

FREZELEMEDE SERTLİĞİN KESME KUVVETLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE CEVAP YÜZEY METODU KULLANILARAK MODELENMESİ

Murat KOYUNBAKAN¹, Ali ÜNÜVAR²

¹mkoyunbakan@selcuk.edu.tr Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42075 Konya

²aunuvar@selcuk.edu.tr Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42075 Konya

ÖZET

Talaş kaldırmada kullanılan malzemeler farklı mekanik özelliklere sahiptirler. Malzemelerin sertlikleri ve özellikleri talaş kaldırmayı önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı kimyasal kompozisyona sahip malzemeler ısı işlem sonucu farklı sertliklerde olabilirler. Frezelemede kesme kuvvetlerine talaş kaldırma otomasyonunda sıkça gereksinim duyulmaktadır. Bu çalışmanın amacı, C4140 malzemesinin parmak freze ile frezelenmesinde kesme kuvvetleri üzerine malzemenin sertliğinin ve kesme parametrelerinin etkisini tayin etmektir. Bu çalışmada matematik modelin oluşturulmasında, beş faktör için üç seviyeli merkezi kompozit dizayn cevap yüzey metodu kullanılmıştır. Kesme testleri kuru kesme koşullarında yekpare karbür takım kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki eksenel kesme derinliği kesme kuvvetleri üzerindeki ana etkili faktördür. Sertlik ve eksenel kesme derinliği arttıkça kesme kuvvetleri artmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Kesme kuvvetleri, sertlik, cevap yüzey metodu.

ABSTRACT

Materials used machining have different mechanical properties. The hardness and strength of material has the important effect on machining. The materials that have same chemicals properties can be different harnesses in result of heat treatment. Modeling of cutting forces in milling often needs in machining automation. The objective of this study is to predictive the effects of cutting parameters and hardness of machined part on variations of cutting forces during the end milling of C4140 material. In this study Response surface methodology were used by designing five factors, three level central composite rotatable design matrixes with full replication for development of mathematical models. This paper presents a study of the influence of the machining conditions and material hardness on the average cutting forces for end milling in the up milling modes. The cutting tests were carried out under dry cutting conditions using solid carbide end mill.

Keywords: Cutting forces, hardness, response surface methodology.

1. GİRİŞ

Parmak freze ile işleme, endüstride çok kullanılan metal kesme işlemlerinden biridir. Havaçılık endüstrisinde parçaların şekli, karmaşıklığı ve son boyutlarda istenen hassasiyet nedeniyle frezeleme işlemleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Bilgisayar tümelşik imalat uygulamaları için uygun bir veri seçim sisteminin dizayn problemlerinin çözümüne yönelik son yaklaşımlar, matematik

model tipi ve işlenebilirlik veri tabanı sistemlerini kullanmayı gerektirmektedir. Kesme kuvvetlerinin analizi yıllardır ana araştırma konularından biri olmaktadır. Bu modellemede ilk amaç farklı frezeleme parametrelerinin etkisinde kuvvetlerini tayin etmektir. Kesme kuvvetleri, doğrudan veya dolaylı şekilde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü gibi proses parametrelerini tahmin etmede kullanılmaktadır. Bu ise, optimum üretkenliğe, kalite ve maliyetin elde edilebilmesinde talaş kaldırma operasyonlarının efektif planlanmasını kolaylaştırmaktadır. Kesme kuvvetlerinin modellenme kapasitesi, talaş kaldırma proses planlaması, takım tezgahları tasarımı, takım geometrisi ve talaş kaldırma prosesini izleme/kontrol için analitik bir temel sağlar. Geçmişte parmak frezeleme işleminde takım aşınmasının bir göstergesi olarak kesme kuvvetlerini analiz etmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Kesme kuvvetlerinin modellenmesi metal kesme teorisinde ana problemlerden biridir. Kesme hızı, ilerleme, radyal kesme derinliği, aksel kesme derinliği, takım geometrisi, takım aşınması, işlenen parçaların fiziksel ve kimyasal karakteristikleri gibi çok sayıda parametre olması tam bir model geliştirmeyi zorlaştırmaktadır. Kesme kuvvetleri ile ilgili verilerin büyük miktarı el kitaplarında mevcutsa da onların çoğunluğu çok az kesme parametresinin etkisinde kesme kuvvetlerinin belirlenmesine yardımcı olur. Bu çalışmada cevap yüzey metodu yardımıyla kesme kuvvetlerinin modellenmesi için bir yaklaşım önerilmektedir. Model deneysel talaş kaldırma verileri kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen model takım şartlarını izleme sistemlerinde simülasyon amaçları için kullanılabilir.

