

# AZDIRMA FREZE ÇAKILARINDA KESME KUVVETİ BİLEŞENLERİNİN DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL OLARAK İNCELENMESİ

**Alaattin KAÇAL ve Mahmut GÜLESİN\***

Makine Eğitimi Bölümü, Simav Teknik Eğitim Fakültesi, Dumlupınar Üniversitesi, 43500, Simav, Kütahya

\*Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Beşevler, Ankara

[akacal@gazi.edu.tr](mailto:akacal@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 30.06.2008 ; Kabul/Accepted: 22.07.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada, azdırma yöntemi ile dişli çark açma işlemi sırasında meydana gelen kesme kuvveti bileşenlerinin kesme parametreleri ile ilişkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. İşleme deneylerinde TiN kaplamalı ve kaplamasız HSS azdırma çakılar kullanılarak, Ç 8620 malzemeden dişli çarklar işlenmiştir. Ayrıca, MINITAB R14 yazılımı kullanılarak deney sonuçlarının ANOVA (varyans analizi) testleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre; ilerleme yönündeki Fz-kuvvet bileşeninin kesme parametrelerindeki değişimlere karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür. Kaplamalı azdırma ile yapılan deneylerde kesme kuvvetleri kaplamasız azdırmalardan ortalama % 59 oranında daha az çıkmıştır.

**Anahtar Kelimeler:**Azdırma usulü dişli çark açma, kesme kuvveti bileşenleri, istatistiksel analiz.

## INVESTIGATION OF THE CUTTING FORCES COMPONENTS AS EXPERIMENTALLY AND STATISTICALLY ON HOBS

### ABSTRACT

In this study, relations between cutting force components and cutting parameters have been investigated as experimental and statistically during gear hobbing process. Gears are machined using TiN coated and uncoated hobs, Ç 8620 material in machining test. Additionally, ANOVA (Analysis of variance) tests of experimental results were carried out using MINITAB R14 software. With respect to the experimental results force component of Fz at direction of feed rate shown that more sensitive to variation of cutting parameters. Cutting forces on experiments performed by coated hob average ratio of % 59 lower than uncoated hobs.

**Keywords:** Gear hobbing, cutting force component, statistically analysis.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Azdırma freze çakısı kullanılarak yapılan dişli çark işleme metodu sanayide en çok tercih edilen metottur. Bu yöntemde azdırma çakı ve iş parçası kendi ekseninde dönerken birbirleri ile çalışan dişliler gibi uyumlu hareket ederler. Azdırma freze çakıları özel azdırma freze tezgâhlarında kullanılan kesicilerdir. Düz ve helis dişli çarkların, sonsuz vida çarklarının işlenmesi için sırtı torna edilmiş, vidaya benzer biçimdeki freze çakılarıdır [1,2].

Azdırma ile dişli çark işleme; işlem kinematığı, talaş oluşumu ve aşınma mekanizmasının karmaşık

olmasına karşın yüksek kalitede ve hassasiyette dişli çark üretmek için etkili bir metottur [3]. Azdırma işleminde de diğer kesme işlemlerinde olduğu gibi, endüstrinin ilgisi nedeniyle iş parçası, takım ve üretim bilgilerinin araştırılmasının yanı sıra, kesme kuvvetleri, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve bunlara etkileyen parametrelerin değerlendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır [4,5]. Ancak, azdırma usulü dişli çark işleminde, kesme işlemi kinematığının ve talaş oluşumu mekanizmasının karmaşık oluşu, kesme kuvvetleri ve takım aşınması üzerine yapılan çalışmaların diğer talaşlı imalat operasyonlarına kıyasla sınırlı sayıda kalmasına neden olmuştur. Başlangıçta çalışmalar azdırma işleminin ve kesicilerin incelenmesi, analizi

ile düz ve helis dişlilerin üretiminde azdırma yönteminin uygulanmasını içermektedir [6-9]. Bunlara ek olarak kesme kuvvetlerinin hesaplanmasına ilişkin teorik ve deneysel çalışmalara da rastlanmaktadır [10-12].

Geliştirilen hesaplama prosedürleriyle kesme kuvveti bileşenlerinin tespit edilmesiyle azdırma freze tezgahlarının statik ve dinamik performans limitlerinin gözlemlenmesi, en iyi kesme performansı ve iş parçasını bağlamak için gerekli olan sıkma kuvvetinin belirlenmesi de mümkün olabilmektedir [13-17]. Teorik hesaplamalara göre azdırma işleminde kesme hızlarındaki değişimin kesme kuvveti üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür [18,19]. Ancak ilerlemenin etkisinin kesme hızına göre daha fazla olduğu belirtilmiştir [10]. Azdırma freze tezgahının ve azdırma usulü dişli çark üretiminin karmaşık olması nedeniyle kuvvet ölçümünde dikkati çeken en önemli husus, kullanılacak dinamometrelerin özel olarak geliştirilmesi veya mevcut dinamometrelerin tezgah üzerine adaptasyonununun gerekmesidir [20].

Bu çalışmada, azdırma yöntemi ile düz dişli çark işlenmesi sırasında azdırma çakıda meydana gelen kesme kuvveti bileşenlerinin kesme parametreleri ile olan ilişkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca sonuçların varyans (ANOVA) ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. ANOVA sonuçlarına göre kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki katkı oranları belirlenmiştir.

