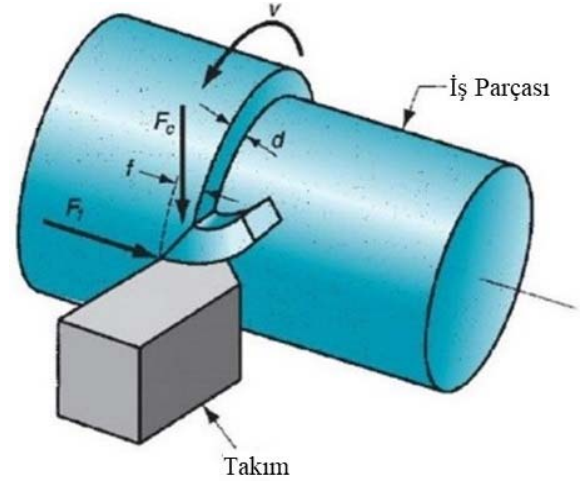
Değişen kesme parametrelerine bağlı olarak “Kesme kuvvetlerinin” değişimini ortaya koyabilmek için üç farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği kullanılmıştır. Tüm deneysel parametreler literatür ve kesici takım katalogları baz alınarak belirlenmiştir. Belirli oranlarda artırılan kesme parametrelerine karşılık oluşan kuvvet değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üç değişken parametrenin her biri için üç seviye belirlenerek Taguchi L9 deney tasarım modeline uygun bir deney sistemi kurulmuş ve Tablo 2’de sunulmuştur. Yapılan istatistiksel analizler ile kuvvetler açısından en etkili parametreler Minitab programı ile belirlenmiştir. En etkili değişkenlere dört seviye daha eklenerek yapılan deneyler ile eğri benzetme operasyonları ise SPSS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi (The Investigation of Cutting Forces)

Bu çalışmada güç sarfıyatı açısından büyük öneme sahip olan kesme kuvvetleri için en önemli kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Etkili parametreler kullanılarak kuvvetlerin önceden tahminine imkân sunan matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kesme kuvvetleri, esas kesme

kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal (pasif) kuvvetin (F_r) bileşikleri alınarak tek bir kuvvet (F_k) olarak ifade edilmiştir. Kesme kuvvetlerinin oluşumu Şekil 2’de sunulmuştur. Bileşke kuvvetin (F_k) hesaplanmasında Eş. 1 kullanılmıştır [19].

Şekil 2. Bileşke kesme kuvveti (F_k) şematik gösterimi (The schematic illustration of the resultant cutting force (F_k)) [1]

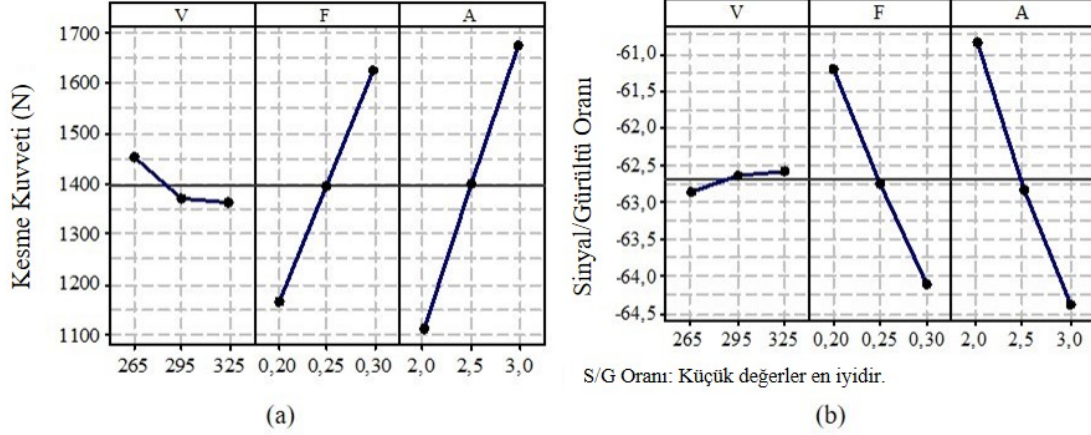
$$F_k = \sqrt{(F_c^2 + F_f^2 + F_r^2)} \quad (1)$$

Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen veriler ve uygulanan istatistiksel analizler sonucunda Şekil 3a ve Şekil 3b grafikleri çizilmiştir.

Şekil 3a değerlendirildiğinde kesme kuvvetleri için en etkili parametrenin ilerleme hızı ve kesme derinliği olduğu belirlenmiştir [20]. Kesme hızının bu iki parametreye göre etkisinin çok düşük olduğu grafikte görülmektedir. Kesme kuvvetleri üzerinde %58 oran ile en etkili parametre kesme derinliği olmuş, %39 ‘luk bir oran ile ilerleme hızı ikinci

Tablo 2. Deneysel parametreleri (Experiment parameters)

Deneysel No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kesme Hızı (V)	265	265	265	295	295	295	325	325	325
İlerleme Hızı (F)	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25	0,30
Kesme Derinliği (A)	2,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,0	3,0	2,0	2,5

**Şekil 3.** Kesme kuvveti değerleri için ortalama etki (a) ve sinyal/gürültü (b) grafikleri (Mean effect (a) and signal/noise (b) graphs for cutting force values)

etkili parametre olarak belirlenmiştir. Kesme hızının etkisi ise %1 gibi çok küçük bir değere sahiptir [21]. Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan malzeme ve kesme koşulları göz önüne alınarak en düşük kesme kuvvetleri için en ideal kesme parametrelerinin kesme hızı 325 m/min, ilerleme hızı 0,20 mm/rev ve kesme derinliği 2,0 mm olduğu Şekil 3b ile belirlenmiştir. İdeal kesme koşulları ve etkili parametrelerin uyum içinde olduğu görülmüştür.