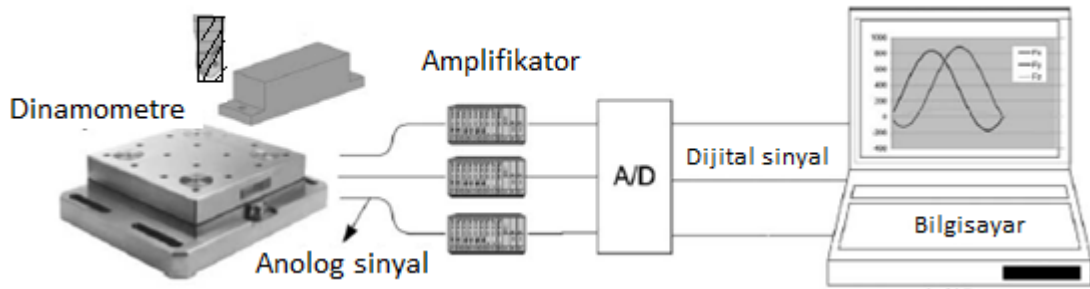
Kesme kuvvetlerinin modellenmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar işlemin geometrik ve fiziksel karakteristiklerini esas alarak kesme kuvvetlerini tayin etmek üzere matematik modeller geliştirmişlerdir. Geçmişte frezeleme prosesleri için birçok model geliştirilmiştir. Talaş oluşum mekaniği temel alınarak Kline ve arkadaşları, ilerleme ve kesme geometrisinin bir fonksiyonu olarak ani ve ortalama kesme kuvvetlerini elde etmek için bir mekanistik model vermişlerdir [1]. Aluaddin ve arkadaşları, kuru kesme koşullarında kaplamasız karbür takma uçlu takımlar kullanarak Inconel 718 malzemeyi frezelemede ortalama teğetsel kesme kuvvetleri için bir matematik model geliştirme çalışması yapmışlardır. Cevap yüzey metodu kullanarak aksel kesme derinliği ve kesme hızının fonksiyonu olarak kesme kuvveti modeli geliştirmişlerdir [2]. Aluaddin ve arkadaşları, eş yönlü ve zıt yönlü frezelemede ortalama kesme kuvvetlerine işleme koşullarının etkisini inceleyen bir çalışma sunmuşlardır [3]. Tümleşik imalat için uygun veri seçim sistemi dizayn etme probleminde son yaklaşımlar, matematik model tipi, işlenebilirlik veri tabanı sistemleri kullanmak olmuştur[4]. Cevap yüzey metodu kullanarak Inconel 718 malzemeyi frezelemede ortalama teğetsel kesme kuvvetleri için bir matematik model geliştirmek için bir yaklaşım verilmiştir. Li ve arkadaşları kaplamalı karbür takma uçlu takımlar kullanarak Inconel 718 malzemeyi frezelemede teğetsel kesme kuvvetleri değişimleri ve takım aşınmasının gelişimini inceleyen bir deneysel çalışma yapmışlardır [6]. Aluaddin ve arkadaşları, kuru kesme koşullarında kaplamasız karbür takma uçlu takımlar kullanarak Inconel 718 malzemeyi frezelemede ortalama teğetsel kesme kuvvetlerinin işleme koşullarına etkisini incelemişlerdir [7]. Patwari ve arkadaşları, orta karbonlu çeliklerin frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin tayini için birinci ve ikinci dereceden matematik modeller geliştirmiş ve kritik etmişlerdir. Cevap yüzey metodu kullanarak kesme hızı, ilerleme ve aksel kesme derinliğinin fonksiyonu olarak kesme kuvvetlerini tayin için bir matematik model geliştirmişlerdir [8]. Fussell ve Srinivasan, aksel ve radyal kesme derinliği ile ilerlemenin fonksiyonu olarak kesme kuvvetlerinin değişimini deneysel olarak incelemişlerdir [9]. Li ve Liang, iş parçası ile kavramadan çıkarken ve kavrama durumunda iken aksel, ilerleme ve çapraz ilerleme durumlarında kesme kuvvetlerini tayin etmişlerdir [10].