## 2. MATERYAL ve METOD (MATERIAL AND METHOD)

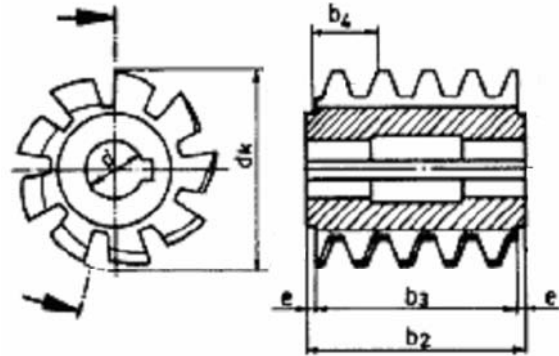
### 2.1. Deneysel Malzemesi ve Ekipmanlar (Experimental Material and Equipments)

Kesme deneyleri, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Talaşlı Üretim Anabilim Dalı Freze Atelyesinde bulunan universal azdırma freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Tablo 1’de tezgahın özellikleri verilmiştir. Deneylerde kesici takım olarak kullanılmak üzere, TS 11133’e uygun olarak B1 sağ RP I x 2.25 tipi azdırma çakı seçilmiştir. Deneylerde

**Tablo 1.** Takım tezgahının özellikleri (Properties of machine tool)

| VEBZAHNSCHNEIDE MASCHINENFABRIK<br>MODUL ZFWZ 250 x 2,5 |                                       |
|---|---------------------------------------|
| Motor gücü  | 5,6 kW                                |
| İlerleme değerleri                                      | 0,25 – 0,4 – 0,63 – 1 – 1,6 – 2,5 - 4 |
| Devir sayıları (dev/dak)                                | 125 - 151 - (175 - 190)               |
| Max. frezeleme genişliği                                | 125 mm                                |
| İşlenebilecek max. parça çapı                           | 250 mm                                |
| Max. Kesici çapı  | 80 mm                                 |
| İşlenebilecek max. modül                                | 2,5 mm                                |

kiyaslama yapabilmek için HSS ve TiN kaplamalı HSS azdırma çakılar kullanılmıştır. Şekil 1’de deneylerde kullanılan azdırmanın şekli ve temel ölçüleri verilmiştir.



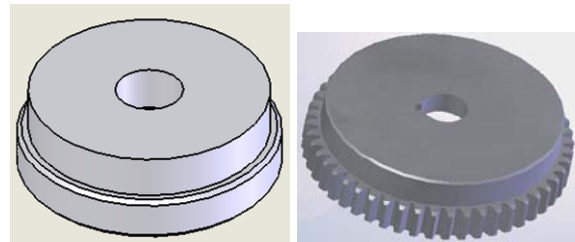
| Modül | d <sub>k</sub> | b <sub>2</sub> | b <sub>3</sub> | b <sub>4</sub> | e | Ayar Açısı | Talaş kanalı sayısı | Kavrama Açısı |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|------------|---------------------|---------------|
| 2,25  | 70             | 56             | 50             | 11             | 3 | 2°         | 12                  | 20°           |

**Şekil 1.** Azdırmanın şekli ve temel ölçüleri (mm) [21] (Basic dimensions and shape of hob)

Kesme deneylerinde kullanılacak dişli çark taslakları, dişli çark yapımında çok tercih edilen özellikle de büyük güç ileten dişli çarklarda kullanılan 83,5 HRB sertliğinde Ç 8620 sementasyon çeliği malzemeden CNC torna tezgahında kesme sıvısı kullanılarak 117 mm çapında hazırlanmıştır. Numuneler her hangi bir ısıtma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır. Tablo 2’de deney numunesinin kimyasal özellikleri, Şekil 2’de deney numunesinin resmi ve temel ölçüleri verilmiştir.

**Tablo 2.** Deney numunesinin kimyasal özellikleri (Properties of experimental specimen)

| MKE   | Kimyasal Bileşim (% ağırlık) |      |     |       |       |     |     |     |       |
|-------|------------------------------|------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-------|
|       | C                            | Si   | Mn  | P     | S     | Cr  | Ni  | Mo  | Fe    |
| Ç8620 | 0,2                          | 0,25 | 0,7 | 0,035 | 0,035 | 0,5 | 0,5 | 0,2 | Kalan |



| Düz Dişli Çark    |       |
|-------------------|-------|
| Modül (m)         | 2,25  |
| Diş sayısı (z)    | 50    |
| Diş derinliği (h) | 4,875 |
| Diş genişliği (B) | 18    |

**Şekil 2.** Deney numunesi (Experimental specimen)

### 2.2. Deneysel Şartları (Experimental Conditions)

Kesme deneylerinin tamamı Tablo 3’de verilen kesme parametreleri kullanılarak yapılmıştır. Deneyler kuru

kesme şartlarında Zıt yönlü kesme yönteminde ve Şekil 3-a'da verilen şematik gösterime uygun olarak yapılmıştır. Ayrıca burada kuvvetlerin yönlerini de görmek mümkündür. Tabloda belirtilen bir diğer ayrıntıya bakılırsa, kesme derinliğinin diğer talaşlı imalat işleme deneylerinin aksine değişken bir parametre olarak değil sabit bir parametre olarak ortaya çıkmasıdır. Bunun nedeni azdırma ile dişli çark üretimi işleminin doğası gereği toplam kesme derinliğinin bir defada verilmesidir. Toplam diş derinliği, azdırma ve iş parçasının birbirleri ile koordineli hareketleri sonucunda oluşmaktadır.