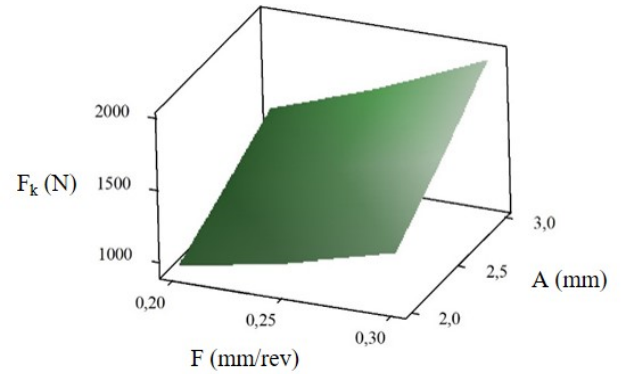
$$F_k = -732,094 - 1,4665V + 4617,7F_i + 562,37A \quad (2)$$

Yapılan regresyon analizi sonucunda Eş.2 geliştirilmiştir. Geliştirilen bu matematiksel modelin verileri ifade etmekteki temsil oranı $R^2=0,9935$ olarak hesaplanmıştır. Denklemi oluşturan değişkenlerin katsayıları değerlendirildiğinde en etkili parametreler olan ilerleme hızı ve kesme derinliğinin katsayılarının çok yüksek olduğu görülmektedir.

F_k Artan kesme derinliği ve ilerleme hızı ile kesme kuvvetlerinin arttığı Şekil 4'de sunulan üç boyutlu grafikte açık bir şekilde görülmektedir. Artan ilerleme hızı ve kesme derinliği talaş kesit alanını artıracığından kesme kuvvetleri de artacaktır [21, 23]. Artan kesme hızları ile kesme kuvvetlerinin ise nispeten düştüğü veriler incelendiğinde görülmektedir [24]. Bu durum ise artan kesme hızı ile kesme bölgesinde artan sıcaklığa ve kolay deformasyona bağlanmıştır [25, 26].

Kesme kuvvetlerinin oluşumunda en etkili parametreler olan kesme derinliği ve ilerleme hızının etkilerini tam anlamıyla ortaya koyabilmek ve matematiksel olarak modelleyebilmek için her iki parametre de, ilave dört seviye ile deneylere tabi tutulmuştur. Kesme derinliğinin kesme kuvvetlerinin

oluşumunda etkisinin belirlenebilmesi için 325 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme hızı parametreleri eşliğinde 7 farklı kesme derinliği (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 ve 4,0 mm) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre kesme derinliğine bağlı kesme kuvveti değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğriler Şekil 5'de ifade edilmiştir.

**Şekil 4.** Kesme kuvvetinin kesme parametrelerine göre değişimi (The cutting force changes according to the cutting parameters)

Deney sonuçları; artan kesme derinliği ile kesme kuvvetlerinin de arttığını ortaya koymuştur. Bu eğilimi genelleştirebilmek ve matematiksel olarak ifade edebilmek için eğri benzetme çalışmaları yapılmıştır. Eğriyi en iyi şekilde ifade eden üç farklı (Lineer, kuadratik ve kübik) denklem elde edilmiştir. Kesme kuvvetleri üzerindeki kesme derinliğinin etkisini hesaplamak için üç farklı denklem tipi kullanılmıştır. Tablo 3'de üç denklem tipi içinde türetilen

denklemlere ait katsayılar sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda üç denklem tipinin de deneysel sonuçları ifade etme konusunda çok başarılı olduğu, hesaplanan sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasındaki ilişkinin çok güçlü olduğu $R^2 = 1$ görülmüştür.

Tablo 3’de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$F_k = 430,827A + 85,220 \quad (3)$$

Kuadratik Denklem:

$$F_k = -4,203A^2 + 451,843A + 63,153 \quad (4)$$

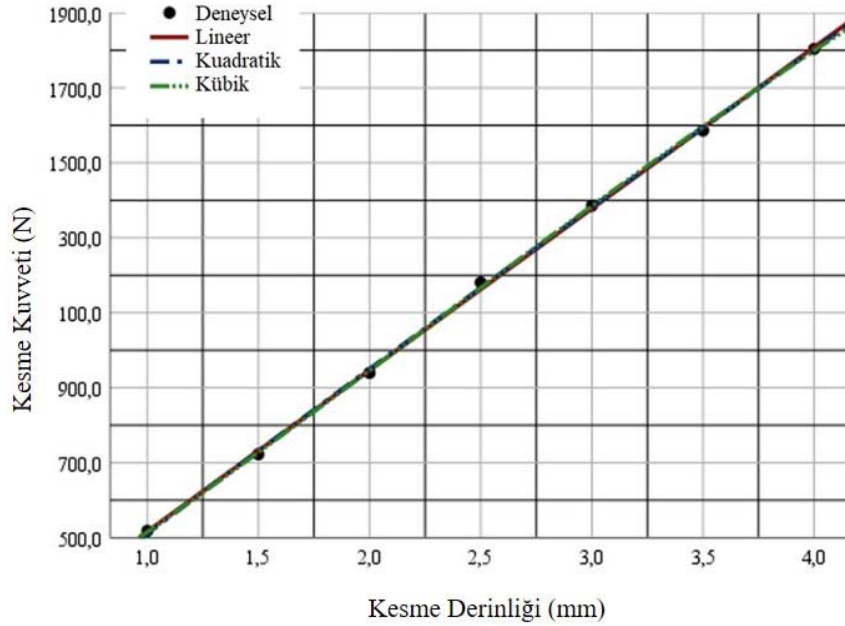
Kübik Denklem:

$$F_k = -5,177A^3 + 34,627A^2 + 363,828A + 121,398 \quad (5)$$

olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve ölçülen kuvvet değerleri Tablo 4’de kıyaslanmıştır.