Diğer taraftan birçok araştırmacı tamamen deneysel yaklaşımları kullanmışlardır. Ganesh Babu ve arkadaşları, Al SiC metal matris kompozit malzemelerin frezelenmesinde kesme kuvvetleri üzerine kesme parametrelerinin etkisini tayin etmişlerdir [11]. Lei Zhang and Li Zheng, cep frezelemede kesme kuvvetlerini tayin etmek için bir yaklaşım önermişlerdir [12]. Adetoro ve Wen, ani ve ortalama kesme kuvvetleri katsayılarını tayin etme ve kesme işlemini simüle etmede etkin ve efektif nümerik araç kullanmayı göstermişlerdir [13].

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Deneysel çalışma

Kesme kuvvet modeli geliştirmek için deneysel çalışma sonuçları kullanılmıştır. Kesme kuvvetlerinin üç bileşeni tabla ve iş parçası arasına monte edilen bir piezoelektrik dinamometre ile ölçülmüştür (Kistler 9257B). Deneysel CNC dik işleme merkezi Mazak Variaxis500 tezgahında düz uçlu parmak freze takımı kullanılarak yapılmıştır. Üç farklı sertlikte C4140 malzeme testlerde kullanılmıştır. Yekpare düz uçlu parmak freze takımlar 12 mm çapında, 38° helis açılı ve 12° talaş açısına sahiptir. Deney donanımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneysel kuru kesme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Kesme hızı, aksel ve radyal kesme derinliği, diş başına ilerleme parametrelerinin kombinasyonlarından oluşan deneysel plan kullanılarak deneyler yapılmıştır. Talaş açısı, takım çapı gibi diğer parametreler sabit tutulmuştur.



Şekil 1. Deneysel düzen



Şekil 2. Deney düzeneğinin görüntüsü

2.2 Tasarlanan deneysel tasarım

Bu çalışma, cevap yüzey metodu kullanılarak farklı sertliklerdeki C4140 malzemenin frezelenmesinde ortalama kesme kuvvetleri için matematik model geliştirilmek için bir yaklaşımı verir. Cevap yüzey metodu, pek çok değişkenden etkilenen bir bağıli değişkenin ve bu bağıli değişkenin optimize edilmesini amaçlayan problemlerin modellenmesi ve analiz edilmesinde kullanılan, matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir derlemesidir. Cevap yüzey metodu, ayrıca bir ya da daha fazla ölçülen yanıtlar ve önemli giriş faktörleri arasındaki ilişkileri belirlemektedir.

Deneysel tasarlanmasında Cevap Yüzey Metodu ve Taguchi teknikleri, kesme kuvvetlerinin tahmin edilmesi problemi için en yaygın metodolojiler olarak görülmektedir. Bu yüzden aşağıda Cevap Yüzey Metodunun prensibi açıklanmıştır.

2.3 Cevap Yüzey Metodu

Cevap Yüzey Metodunda bağlı değişkenler olarak alınan önemli olarak görülen faktörlerin bağımsız değişken olan deneylerin cevabı ile ilişkisinin olduğu bir polinom modelin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

Aşamalar;

1. İncelenecek olan parametreleri seçilir.
2. Cevap yüzeyin sınırlandırılmış bir bölgesinde bir ikinci-seviye faktöriyel deney tasarımı yapılır.
3. Sonuçlara ilişkin tahminleri hesaplanır ve böylece doğrusal modelin katsayıları hesaplanır.
 $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$
4. Kademeli artış yolu boyunca devam etmek için her bir faktörün doğrultusunda uygun adımların belirlenmesinde bir kılavuz olacak bir referans faktör seçilir.
5. Cevaplar artmaya devam ederse kademeli artış yolu boyunca hareketle birkaç deneysel koşul seçilir ve test edilir. Cevaplarda artış sona ererse yeni bir yol üretilmelidir.
6. Yeni bir yol gerekli ise, yeni bir ikinci-seviye faktöriyel deneyi tasarlanır ve test edilir. Tüm önceki adımlar cevap olarak önemli gelişmeler elde edilemeyinceye kadar tekrarlanır.