**Tablo 3.** Azdırma çakı ve kesme parametreleri (Hob and cutting parameters)

| Parametre              | Değerler                                    |
|------------------------|---|
| Kesme Hızı (m/dak)     | 27,5 – 33,22 – 38,5 – 41,8                  |
| İlerleme (mm/iş devri) | 0,25 – 0,4 – 0,63 – 1                       |
| Kesme Derinliği (mm)   | 4,87  |
| Modül (mm)             | 2,25  |
| Kullanılan Çakı        | Kaplamasız HSS ve TiN kaplamalı HSS azdırma |

Deneylerin tamamı Şekil 3-b'deki resimde görülen deney setinde gerçekleştirilmiştir. Bu deney setinde azdırma ile dişli çark açılması esnasında oluşan kesme kuvveti bileşenleri, KİSTLER 9272A dört bileşenli piezo-elektrik dinamometre aracılığı ile ölçülmüştür bileşenlerinin yönleri de verilmiştir.

### 2.3. İstatistiksel Analiz (Statistical Analysis)

Kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkilerini çizgi grafiklerde büyük oranda görmek mümkündür. Ancak daha detaylı bir bilgiye ulaşmak için MINITAB R14 yazılımı kullanılarak % 95 güven düzeyinde ANOVA testi (varyans analizi) uygulanmıştır. Her deney grubu için tam faktoriyel deney tasarımı uygulanmıştır. Deneyler için kesme hızı, ilerleme ve kesici takım kaplaması değişken parametreler (kontrol faktörleri) olarak belirlenmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 4'de verilmiştir. ANOVA tabloları kesme kuvveti bileşenleri üzerinde her bir işleme parametresinin etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır. ANOVA tablolarına ek olarak

çıkarılan etki grafikleri her bir parametre grubundaki seviye etkilerinin belirlenmesinde ve birbirini üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında yardımcı olmaktadır. ANOVA testleri özellikle deneysel sonuçların doğru bir şekilde yorumlanmasında yardımcı olmuştur. Ayrıca kuvvet bileşenlerinin çoklu regresyon analizleri de yapılmıştır.

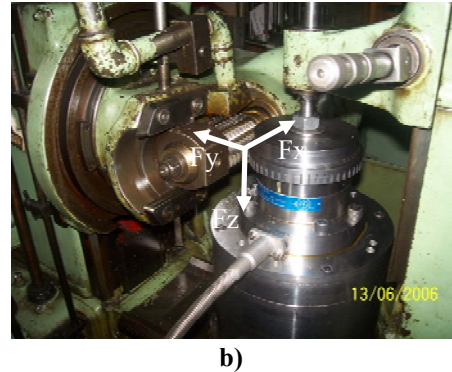
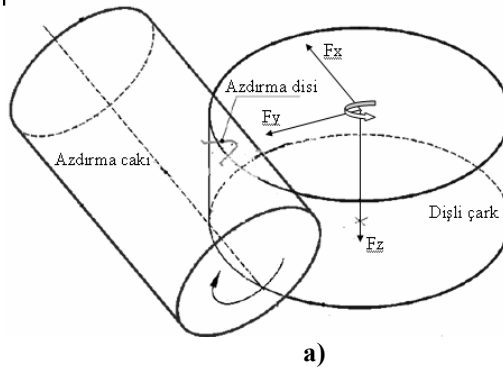
**Tablo 4.** Kontrol faktörleri ve seviyeleri (Control factors and its levels)

| Sembol | Parametre            | Seviyeler  |               |      |      |
|--------|----------------------|------------|---------------|------|------|
|        |                      | 1          | 2             | 3    | 4    |
| K      | Kaplama              | Kaplamasız | TiN kaplamalı | --   | --   |
| Vc     | Kesme Hızı m/dak     | 27,5       | 33,22         | 38,5 | 41,8 |
| f      | İlerleme mm/iş devri | 0,25       | 0,4           | 0,63 | 1    |