Kontrol deneyleri için sabit şartlarda 3,3 ve 2,3 mm kesme derinlikleri kullanılmıştır. Bu değerler eşliğinde kuvvetler sırası ile 1501,53 ve 1089,25 N olarak ölçülmüştür. Farklı denklem değerleri ve hesaplanan kesme kuvvetleri ile ölçülen kuvvet değerleri arasında %1 den daha düşük bir fark mevcuttur. Bu durum geliştirilen modellerin başarılı bir şekilde kuvvet oluşumunu ifade ettiğini göstermektedir. İlerleme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini görebilmek için 325 m/min kesme hızı ve 2 mm kesme derinliği değerleri ile 7 farklı ilerleme hızı (0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 ve 0,40 mm/rev) kullanılarak deneyler yapılmıştır. Şekil 6’ da ilerleme hızı ile kuvvet değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğriler sunulmuştur.

Deneysel bulgular artan ilerleme ile kuvvetlerin de arttığını ortaya koymuştur. İlerleme hızı ve kesme kuvvetleri



Şekil 5. Kesme derinliğine bağlı kesme kuvveti değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğriler
(Curves of developed equation types and the change of cutting force related to the depth of cut)

Tablo 3. Kesme derinliği-Kesme kuvveti ilişkisi için geliştirilen denklem tiplerine ait denklem parametreleri
(Equation parameters of equation types developed for cutting depth-shear force relationship)

Denklem Tipi	Regresyon İlişkisi R^2	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	1,000	85,220	430,827	-	-
Kuadratik	1,000	63,153	451,843	-4,203	-
Kübik	1,000	121,398	363,828	34,627	-5,177

Tablo 4. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen kuvvet (N) değerleri
(Calculated and measured force (N) values as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Ölçülen Kuvvet Değeri
A: 3,3mm	1506,9491	1508,46423	1513,072581	1501,533454
A: 2,3mm	1076,1221	1080,15803	1078,390671	1089,249242

arasındaki ilişki için üç farklı matematiksel model geliştirilmiş ve Tablo 5’de denklem katsayıları verilmiştir.

Yapılan eğri benzetme çalışmaları sonucunda geliştirilen üç modelin de eğilimi başarılı bir şekilde ifade ettiği görülmüştür. Geliştirilen eğriler ve deneysel veriler arasındaki temsil ilişkisi her üç denklem sistemi için de $R^2=0,99$ un üzerindedir. Kübik denklem sistemi $R^2=0,999$ ile en yüksek temsil oranına sahiptir.

Tablo 5’de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$F_k = 3941,637F + 160,481 \quad (6)$$

Kuadratik Denklem:

$$F_k = 2397,520F^2 + 2742,877F + 286,351 \quad (7)$$

Kübik Denklem:

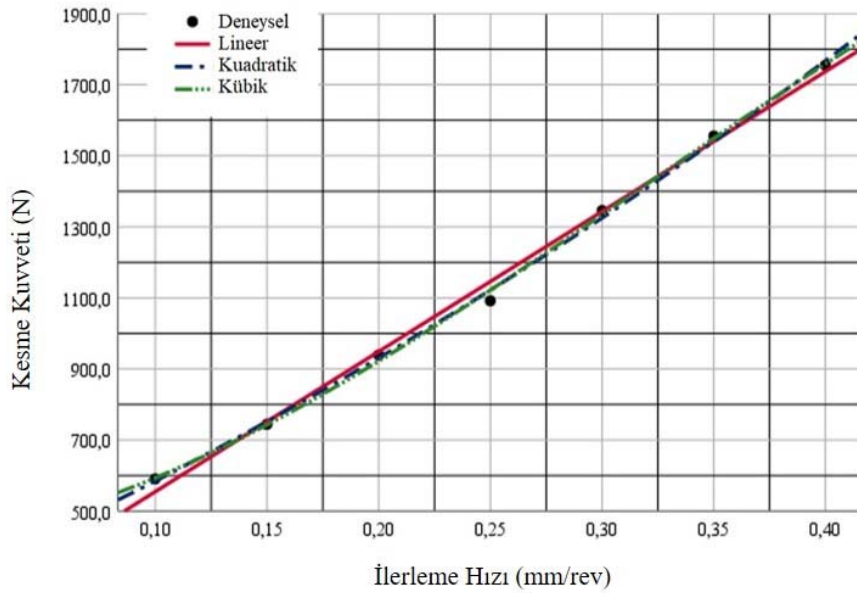
$$F_k = -11929,012F^3 + 11344,279F^2 + 714,945F + 420,553 \quad (8)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve ölçülen kuvvetler Tablo 6’da karşılaştırılmıştır.

Kontrol deneyleri için 0,125 ve 0,33 mm/rev ilerleme hızları kullanılmıştır. Bu değişkenler ile yapılan deneylerde sırası ile 674,68 ve 1459,69 N kuvvetler ölçülmüştür. Geliştirilen modeller burada da kabul edilebilir sonuçlar ortaya koymuştur.