Deneylerden toplanan veri, Cevap Yüzey Metodu kullanılarak bir matematiksel yüzey modelin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Cevap Yüzey Metodu, pek çok değişkenden etkilenen bir yanıt ve bu yanıtın optimize edilmesini amaçlayan problemlerin modellenmesi ve analiz edilmesinde kullanılan, matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir derlemesidir. Buna ulaşmak için aşağıdaki doğrusal ilişkiler göz önünde bulunmalıdır.

$$Y = f(v, f_z, a_e, a_p) + \varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

Buradaki v , f_z , a_e , a_p imalat parametreleridir ve sırasıyla kesme hızı, diş başına ilerleme, radyal kesme derinliği ve aksel kesme derinliğidir. ε gözlemlenen Y cevabına göre ortalamanın sıfır (0) olduğu normal olarak dağıtılmış hatadır.

$$f(v, f_z, a_e, a_p) = \eta \dots \dots \dots (2)$$

' η ' olarak temsil edilen yüzey, cevap yüzey olarak isimlendirilmektedir. kesme kuvvetleri ve diğer bağlı değişkenler arasındaki ilişkiler aşağıdaki gibi modellenmiştir.

$$F = C v^{a_1} f_z^{a_2} a_e^{a_3} a_p^{a_4} \dots \dots \dots (3)$$

Buradaki 'C' bir sabittir ve a_1 , a_2 , a_3 , a_4 parametre katsayılarıdır. Yukarıdaki fonksiyon, doğrusal matematiksel şeklindeki temsili aşağıdaki gibidir.

$$\ln F = \ln C + a_1 \ln v + a_2 \ln f_z + a_3 \ln a_e + a_4 \ln a_p \dots \dots \dots (4)$$

Yukarıdaki denklemin birinci dereceden doğrusal modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Y_1 = y - \varepsilon = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \dots \dots \dots (5)$$

Buradaki Y 'birinci derece denkleme bağlı olarak tahmin edilen cevaptır ve y bir logaritmik ölçekte ölçülen kesme kuvvetidir. x_1 , x_2 , x_3 , x_4 sırasıyla kesme hızı, diş başına ilerleme, radyal kesme derinliği ve aksel kesme derinliğinin logaritmik dönüşümleridir. ' ε ' deneysel hata ve ' b ' de ilgili parametrelerin değerlerinin tahminleridir.

2.4 Deneysel Tasarım

Modelleme, uygun şekilde tasarlanmış deney verilerinden güvenilir denklemler elde edilmesini sağlar. Bu nedenle iyi tasarlanmış bir deney olması esastır. Her bir faktörün değerler aralığı üç farklı

seviyede kurulmuştur. İmalat gereksinimlerine göre Tablo 1’de görüldüğü gibi alt, orta ve yüksek seviyeler seçilmiştir. Bağımsız değişkenler arasındaki tüm etkileşimlerin incelenmesi için bir tam faktöriyel tasarım kullanılmıştır. Buna bağlı olarak, her biri faktörlerin farklı seviyelerinin kombinasyonuna sahip toplam dört (4) bağımsız değişken için yirmi dört (24) deney uygulanmıştır. 4 Merkez noktası ilaveli 2^4 tam faktöriyel deney ile oluşturulan on altı (16) deney ve deneysel hatanın tahmin edilmesi için kullanılan merkez noktasının dört (4) kez tekrar edilmesinin eklendiği deneysel tasarım kurulmuştur. Bu deneyler, birinci derece modelin kurulmasında kullanılmaktadır. Değişkenler, iş-takım sisteminin titreşimini önlemek amacıyla freze tezgahının kapasitesi ve sınırlandırılmış kesme koşulları dikkate alınarak kodlanmıştır. Değişkenlerin kodlanmış değerleri Tablo 1’de görülmektedir. Her bir bağımsız değişken için dönüşüm formülleri aşağıdaki gibidir.

$$x_1 = 2 \frac{\ln v - \ln 200}{\ln 200 - \ln 80} + 1 \quad x_2 = 2 \frac{\ln f_z - \ln 0.1}{\ln 0.1 - \ln 0.04} + 1 \quad x_3 = 2 \frac{\ln a_e - \ln 5}{\ln 5 - \ln 1} + 1 \quad x_4 = 2 \frac{\ln a_p - \ln 5}{\ln 5 - \ln 1} + 1 \quad (6)$$

Burada; x_1 kesme hızının, x_2 ilerleme hızının, x_3 radyal kesme derinliğinin ve x_4 aksel kesme derinliğinin kodlanmış değerleridir.