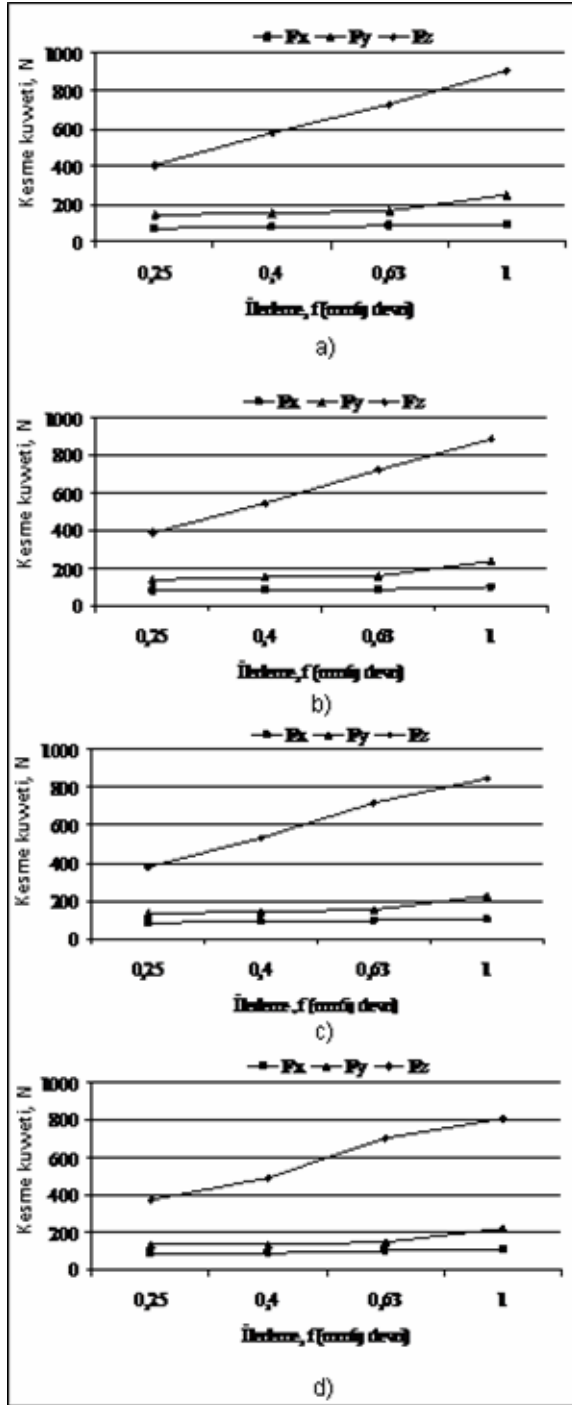
## 3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND EVALUATION)

### 3.1. Kuvvet Sonuçlarının Değerlendirilmesi (Evaluation of Experimental Results of Force)

Kesme kuvveti bileşenlerinin kesme parametreleri ile olan ilişkilerinin tespiti için tam kesme sırasında ölçülen kuvvetlerin ortalaması kullanılmıştır. Şekil 4'te kaplamasız HSS azdırma ile yapılan deneylerde ölçülen kuvvet değerleri verilmiştir. Şekildeki grafiklere göre tüm deneyler için ilerleme değerindeki artışa paralel olarak kesme kuvveti bileşenlerinin değerlerinin arttığı gözlenmiştir. İlerleme yönündeki kuvvet olan Fz bileşenin gerek değerinin gerekse görülen artışın diğer bileşenlere göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Tüm bileşenler için en yüksek kuvvet değerlerinin kesme hızının 27,5 mm/dak ve ilerlemenin 1 mm/iş devri olduğu kesme şartlarında elde edilmiştir. Burada, Fx: 94,84 N, Fy: 248,9 N ve Fz: 904,71 N olarak ölçülmüştür. İlerlemenin artması ile talaş kesiti arttığından kesme kuvvetlerinin de artması beklenir [22,23]. Şekil 4'deki grafiklere bakılırsa, Fx kuvvet bileşeni, ilerlemedeki değişimden diğerlerine göre daha az etkilenmektedir. Bu durum azdırma işleminin yapısı ile ilgilidir. Azdırma işleminde çakı ve iş parçasının temas ettiği noktada dönüş Fx



**Şekil 3. a)** Azdırma işleminde kuvvet yönleri (Directions of force in hobbing), **b)** Deney setinin fotoğrafları (Photos of experimental setup)



a)  $V_c=27,5$  m/dak b)  $V_c=33,22$  m/dak

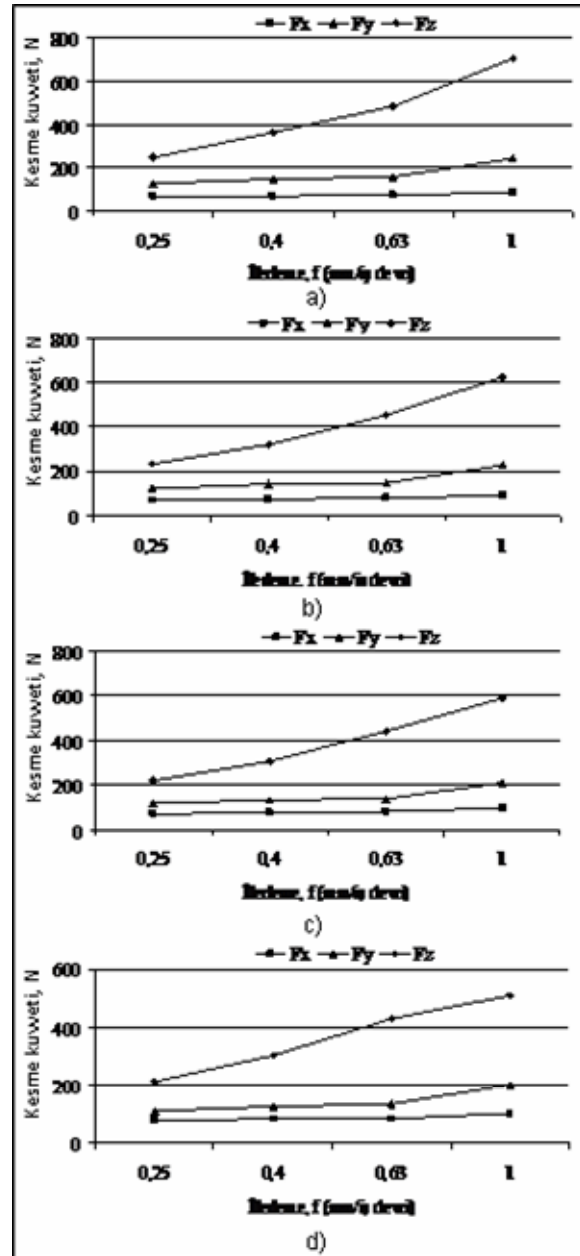
c)  $V_c=38,5$  m/dak d)  $V_c=41,8$  m/dak