3.2. Yığılma Faktörünün İncelenmesi (The Investigation of Build-up Factor)

Kesme operasyonu sırasında gerçekleşen plastik deformasyonun bir sonucu olarak yığılma faktörü kavramı



Şekil 6. İlerleme hızına bağlı kesme kuvveti değişimi ve geliştirilen denklem tiplerine ait eğrileri
(Curves of developed equation types and the change of cutting force related to the feed rate)

Tablo 5. İlerleme hızı-Kesme Kuvveti ilişkisi için geliştirilen denklem parametreleri
(Developed equation parameters for feed rate - cutting force relation)

Denklem Tipi	Regresyon ilişkisi R^2	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0,996	160,481	3941,637	-	-
Kuadratik	0,998	286,351	2742,877	2397,520	-
Kübik	0,999	420,553	714,945	11344,279	-11929,012

Tablo 6. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen kuvvet (N) değerleri
(Calculated and measured force (N) values as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Ölçülen Kuvvet Değeri
F: 0,125 mm/rev	653,185625	666,671875	663,8766328	674,6814597
F: 0,330 mm/rev	1461,22121	1452,590338	1463,183929	1459,687685

ortaya çıkmıştır. Yığılma faktörü; deforme olmuş talaş kalınlığı ile deforme olmamış talaş kalınlığının (kesme derinliğinin) oranı ile tanımlanmaktadır [3]. Yığılma faktörü için en etkili parametreler Şekil 7’de incelenmiştir.

Yapılan araştırmalar neticesinde yığılma faktörü için ilerleme hızı ve kesme derinliğinin en etkili iki parametre olduğu görülmüştür. Yığılma faktörü için en etkili parametre %53,5 ile kesme derinliği olurken ilerleme hızı %43,5 ile ikinci sırayı almıştır. Kesme hızı etkisinin bu iki parametreye nazaran çok çok düşük olduğu (%1) görülmüştür. Kesme hızındaki artış ile yığılma faktörü bir miktar azalmıştır. Kesme hızındaki artış ile ilerleme hızının yığılma faktörü üzerindeki etkisinin azaldığı bildirilmiştir [5]. Artan kesme hızı ile birlikte plastik deformasyon için gereken kuvvetin uygulama süresi de kısalmaktadır. Bu kısalmayın yığılma faktöründeki azalmayı da etkilediği düşünülmektedir.

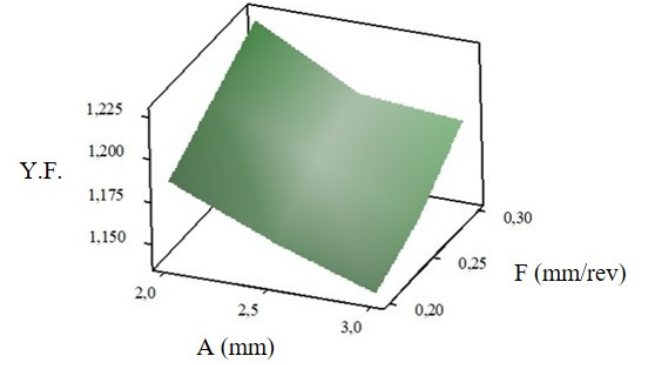
Kesme derinliği ve ilerleme hızı parametrelerinin yığılma faktörüne etkisi Şekil 8’de gösterilmiştir. Artan ilerleme hızı ile plastik deformasyon için uygulanan kuvvetin arttığı, bu durumun yığılma faktörünü de artırdığı görülmüştür. Yığılma faktörü artan kesme derinliği ile azalmaktadır [6]. Artan kesme derinliği ile deformasyona zorlanan alanın arttığı bu durumun daha yüksek deformasyon sertleşmesine neden olduğu ve sonuç olarak yığılma faktörünün artan kesme derinliği ile azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan regresyon analizi sonucunda Eş. 9 geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modelin verileri ifade etmedeki temsil oranı $R^2=0,977$ olarak hesaplanmıştır. Denklemi oluşturan değişkenlerin katsayıları değerlendirildiğinde en etkili parametreler olan ilerleme hızı ve kesme derinliğinin katsayılarının çok yüksek olduğu görülmektedir.

$$\lambda = 1,21602 - 8,14815e-005 V + 0,395556 F - 0,0438889 A \quad (9)$$

Değişen ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yığılma faktörü üzerindeki etkisini belirgin bir şekilde ortaya koyabilmek

için ilave dört parametre ile değişimler gözlemlenmiş ve Şekil 9 oluşturulmuştur.



Şekil 8. Yığılma faktörünün kesme parametrelerine göre değişimi
(The change of the build-up factor according to the cutting parameters)

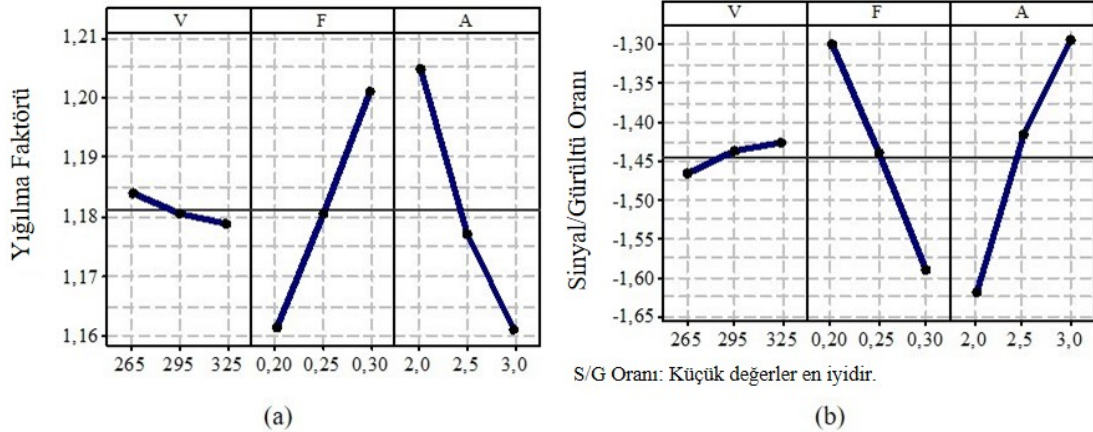
3.3. Yığılma Faktörü-Kesme Kuvveti İlişkisi (The Relationship Between Build-up Factor and Cutting Force)