Tablo 1. Proses değişkenleri ve onların seviyeleri

Parametreler	Birim	Seviye-I (Düşük)	Seviye-II (Orta)	Seviye-III (Yüksek)
v	m/dk	80	126	200
f_z	mm/diş	0,04	0,16	0,10
a_e	Mm	1	2,24	5
a_p	mm	1	2,24	5

Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5’te malzemenin farklı sertlik değerlerine göre deneylerdeki kesme koşulları ve sonuçları verilmektedir. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için piezo elektrik dinamometre kullanılmıştır. Kesme kuvvetleri verilerinin toplanmasında her örnek için ölçülen değerler tablolarda verilmiştir.

Tablo 2. F_x, F_y, F_z kuvvetleri için 26HRC sertliğe sahip AISI4140 çeliğinin frezelenmesinde kesme kuvvet modeli deneysel tasarımı ve kuvvet değerleri

Deney Numarası	v (m/dk)	f_z (mm/diş)	a_e (mm)	a_p (mm)	F_y	F_x	F_z
1	-1	-1	-1	-1	17,27	12,6	45,19
2	1	-1	-1	-1	15,04	13,3	43,45
3	-1	1	-1	-1	31,57	31,08	80,63
4	1	1	-1	-1	28,62	28,86	76,84
5	-1	-1	1	-1	18,16	81,75	113,61
6	1	-1	1	-1	5,76	59,34	64,15
7	-1	1	1	-1	40,82	158,54	226,75
8	1	1	1	-1	35,39	149,62	209,98
9	-1	-1	-1	1	68,07	84,49	185,79
10	1	-1	-1	1	58,88	81,95	173,98
11	-1	1	-1	1	134,71	154,28	362,8
12	1	1	-1	1	119,17	145,4	338,18
13	-1	-1	1	1	70,39	369,05	489,76
14	1	-1	1	1	57,01	343,09	458,89
15	-1	1	1	1	177,74	732,72	1068,83
16	1	1	1	1	149,57	749,53	1015,95
17	0	0	0	0	49,43	85,69	162,7
18	0	0	0	0	59,3	105,31	195,58
19	0	0	0	0	59,62	107,43	196,98

20	0	0	0	0	59,88	106,86	197,17
21	0	0	0	0	59,37	107,29	196,23
22	0	0	0	0	58,85	106,79	195,43
23	0	0	0	0	58,46	104,44	191,83
24	0	0	0	0	49,43	85,69	162,7

Tablo 3. F_x, F_y, F_z kuvvetleri için 45HRC sertliğe sahip AISI4140 çeliğinin frezelenmesinde kesme kuvvet modeli deneysel tasarımı ve kuvvet değerleri

Deney Numarası	v (m/dk)	f_z (mm/diş)	a_e (mm)	a_p (mm)	F_y	F_x	F_z
1	-1	-1	-1	-1	21,4	26,41	57,08
2	1	-1	-1	-1	14,84	34,67	59,19
3	-1	1	-1	-1	34,94	45,74	97,99
4	1	1	-1	-1	28,71	58,15	99,44
5	-1	-1	1	-1	5,14	120,46	133,03
6	1	-1	1	-1	13,24	127	116,55
7	-1	1	1	-1	24,82	212,68	258,78
8	1	1	1	-1	6,86	224,33	234,92
9	-1	-1	-1	1	74,07	125,27	233,56
10	1	-1	-1	1	55,99	144,32	232,1
11	-1	1	-1	1	144,89	206,5	433,62
12	1	1	-1	1	123,58	242,34	453,83
13	-1	-1	1	1	84,7	339,77	482,51
14	1	-1	1	1	122,2	569,22	403,31
15	-1	1	1	1	40,88	1106,91	1188,74
16	1	1	1	1	64,74	1031,02	1224,04
17	0	0	0	0	16,38	376,24	299,87
18	0	0	0	0	15,56	377,95	285,18
19	0	0	0	0	16,68	377,82	284,82
20	0	0	0	0	15,89	377,16	281,27
21	0	0	0	0	10,64	385,68	252,04
22	0	0	0	0	58,85	106,79	195,43
23	0	0	0	0	58,46	104,44	191,83
24					49,43	85,69	162,7