**Şekil 4.** HSS azdırmada kesme kuvveti bileşenlerinin ilerlemeye göre değişimi (Variation of cutting force components against feed rate in HSS hob)

kuvvetinin doğrultusundadır (Şekil 3-a ve b). Azdırma çakı ve iş parçası birbirleri ile uyumlu döndüklerinden ilerlemedeki artış bu dönüşü etkilememektedir. Kaplamasız HSS azdırma ile yapılan deneylerde, tüm kesme hızlarında 0,25 mm/iş devri ilerleme değerinin 4 kat artmasıyla Fx kesme kuvveti bileşeni ortalama % 26 (ortalama 20,88 N) artmıştır. Fy bileşeninde görülen artış Fx'e göre biraz daha fazladır. İlerlemenin 4 kat artmasıyla Fy kesme kuvveti bileşeni

ortalama %70 (ortalama 96 N) artmıştır. Fz kuvvet bileşeni dört kesme hızında da ilerlemedeki artışlara daha fazla duyarlı olmuştur. İlerlemenin 4 kat artmasıyla Fz kuvvetinin değeri ortalama olarak % 120 artmıştır.

Şekil 5'e bakıldığında; TiN kaplanmış azdırma ile yapılan kesme işleminde, kaplamasız HSS azdırmada olduğu gibi, ilerleme değerindeki artışa paralel olarak kesme kuvveti bileşenlerinin arttığı görülmektedir. Fz bileşenindeki artışın diğerlerine göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Fz için hesaplanan artış oranı ortalama % 165 olmuştur. TiN kaplamalı azdırmada



a)  $V_c=27,5$  m/dak b)  $V_c=33,22$  m/dak

c)  $V_c=38,5$  m/dak d)  $V_c=41,8$  m/dak

**Şekil 5.** TiN kaplanmış HSS azdırmada kesme kuvveti bileşenlerinin ilerlemeye bağlı olarak değişimi (Variation of cutting force components depending on feed rate in TiN coated HSS hob)

en yüksek değerler, kesme hızının 27,5 mm/dak ve ilerlemenin 1 mm/iş devri olduğu kesme şartlarında elde edilmiştir. Burada,  $F_x$ : 86,65 N,  $F_y$ : 243,09 N ve  $F_z$ : 703,64 N olarak ölçülmüştür. Şekil 5'deki grafiklere incelendiğinde;  $F_x$  bileşeni, ilerlemedeki değişimden diğer bileşenler kadar etkilenmediği ve ölçülen değerlerin kaplamasız azdırmada elde edilen değerlere yakın çıktığı ölçülmüştür. Bu durumda buradaki değişimin uygulanan deney parametreleri ile kayda değer bir ilişkisinin bulunmadığı söylenebilir. Aynı şekilde,  $F_y$  kuvveti için ölçülen değerler de kaplamasız azdırmada ölçülen değerlere yakın çıkmıştır.

Kaplamasız azdırma ve kaplamalı azdırmada ölçülen  $F_x$  ve  $F_y$  kuvvet bileşenleri arasında tüm deneylerde 5 ila 20 N arasında değişen bir fark göze çarpmaktadır. Özellikle  $F_z$  kuvveti değerleri ve parametrelere göre değişimi dikkate alınır,  $F_x$  ve  $F_y$ 'nin kaplamalı veya kaplamasız oluşundan kaynaklanan farkların çok önemli olmadığı söylenebilir. Tüm kesme hızlarında 0,25 mm/iş devri ilerleme değerinin 4 kat artmasına karşılık  $F_x$  kesme kuvveti bileşeni ortalama % 30,75 (yaklaşık 21,55 N) oranında artmıştır.  $F_y$  bileşeninde görülen artış  $F_x$ 'e göre biraz daha fazladır. Bu da ortalama % 84,75 (yaklaşık 101,17 N) oranında artış olarak belirlenmiştir.

Azdırma işleminde kesme kuvveti bileşenlerinin en büyüğü olan ve kesme parametrelerinden daha fazla etkilenen ilerleme yönündeki  $F_z$  kuvvetinin bir değerlendirilmesi yapılırsa Şekil 4 ve Şekil 5'teki grafiklerden ilerlemedeki artıştan kaplamalı azdırmanın diğerine göre oransal olarak biraz daha fazla etkilendiği söylenebilir. İlerlemeye bağlı olarak elde edilen artış oranları Tablo 5'te verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen grafiklerde, kaplamalı azdırmalarda elde edilen  $F_z$  kuvveti kaplamasız azdırmalarda elde edilen  $F_z$  kuvvetinden ortalama % 59 daha az olmuştur. Bunun nedeni için, TiN kaplamanın özelliği itibarı ile II. deformasyon bölgesinde kesici takım ve talaş arasındaki sürtünmeyi azaltarak kesme kuvvetlerinin düşmesini sağlayabilmesi söylenebilir [24].