Talaşlı imalatta ana kesme işlemi kayma düzleminde meydana gelmektedir. Kayma düzleminde gerçekleşen plastik deformasyon için harcanan enerji kesme kuvvetleri olarak ortaya çıkarken, plastik deformasyonun bir sonucu olarak da yığılma faktörü oluşmaktadır. Bu sebeple kesme kuvvetleri ile yığılma faktörü arasında bir ilişki kurulmuştur.

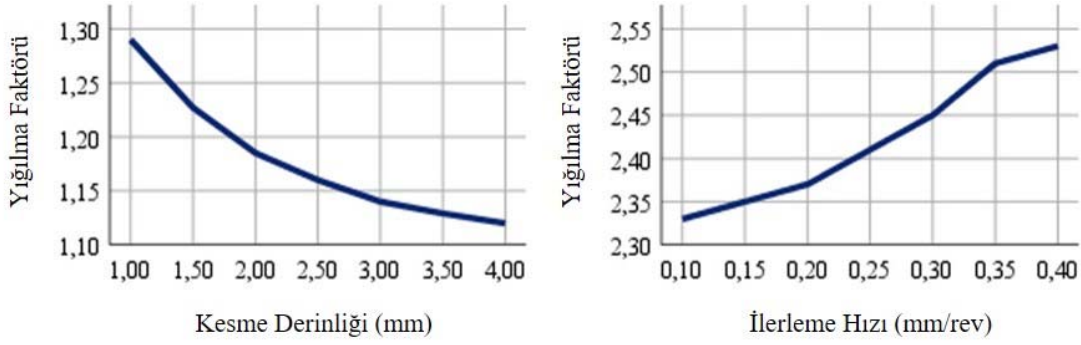
Yığılma faktörü kesme derinliği boyunca talaş kesitindeki şekil değişimini ifade etmektedir. Farklı kesme derinlikleri yığılma faktörünü önemli ölçüde değiştirdiği için birim kesitteki şekil değişimi “Birim Yığılma (BY)” kavramı ile tanımlanmıştır. Birim yığılma ifadesi tanımlanırken gerinim ($\epsilon = \Delta l / l$) kavramından hareket edilmiştir.

$$BY = \frac{\Delta a}{a_1} \quad (10)$$

$$\Delta a = a_2 - a_1$$



Şekil 7. Yığılma faktörü için ortalama etki (a) ve sinyal/gürültü (b) grafikleri
(Mean effect (a) and signal/noise (b) graphs for build-up factor)



Şekil 9. Artan ilerleme hızı ve kesme derinliğine göre değişen yığılma faktörü
(Build-up factor, depending on increasing feed rate and depth of cut)

Eş. 10'da a_2 deforme olmuş talaş kalınlığını, a_1 ise deforme olmamış talaş kalınlığını (kesme derinliğini) ifade etmektedir. BY yığılma faktörü (λ) cinsinden Eş. 11'de verildiği şekli ile tanımlanabilir.

$$BY = \lambda - 1 \quad (11)$$

Benzer bir yaklaşım ile birim alana düşen kuvvet "Birim Kesme Kuvveti (BKK)" olarak ifade edilmiştir. BKK ifadesi hesaplanırken ölçülen kuvvetler talaş kesit alanına bölünmüş ve böylece birim alana düşen kuvvet hesaplanmıştır. Talaş kesit alanı kesme derinliği ve ilerleme miktarının çarpımı ile bulunmuştur.

$$BKK = \frac{F}{f_i \times a_1} \quad (12)$$

Gerek kesme kuvvetleri gerekse yığılma faktörü için en kritik parametreler olan ilerleme hızı ve kesme derinliği dikkate alınarak BY ve BKK üzerinde yığılma faktörü ve kesme kuvvetleri arasında bir ilişki kurulmuştur. Tablo 7'de artan ilerleme hızına göre değişen BY ve BKK değerleri verilmiştir.

Tablo 7. Artan ilerleme hızına göre ölçülen BY ve BKK değerleri
(BY and BKK values measured according to increasing feed rate)

V	F	A	BY	BKK
325	0,10	2	0,164	2954,125
325	0,15	2	0,179	2480,912
325	0,20	2	0,188	2348,375
325	0,25	2	0,205	2183,638
325	0,30	2	0,219	2242,520
325	0,35	2	0,253	2221,729
325	0,40	2	0,261	2192,804

Artan ilerleme hızına bağlı olarak BY ve BKK ilişkisini açıklayabilmek için üç farklı denklem tipi (Lineer, Kuadratik ve Kübik) kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında Şekil 10 oluşturulmuştur. Yapılan eğri benzetme çalışmaları sonucunda Lineer denklem tipinin $R^2=0,642$ ile en düşük temsil oranına sahip olduğu ve söz konusu iki parametre

arasındaki ilişkiyi tanımlama konusunda başarısız kaldığı görülmüştür. Kübik denklem tiplerinin b3 katsayısı sıfır olarak belirlenmiştir. Bu durum Kuadratik ve Kübik denklem tiplerini aynı denklem yapmıştır. Aynı denklemi ifade eden her iki denklem tipinin de temsil oranı $R^2=0,932$ dir. Bu yüksek doğruluk oranı iki parametre arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde ortaya koymaktadır.