Tablo 4. F_x, F_y, F_z kuvvetleri için 15 HRC sertliğe sahip AISI4140 çeliğinin frezelenmesinde kesme kuvvet modeli deneysel tasarımı ve kuvvet değerleri

Deney Numarası	v (m/dk)	f_z (mm/diş)	a_e (mm)	a_p (mm)	F_y	F_x	F_z
1	-1	-1	-1	-1	19,01	13,25	47,61
2	1	-1	-1	-1	15,7	11,8	42,51
3	-1	1	-1	-1	31,01	26,98	79,57
4	1	1	-1	-1	28,55	26,12	76,36
5	-1	-1	1	-1	19,82	74,64	114,86
6	1	-1	1	-1	16,95	66,68	103,09
7	-1	1	1	-1	43,03	150,76	229,74
8	1	1	1	-1	38,12	139,19	201,94
9	-1	-1	-1	1	71,48	79,96	196,01
10	1	-1	-1	1	58,81	70,41	165,15
11	-1	1	-1	1	134,58	148,2	370,17
12	1	1	-1	1	117,55	139,14	307,24
13	-1	-1	1	1	96,49	294,16	473,82
14	1	-1	1	1	63,63	328,45	412,74
15	-1	1	1	1	169,03	699,42	1050,14
16	1	1	1	1	161,01	677,51	875,36
17	0	0	0	0	49,56	80,3	162,21
18	0	0	0	0	58,26	100,33	195,1
19	0	0	0	0	58,9	99,49	196,56
20	0	0	0	0	59,43	100,3	197,29
21	0	0	0	0	57,86	100,57	195,56
22	0	0	0	0	58,42	99,59	193,88
23	0	0	0	0	58,76	100,87	194,62
24	0	0	0	0	49,56	80,3	162,21

2.5 Deneysel Çalışma

Frezeleme testleri için kullanılan tezgah beş eksenli bir işleme merkezi olan Mazak500 Variaxis'tir. Bu testlerde düz uçlu parmak freze kullanılmıştır. AISI 4140 malzemenin işlenmesinde kullanılan kesici takımlar ISCAR Takım katalogundan seçilmiştir. Deneysel yüzeylerin işlenmesinde 12 mm çapında, 4 ağızlı ve helis açısı 38° olan yekpare karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler üç farklı sertlik elde etmek için sertleştirilmiş ve gerilim giderme uygulanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri iş parçası kenarından merkeze doğru alınan ölçüm değerlerinin ortalamasıdır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Denklem 5'de verilen kesme kuvvetleri birinci derece modeli kullanılarak aşağıdaki denklemler bulunmuştur.