**Tablo 5.** İlerlemeye göre  $F_z$  kesme kuvveti bileşeninin artış oranları (Rising ratio of cutting force component  $F_z$  according to feed rate)

| Kesme Hızı (m/dak) | Kaplamasız HSS | TiN Kaplamalı HSS |
|--------------------|----------------|-------------------|
| 27,5               | %120           | %181              |
| 33,22              | %130           | %169              |
| 38,5               | %123           | %165              |
| 41,8               | %116           | %138              |

Deneyler sonrası elde edilen kesme kuvveti sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde; kesme kuvveti bileşenlerinden  $F_x$  bileşeni her iki azdırma tipinde de ilerlemeden daha fazla etkilenmektedir. Aynı kuvvet bileşeni kesme hızından da ters yönde etkilenmektedir. Bu durum azdırma işleminin kinematik yapısı ile

ilgilidir.  $F_y$  bileşeni  $F_x$ 'e nazaran ilerleme ve kesme hızından etkilenmiştir. İlerleme yönündeki  $F_z$  bileşeni kesme parametrelerindeki değişimlere karşı daha duyarlı olmuştur. Özellikle kaplamanın  $F_z$  kuvveti üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir.

### 3.2. Kesme Kuvveti Sonuçlarının İstatistiksel Analizi (Statistical Analysis of Results of Cutting Force)

Yapılan deneylerde kesme kuvveti bileşenleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün girdi olarak kullanılan kesme hızı, ilerleme ve kesici takım kaplaması kontrol faktörlerine göre değiştiği kabul edilmiş ve bu kabule dayalı olarak varyans analizi (ANOVA) ve çoklu regresyon analizi yapılmıştır.

Tablo 6'da verilen varyans analizi sonuçlarına göre  $F_x$  kesme kuvveti bileşeni üzerinde % 95 güven düzeyinde % 58,15 katkı oranı ile ilerleme en etkin parametre olarak ortaya çıkmıştır. İkinci önemli faktörün de % 21,45 katkı oranı ile kesme hızının olduğu görülmektedir.  $F_x$  bileşeni için  $K^*V_c$ ,  $K^*f$  ve  $V_c*f$  etkileşimlerinin  $F_y$  bileşeni için de  $K^*V_c$  etkileşiminin anlamsız olduğu, bir başka deyişle  $F_y$  bileşeni üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir. İlerlemenin  $F_y$  kesme kuvveti bileşeni üzerindeki etkisinin % 91,95 katkı oranı ile istatistiksel olarak oldukça büyük olduğu görülmektedir.  $F_z$  kuvvet bileşeninin varyans analizi sonuçlarına göre % 64,92 katkı oranı ile ilerleme en etkin parametre olarak ortaya çıkmıştır. Kaplamanın katkı oranı % 31,1 değeri ile ikinci etkin parametre olmuştur. TiN kaplamanın kesme sırasında takım-talaş ara yüzeyinde