Artan ilerleme hızı ile kesme kuvvetlerinin ve yığılma faktörünün arttığı daha önceki bölümlerde belirtilmişti. Artan ilerleme hızı ile BY değerinin arttığı ve birim talaş kesitinde meydana gelen uzamanın arttığı görülmektedir. İlerleme hızı artışı ile BKK değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Artan ilerleme hızı ile birim alana düşen kuvvet değeri azalmış, bu durum birim alanda daha küçük kuvvetler ile daha büyük deformasyonlar olduğunu ortaya koymuştur. Artan kesme hızı ile kesme bölgesindeki sıcaklıkların arttığı, bununla birlikte artan ilerleme hızlarının da kesme bölgesindeki sıcaklıkları yükselttiği bilinmektedir. Ancak ilerleme hızı etkisi kesme hızı etkisi kadar güçlü değildir [1]. Artan ilerleme hızına bağlı olarak, artan sıcaklık değerlerinin, birim alana düşen daha küçük kuvvetler ile daha yüksek deformasyonlara yol açtığı düşünülmektedir. Artan ilerleme hızına bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem tipleri için katsayılar Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8'de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$BKK = -6093,530BY + 3678,542 \quad (13)$$

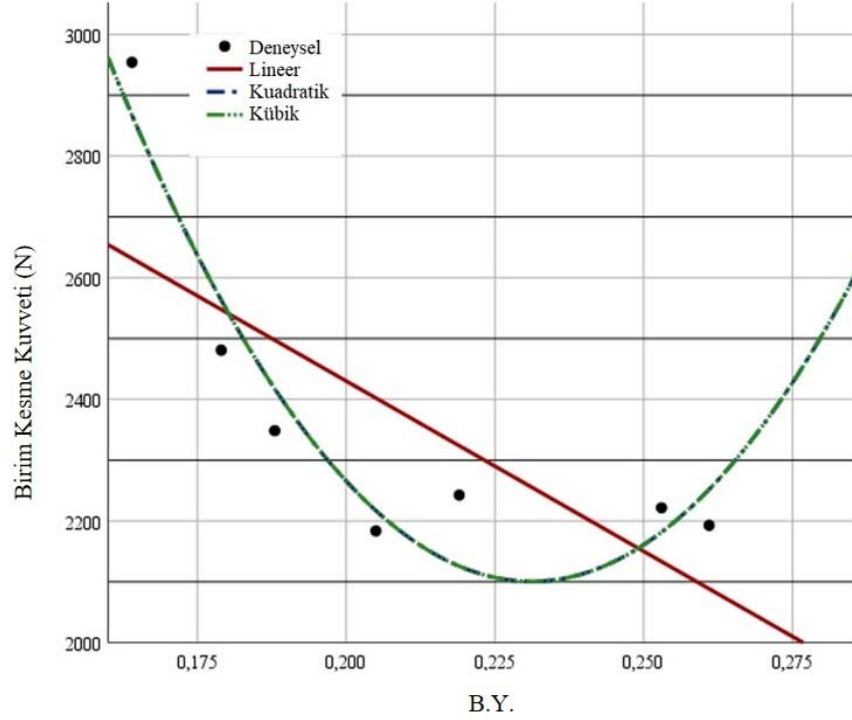
Kuadratik Denklem:

$$BKK = 173157,386BY^2 - 79859,541BY + 11319,410 \quad (14)$$

Kübik Denklem:

$$BKK = 0BY^3 + 173157,386BY^2 - 79859,541BY + 11319,410 \quad (15)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve deneyler sonucunda elde edilen BKK değerleri Tablo 9'da kıyaslanmıştır.



Şekil 10. Artan ilerleme hızı ile değişen BY ve BKK değerleri değişimi
(Change of BY and BKK values with increasing feed rate)

Tablo 8. Artan ilerleme hızına bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem parametreleri
(Developed equation parameters for BY-BKK relation according to increasing feed rate)

Denklem Tipi	Regresyon İlişkisi R ²	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0,642	3678,542	-6093,530	-	-
Kuadratik	0,932	11319,410	-79859,541	173157,386	-
Kübik	0,932	11319,410	-79859,541	173157,386	,000

Tablo 9. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen BKK değerleri
(BKK values calculated and measured as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	BY Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Deneysel BKK Değeri
F:0,125 mm/rev	0,170	2642,642 4.8	2747,537	2747,537 1.1	2778,726
F: 0,33 mm/rev	0,230	2277,030 2.95	2111,741	2111,741 4.5	2211,648

Kontrol deneyleri sırasında kullanılan ilerleme hızları için BY değerleri hesaplanmıştır. Geliştirilen modeller kullanılarak BKK değerleri tahmin edilmiştir. Modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Kuadratik ve Kübik denklem tiplerinin başarılı tahminlerde bulunduğu, Lineer denklem tipinin 0,125 mm/rev ilerleme değerinde %5 değerlerine yakın bir sapma ortaya koyduğu görülmüştür.

Artan ilerleme hızı etkisinin değerlendirildiği gibi; artan kesme derinliğinin BY ve BKK üzerine etkileri de araştırılmıştır. Tablo 10'da artan kesme derinliğine göre değişen BY ve BKK değerleri verilmiştir.