26 HRC sertlikteki C4140 malzeme için

$$Y_{f_x} = 3.884233 - 0.13615X_1 + 0.446907X_2 + 0.004088X_3 + 0.004088X_4$$

$$Y_{f_y} = 4.642233 - 0.03365X_1 + 0.36922X_2 + 0.796544X_3 + 0.834037X_4$$

$$Y_{f_z} = 5.263491 - 0.06172X_1 + 0.370939X_2 + 0.466901X_3 + 0.771417X_4$$

45 HRC sertlikteki C4140 malzeme için

$$Yf_x = 3.254998 - 0.03218X_1 + 0.135384X_2 - 0.26945X_3 + 0.826225X_4$$

$$Yf_y = 5.391752 + 0.08531X_1 + 0.312314X_2 + 0.699989X_3 + 0.72683X_4$$

$$Yf_z = 5.51071 - 0.01805X_1 + 0.357917X_2 + 0.414579X_3 + 0.717876X_4$$

15 HRC sertlikteki C4140 malzeme için

$$Yf_x = 3.960116 - 0.08418X_1 + 0.342958X_2 + 0.10352X_3 + 0.702664X_4$$

$$Yf_y = 4.57604 - 0.0283X_1 + 0.364562X_2 + 0.801968X_3 + 0.815193X_4$$

$$Yf_z = 5.267083 - 0.06683X_1 + 0.329322X_2 + 0.480482X_3 + 0.718279X_4$$

Kesme kuvvetleri modelinin (6) dönüşüm denklemleri kullanılarak gerçek değerleri ile elde edilmiş denklemleri 15 HRC sertlikteki C4140 malzeme frezeleme için aşağıda verilmiştir.

$$F_x = 306.9958 v^{-0.18374} f_z^{0.748575} a_e^{0.128641} a_p^{0.87318}$$

$$F_y = 205.5825 v^{-0.06176} f_z^{0.79573} a_e^{0.996582} a_p^{1.013016}$$

$$F_z = 635.6786 v^{-0.14587} f_z^{0.718812} a_e^{0.59708} a_p^{0.892583}$$

Sonuçlar göstermiştir ki kesme hızı, kesme kuvvetleri üzerine en az etkiye sahiptir. Yüksek sertlik değerlerinde diş başına ilerlemenin kesme kuvvetlerine etkisi düşüktür, fakat sertlik artarken diş başına ilerlemenin kesme kuvvetlerine etkisi artmaktadır. Orta sertlik değerlerinde radyal kesme derinliğinin kesme kuvvetleri üzerine etkisi düşük sertliklerde olanlara göre daha fazladır, fakat yüksek sertlik değerlerinde radyal kesme derinliğinin kesme kuvvetleri üzerine etkisi daha iyidir. Eksenel kesme derinliğinin kesme kuvvetleri üzerine etkisi daha fazladır. Genel olarak sertlik artarken kesme kuvvetleri artmaktadır. Tüm kesme kuvvetleri matematik modelleri için varyans analiz tabloları elde edilmiştir. Bu çalışmada yalnız Fz için varyans analiz tablosu çizelge 5 de verilmiştir.

Tablo 5. 15 HRC sertlikte C4140 malzeme frezelemede Fz için varyans analiz tablosu

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kareler	F-oranı _{hes}	Ftab F(1,15,5%)
Regresyon	679.5671	5	135.9134		
b0	665.8118	1	665.8118		
Birinci derece model	13.7553	4	3.438824		
b1	0.071458	1	0.071458	19.79352	
b2	1.735251	1	1.735251	480.6531	
b3	3.6938	1	3.6938	1023.158	
b4	8.254786	1	8.254786	2286.521	
Kalan	0.068594	19	0.00361		
Uygunluk noksanlığı	0.037827	12	0.003152	0.717187	
Hata	0.030767	7	0.004395		
Toplam	679.6357	24	28.31815		

$F_{hes} = F(12,7) < F_{tab}$, olduğundan model yeterlidir.

Birinci derece model için Her değişkenin önemi test edildi ve Çizelge5 de gösterilmiştir. Bu çizelgeden kesme hızının birinci derece etkisi önemsiz iken, radyal kesme derinliği, aksel kesme derinliği, ve dış başına ilerlemenin etkisi önemli olmaktadır. Tüm kesme kuvvetleri için aksel kesme derinliğinin etkisi yaklaşık olarak ilerlemeninkinden iki misli olduğu görülebilir. Buna karşın ilerlemenin etkisi radyal kesme derinliğinin etkisinden üç misli fazla olduğu görülebilir. Aksel kesme derinliğinin kesme kuvvetleri üzerine etkisi en büyük olmaktadır. Radyal kesme kuvvetlerinin F_x üzerine etkisi önemsiz olurken, F_y ve F_z üzerine radyal kesme kuvvetlerinin etkisi önemli olmaktadır. Tüm kesme kuvvetleri üzerine iş parçasının sertliğinin etkisi aksel ve radyal kesme derinliğinin etkisinden daha az fakat ilerlemeninki ile aynı olmaktadır.