**Tablo 6.** Kesme kuvveti bileşenleri için ANOVA sonuçları (ANOVA results for cutting force components)

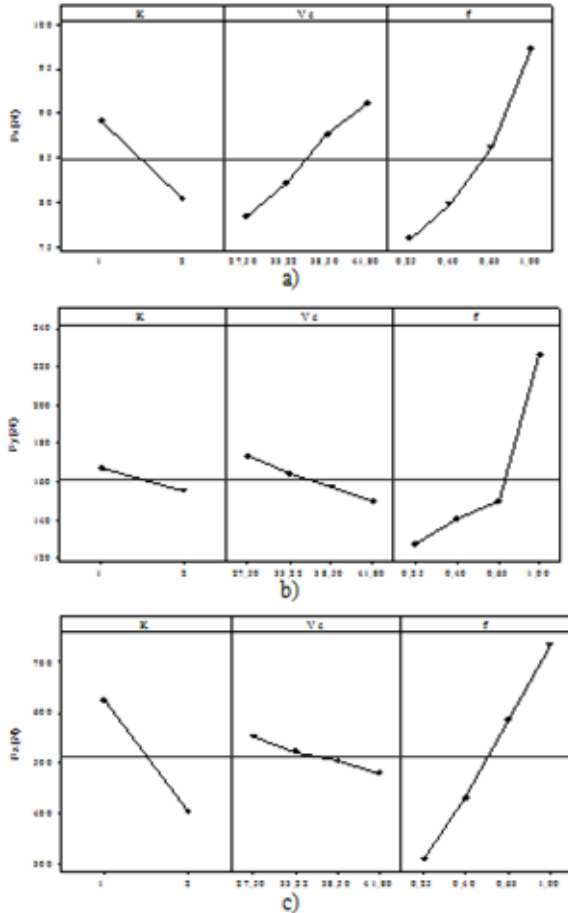
| Faktör                                  | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Varyans | F değeri | P değeri | % KO  |
|---|---------------------|-----------------|---------|----------|----------|-------|
| <b><math>F_x</math> kuvvet bileşeni</b> |                     |                 |         |          |          |       |
| K                                       | 1                   | 618,99          | 618,99  | 182,19   | 0,000    | 17,4  |
| $V_c$                                   | 3                   | 769,39          | 256,46  | 75,49    | 0,000    | 21,45 |
| $f$                                     | 3                   | 2068,29         | 689,43  | 202,92   | 0,000    | 58,15 |
| $K^*V_c$                                | 3                   | 8,29            | 2,76    | 0,81     | 0,518    | 0,05  |
| $K^*f$                                  | 2                   | 26,94           | 8,98    | 2,64     | 0,113    | 0,57  |
| $V_c*f$                                 | 9                   | 16,48           | 1,83    | 0,54     | 0,815    | 0,4   |
| Hata                                    | 9                   | 30,58           | 3,40    |          |          | 1,98  |
| Toplam                                  | 31                  | 3538,97         |         |          |          | 100   |
| <b><math>F_y</math> kuvvet bileşeni</b> |                     |                 |         |          |          |       |
| K                                       | 1                   | 1173,5          | 1173,5  | 237,09   | 0,000    | 2,28  |
| $V_c$                                   | 3                   | 2383,2          | 794,4   | 160,51   | 0,000    | 4,61  |
| $f$                                     | 3                   | 47226,3         | 15742,1 | 3180,65  | 0,000    | 91,95 |
| $K^*V_c$                                | 3                   | 29,9            | 10,0    | 2,01     | 0,183    | 0,03  |
| $K^*f$                                  | 2                   | 138,3           | 46,1    | 9,31     | 0,004    | 0,25  |
| $V_c*f$                                 | 9                   | 349,1           | 38,8    | 7,84     | 0,003    | 0,59  |
| Hata                                    | 9                   | 44,5            | 4,9     |          |          | 0,29  |
| Toplam                                  | 31                  | 51344,8         |         |          |          | 100   |
| <b><math>F_z</math> kuvvet bileşeni</b> |                     |                 |         |          |          |       |
| K                                       | 1                   | 393833          | 393833  | 1389,74  | 0,000    | 31,10 |
| $V_c$                                   | 3                   | 22554           | 7518    | 26,53    | 0,000    | 1,71  |
| $f$                                     | 3                   | 822189          | 274063  | 967,10   | 0,000    | 64,92 |
| $K^*V_c$                                | 3                   | 800             | 267     | 0,94     | 0,461    | 0,004 |
| $K^*f$                                  | 2                   | 14353           | 4784    | 16,88    | 0,000    | 1,09  |
| $V_c*f$                                 | 9                   | 8828            | 981     | 3,46     | 0,039    | 0,49  |
| Hata                                    | 9                   | 2550            | 283     |          |          | 0,686 |
| Toplam                                  | 31                  | 1265107         |         |          |          | 100   |



sürtünmeyi azaltarak I. ve II. deformasyon bölgesinde kaymayı kolaylaştırması kesme kuvvetini azalttığından kaplamanın kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi göz ardı edilemez. Fz kuvveti için  $K \cdot V_c$  etkileşimi istatistiksel olarak % 95 güven seviyesinde anlamsız çıkmıştır.

Şekil 6'da ana faktör seviyelerinin kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkileri verilmiştir. Burada her bir seviyede elde edilen ortalama kuvvet değerleri verilmiştir. Buna göre; Fx: 84,82 N, Fy: 161,25 N ve Fz: 514,365 N ortalama kuvvet değerlerine sahiptirler. Kesme hızındaki değişim her ne kadar Fx bileşenini etkiliyor gibi görünse de genel itibari ile her üç kuvvet bileşeninin üzerinde de önemli bir etkisi görülmemektedir. Kaplama parametresinin Fz kuvveti üzerinde meydana getirdiği değişim diğerlerine göre daha fazladır. Bu farkın nedeni olarak; TiN kaplama ile talaş yüzeyinde takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin azalması gösterilebilir [25]. Fz kuvvetinin kesme kuvveti bileşenlerinin en büyüğü olması nedeniyle Fz kuvvet bileşeninin ilerleme faktör seviyelerinde ki değişimlere daha duyarlı olduğu söylenebilir.

Yapılan regresyon analizi sonucu, istatistiksel model sabiti ve değişkenlerin katsayı tablosu Tablo 7'de



**Şekil 6.** Azdırma işleminde kesme parametrelerinin kesme kuvveti bileşenleri üzerindeki etkileri (Effects of cutting parameters on cutting force components at hobbing)

**Tablo 7.** Fx için model sabitleri ve değişkenlerin katsayı tablosu (Model constants for Fx and table of coefficient of variables)

| Faktörler                 | Katsayı | SE Katsayı | T      | P     |
|---------------------------|---------|------------|--------|-------|
| <b>Fx kuvvet bileşeni</b> |         |            |        |       |
| Sabit                     | 50,116  | 2,413      | 20,77  | 0,000 |
| K                         | -8,796  | 0,643      | -13,68 | 0,000 |
| Vc                        | 0,899   | 0,059      | 15,16  | 0,000 |
| f                         | 28,422  | 1,137      | 24,99  | 0,000 |

verildiği gibi oluşmuştur. Parametre etkileri incelendiğinde değişkenlerden en büyük etkiye ilerlemenin (f) sahip olduğu ve kaplamanın Fx kuvvet bileşenine ters etki ettiği görülmüştür.