Tablo 10. Artan kesme derinliğine göre ölçülen BY ve BKK değerleri
(BY and BKK values measured by increasing depth of cut)

V	F	A	BY	BKK
325	0,2	1	0,290	2588,942
325	0,2	1,5	0,227	2408,852
325	0,2	2	0,185	2348,375
325	0,2	2,5	0,160	2361,261
325	0,2	3	0,140	2309,345
325	0,2	3,5	0,129	2265,636
325	0,2	4	0,120	2255,045

İki değişken arasındaki ilişkinin tanımlanabilmesi için yine üç farklı denklem tipi (Lineer, Kuadratik ve Kübik) kullanılmış ve Şekil 11 oluşturulmuştur. Lineer denklem tipinin BY ve BKK arasındaki ilişkiyi tanımlama başarısı $R^2=0,944$; Kuadratik ve Kübik denklem tiplerinin ise $R^2=0,958$ dir. Tüm denklem tipleri yüksek doğruluk oranı ile ilişkiyi tanımladığı görülmüştür. Artan kesme derinliği ile BY ve BKK değerlerinin azaldığı görülmektedir. Artan kesme derinliği deforme edilen bölgenin artmasına neden olmaktadır. Artan deformasyon bölgesi daha fazla dislokasyonu harekete geçirerek deformasyon sertleşmesini yükseltmektedir. Bu durum artan kesme kuvvetleri ile BKK değerlerinin ve dolayısıyla BY değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Artan kesme derinliğine bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem tipleri için katsayılar Tablo 11’de sunulmuştur.

Tablo 11’de verilen denklem parametreleri ışığında;

Lineer Denklem:

$$BKK = 1800,560BY + 2040.708 \quad (16)$$

Kuadratik Denklem:

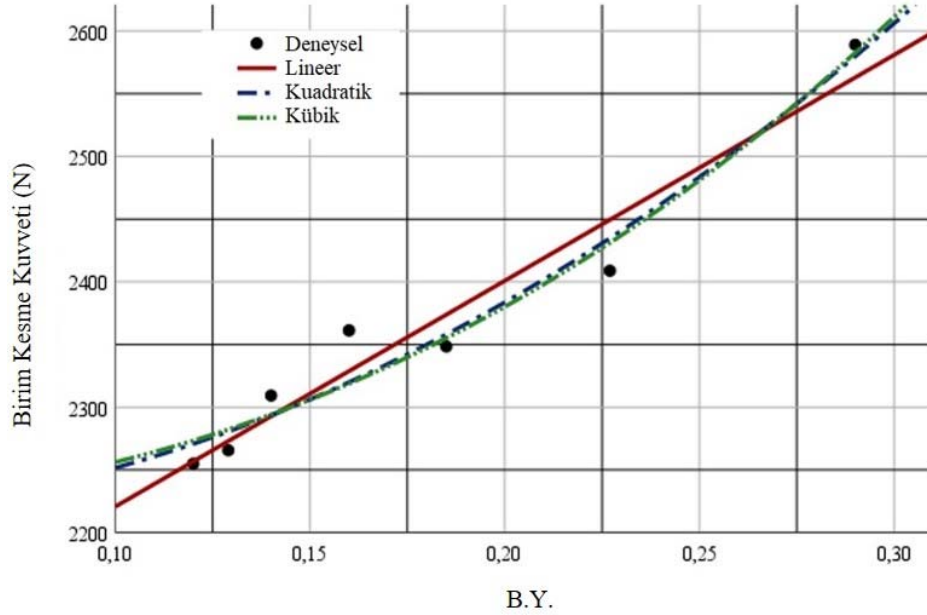
$$BKK = 4527,146BY^2 - 38,907BY + 2210,289 \quad (17)$$

Kübik Denklem:

$$BKK = 3358,490BY^3 + 3344,648BY^2 + 0BY + 2219,416 \quad (18)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemler için kontrol deneyleri yapılmış denklemler ile hesaplanan ve deneyler sonucunda elde edilen BKK değerleri Tablo 12’de kıyaslanmıştır.

Yapılan kontrol deneyleri tüm denklem tiplerinin BKK değerlerinin tahminin de tatmin edici başarılar ortaya



Şekil 11. Artan kesme derinliği ile değişen BY ve BKK değerleri değişimi
(Change of BY and BKK values with increasing cutting depth)

Tablo 11. Artan kesme derinliği bağlı BY-BKK ilişkisi için geliştirilen denklem parametreleri
(Developed equation parameters for BY-BKK relation according to increasing cutting depth)

Denklem Tipi	Regresyon İlişkisi R^2	Denklem Parametreleri			
		Sabit	b1	b2	b3
Lineer	0,944	2040,708	1800,560		
Kuadratik	0,958	2210,289	-38,907	4527,146	
Kübik	0,958	2219,416	0,000	3344,648	3358,490

Tablo 12. Kontrol deneyleri sonucunda hesaplanan ve ölçülen BKK değerleri
(BKK values calculated and measured as a result of control experiments)

Kontrol Değeri	BY Değeri	Lineer Denk.	Kuadratik Denk.	Kübik Denk.	Deneysel BKK Değeri
A: 3,3mm	0,130	2275,326 0.01	2282,085 0.31	2283,635 0.31	2275,051
A: 2,3mm	0,170	2346,020 1.82	2333,858 2.34	2331,957 2.42	2389,672

koyduğunu göstermektedir. Lineer denklem tipine ait R^2 değeri diğer denklem tiplerine oranla bir miktar düşük olsa da kontrol deneyleri sonucunda daha yakın değerler ortaya koymuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada operasyon parametrelerinin kesme kuvvetlerinin oluşumuna etkileri incelenmiştir. Eğri uydurma algoritmaları kullanılarak kesme kuvvetleri modellenmiştir. Modelleme sırasında kesme parametreleri ve oluşan talaş boyutları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen kuvvet verileri, geliştirilen modeller aracılığıyla hesaplanan kuvvet verileri ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar:

- Kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrenin kesme derinliği ve ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir.
- Artan ilerleme hızı ve kesme derinliği ile kesme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızının artışı ile kesme kuvvetlerinin az da olsa düştüğü görülmüştür.
- Artan kesme derinliği için üç farklı model geliştirilmiş, bu modellerle kesme derinliği-kesme kuvveti ilişkisi başarılı bir şekilde açıklanmıştır.
- Artan ilerleme hızı için geliştirilen üç farklı modelin her üçü de kesme kuvvetleri- ilerleme hızı arasındaki ilişkiyi başarılı bir şekilde ifade etmiştir.
- Yığılma faktörü için en etkili parametrelerin kesme derinliği ve ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir.
- Artan ilerleme hızı ile yığılma faktörünün arttığı, artan kesme derinliğinin ise yığılma faktörünü azalttığı tespit edilmiştir.
- Değişen ilerlemeye bağlı olarak birim yığılma ve birim kesme kuvveti ilişkisi için Kuadratik denklem tipi başarılı sonuçlar vermiştir.
- Değişen kesme derinliğine bağlı olarak birim yığılma ve birim kesme kuvveti ilişkisi için üç denklem tipi de kabul edilebilir sonuçlar ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Groover M. P., Principles of modern manufacturing, J. Wiley & Sons, 2011.
2. Kurt A., Sürücüler S., Kirik A., Kesme Kuvvetlerinin Tahmini İçin Matematiksel Bir Model Geliştirme, J. Polytech., 13, 15–20, 2010.
3. Yılmaz B., Pnömatik tahrikli dinamik talaş kırıcı tasarımı ve işleme parametrelerine etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2016.
4. M. Cemal Çakır, Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, Dora Yayıncılık, 2010.
5. Barry J., Byrne G., Lennon D., Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy, Int. J. Mach. Tools Manuf., 41, 1055–1070, 2001.
6. Sutter G., Chip geometries during high-speed machining for orthogonal cutting conditions, Int. J. Mach. Tools Manuf., 45, 719–726, 2005.
7. Toropov A., Ko S. L., Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting, Int. J. Mach. Tools Manuf., 43, 1209–1215, 2003.
8. Lee E. H., Shaffer B. W., The theory of plasticity applied to a problem of machining, Transactions of the ASME 73, 1951.
9. Uzun İ., Aslantaş K., Karabulut A., Ortogonal kesme işleminde takım-talaş temas uzunluğundaki değişimin araştırılması, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24 (3), 477–484, 2009.
10. Fang N., Jawahir I. S., Analytical predictions and experimental validation of cutting force ratio, chip thickness, and chip back-flow angle in restricted contact machining using the universal slip-line model, Int. J. Mach. Tools Manuf., 42, 681–694, 2002.
11. Chao B. T., Trigger K. J., Controlled contact cutting tools, Trans. ASME J. Eng. Ind., 81, 139–151, 1959.
12. Wallace P. W., Boothroyd G., Tool forces and tool-chip friction in orthogonal machining, J. Mech. Eng. Sci., 6, 74–87, 1964.
13. Çiftçi İ., Gökçe H., Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (1), 201–214, 2018.
14. Aydın M., Köklü U., A study of ball-end milling forces by finite element model with Lagrangian boundary of orthogonal cutting operation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 517–527, 2018.
15. Özlü B., Demir H., Nas E., CNC Tornalama İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Kuvvetlerine Etki Eden Parametrelerinin Matematiksel Olarak Modellenmesi, J. Adv. Technol. Sci., 3, 75–86, 2014.
16. Yaşar N., Sertleştirilmiş X40CrMoV5-1 Çeliğinin Tornalanmasında Kesme Kuvvetinin Deneysel ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 6, 765–773, 2018.
17. Gürbüz H., Farklı Kesme Parametrelerinde Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımlar ile AISI 1050 Çeliğin Tornalanmasında Oluşan Esas Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi ve İstatiksel Olarak Analizi, Batman Üniversitesi Yaşam Bilim. Derg., 5, 147–162, 2015.
18. Ay M., Turhan A., Tornalama İşleminde Kesme Parametrelerinin ve İş Parçası Uzunluğunun Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, Makine Teknol. Elektron. Derg., 7, 55–67, 2010.
19. Uzun G., Analysis of grey relational method of the effects on machinability performance on austempered vermicular graphite cast irons, Measurement, 142, 122–130, 2019.
20. Yılmaz B., Karabulut Ş., Güllü A., Performance analysis of new external chip breaker for efficient machining of Inconel 718 and optimization of the cutting parameters, J. Manuf. Process., 32, 553–563, 2018.

21. Çiftçi İ., The Influence of Cutting Tool Coating and Cutting Speed on Cutting Forces and Surface Roughness in Machining of Austenitic Stainless Steels, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 20 (2), 205–209, 2005.
22. Korkut I., Donertas M. A., The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling, Mater. Des., 28, 308–312, 2007.
23. Yağmur S., Çakiroğlu R., Acir A., Şeker U., AISI 1050 Çeliğinin Delinmesinde İtme Kuvvetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 5, 241–246, 2017.
24. Yağmur S., Kurt A., Şeker U., Evaluation and mathematical modeling of delamination and cutting forces in milling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) materials, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (1), 457–465, 2020.
25. Sun S., Brandt M., Dargusch M. S., Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys, Int. J. Mach. Tools Manuf., 49, 561–568, 2009.
26. Mavı A., Uzun G., Dupleks 1.4462 Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Kesme Parametrelerinin İşlenebilirlik Üzerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 5, 177–184, 2017.