4. SONUÇLAR

Değişken sertlikler ile C4140 çeliklerin frezelenmesinde Cevap Yüzey Metodu (CYM) başarılı bir şekilde kullanılabilir. Birinci dereceden model tahmin denklemleri, yek pare düz uçlu karbür parmak freze ile karbonlu çeliklerin frezelenmesinde cevap yüzey metodunun kullanımıyla geliştirilmiştir.

Kurulan denklemler açıkça göstermiştir ki aksel kesme derinliği kesme kuvvetleri üzerindeki ana etkili faktördür. Sertlik ve aksel kesme derinliği arttıkça kesme kuvvetleri artmaktadır. Diğer değişkenlere göre daha az olmakla birlikte, sertlik ve ilerleme hızı arttıkça kesme kuvvetleri artmaktadır. Kesme hızı ilerleme hızından daha az etkisi olmaktadır. Sonuç olarak, Kesme hızı kesme kuvvetleri üzerinde önemsiz etkiye sahiptir. Geliştirilen kesme kuvvetleri modeli kesme proseslerinde kesme kuvvetleri tahmin edilmesinde, ayrıca model yardımıyla sanal talaş kaldırma sistemlerinde ve imalat otomasyonunda istenilen kesme kuvvetleri için kesme değişkenlerinin belirlenmesi çalışmalarında etkili olarak kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Araştırma projesi Selçuk Üniversitesi İmalat Sistemleri ve BDT/BDÜ Araş. ve Uyg. Merkezi tarafından desteklenmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] KLINE W. A., DEVOR R. E. AND LINDBERG J. R., The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts, **Int. J. on Machine Tool Design Research**, Vol. 22, No. 1, pp. 7-22., (1982).
- [2] ALAUDDIN M., EL BARADIZ M.A., HASHMI M.S.J., Modelling of cutting force in end milling Inconel 718, **Journal of Materials Processing Technology** 58 100-108., (1996).
- [3] ALAUDDIN M., MAZID M.A., EL BARADI M.A., HASHMI M.S.J., Cutting forces in the end milling of Inconel 718, **Journal of Materials Processing Technology**, 77, 153–159.. (1998).
- [4] BALAKFISHANAN P., AND DEVFIES M.F., Analysis of mathematical model building techniques adaptable to machinability data base systems, **in Proceedings of NAMRC-xi**, pp. 466-475., (1983).
- [5] MONTGOMERY D.C., **Design and Analysis of Experiments**, 2nd edn., John Wiley and Sons, New York, pp. 445-740., (1976).

- [6] LI, H.Z., ZENG H., CHEN X.Q., An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts, **Journal of Materials Processing Technology** 180, 296–304., (2006).
- [7] ALAUDDIN M., MAZID M.A., EL BARADI M.A., HASHMİ M.J.S., Cutting forces in the end milling of Inconel 718, **J. Mater. Process. Technol.** 77, 153–159., (1998).
- [8] ANAYET MD., PATWARI U., NURUL AMIN A.K.M., FARIS W.F., Prediction Of Tangential Cutting Force In End Milling Of Medium Carbon Steel By Coupling Design Of Experiment And Response Surface Methodology, **Journal of Mechanical Engineering**, Vol. ME 40, No. 2, December, Transaction of the Mech. Eng. Div., The Institution of Engineers, Bangladesh., (2009),
- [9] FUSSELL B.K., SRINIVASAN K., An investigation of the end milling process under varying machining conditions, **Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry** 111, 27–36., (1989).
- [10] LI Y., LIANG S.Y., "Cutting force analysis in transient state milling processes", The International **Journal of Advanced Manufacturing Technology** 15, 785–790., (1999).
- [11] GANESH BABU B., SELLADURAI V. AND SHANMUGAM R., Analytical Modeling Of Cutting Forces Of End Milling Operation On Aluminum Silicon Carbide Particulate Metal Matrix Composite Material Using Response Surface Methodology Vol. 3, No. 2, April, Issn 1819-6608 **Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences.** (2008).
- [12] ZHANG L., Prediction of cutting forces in end milling of pockets, **Int J. Adv. Manuf. Technol**, 25: 281–287, (2005).
- [13] ADETORO O. B., & WEN P. H., Prediction of mechanistic cutting force coefficients using ALE formulation, **Int. J. Adv. Manuf. Technol**, 46:79–90., (2010).