Analiz sonucunda geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayısının  $R^2 = 0,97$  olarak bulunması, modelin uygunluğunun yüksek olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, bağımsız değişkenler olan kesme hızı, ilerleme ve kaplamanın Fx kuvvet bileşeni üzerindeki etkisi % 97'dir. Geliştirilen model Eşitlik 1'de verilmiştir. Geliştirilen istatistiksel modelin uygunluğu varyans analizi kullanılarak kontrol edilmiş (Tablo 8) ve modelin P değerine bağlı olarak %95 güven düzeyinde uygun olduğu görülmüştür.

$$F_x = 50,1 - 8,80 K + 0,899 V_c + 28,4 f \quad (1)$$

**Tablo 8.** Fx bileşeni modeli için varyans analizi tablosu (Variance of analysis table for Fx component model)

| Kaynak       | SD | KT     | KO     | F      | P     |
|--------------|----|--------|--------|--------|-------|
| Model        | 3  | 3446,3 | 1148,8 | 347,23 | 0,000 |
| Artık (Hata) | 28 | 92,6   | 3,3    |        |       |
| Toplam       | 31 | 3539,0 |        |        |       |

Tablo 9'da Fy kuvvet bileşeni için yapılan regresyon analizinin sonucunda elde edilen istatistiksel model sabiti ve değişkenlerin katsayı tablosu verilmiştir. Parametre etkileri incelendiğinde Fy kuvvet bileşeni için de değişkenlerden en büyük etkiye ilerlemenin (f) yaptığı görülmüştür. Kaplamanın ve kesme hızının Fy kuvvet bileşenine ters etki ettiği görülmüştür. Geliştirilen istatistiksel modelin belirlilik katsayısı  $R^2 = 0,90$  olarak bulunmuştur. Bağımsız değişkenler olan kesme hızı, ilerleme ve kaplamanın Fy kuvvet bileşeni üzerindeki etkisi % 90 düzeyinde ortaya çıkmıştır. Fy kuvvet bileşeni için geliştirilen model Eşitlik 2'de verilmiştir. Fy kuvvet bileşeni istatistiksel modelinin uygunluğu varyans analizi kullanılarak test edilmiş (Tablo 10) ve modelin P değerine bağlı olarak %95 güven düzeyinde uygun olduğu görülmüştür.

**Tablo 9.** Fy için model sabitleri ve değişkenlerin katsayı tablosu (Model constants for Fy and table of coefficient of variables)

| Faktörler                 | Katsayı | SE Katsayı | T     | P     |
|---------------------------|---------|------------|-------|-------|
| <b>Fy kuvvet bileşeni</b> |         |            |       |       |
| Sabit                     | 161,14  | 17,18      | 9,38  | 0,000 |
| K                         | -12,111 | 4,579      | -2,64 | 0,013 |
| Vc                        | -1,584  | 0,422      | -3,75 | 0,001 |
| f                         | 129,814 | 8,097      | 16,03 | 0,000 |

$$F_y = 161 - 12,1 K - 1,58 V_c + 130 f \quad (2)$$

**Tablo 10.** Fy bileşeni modeli için varyans analizi tablosu (Variance of analysis table for Fy component model)

| Kaynak       | SD | KT    | KO    | F     | P     |
|--------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Model        | 3  | 46648 | 15549 | 92,69 | 0,000 |
| Artık (Hata) | 28 | 4697  | 168   |       |       |
| Toplam       | 31 | 51345 |       |       |       |

Fz kuvvet bileşeni için yapılan regresyon analizi sonucu, istatistiksel model sabiti ve değişkenlerin katsayı tablosu Tablo 11'de verilmiştir. Faktörlerin etkileri incelendiğinde diğer kuvvet bileşenlerinde olduğu gibi değişkenlerden en büyük etkiye ilerlemenin (f) sahip olduğu görülmüştür. Fz kuvvet bileşeni-ne kaplamanın ve kesme hızının ters etki ettiği görülmüştür. Geliştirilen modelin (Eşitlik 3) belirlilik katsayısı  $R^2 = 0,96$  olmuştur. Fz kuvvet bileşeni üzerinde bağımsız değişkenler olan kesme hızı, ilerleme ve kaplamanın etkisi % 97'dir. Fz kuvvet bileşeni istatistiksel modelinin güvenilirliği varyans analizi kullanılarak kontrol edilmiş (Tablo 12) ve istatistiksel modelin P değerine bağlı olarak %95 güven düzeyinde uygun olduğu görülmüştür.

$$F_z = 700 - 222 K - 4,86 V_c + 559 f \quad (3)$$

**Tablo 11.** Fz için model sabitleri ve değişkenlerin katsayı tablosu (Model constants for Fz and table of coefficient of variables)

| Faktörler                 | Katsayı | SE Katsayı | T      | P     |
|---------------------------|---------|------------|--------|-------|
| <b>Fz kuvvet bileşeni</b> |         |            |        |       |
| Sabit                     | 699,73  | 55,08      | 12,70  | 0,000 |
| K                         | -221,88 | 14,68      | -15,12 | 0,000 |
| Vc                        | -4,86   | 1,35       | -3,59  | 0,001 |
| f                         | 559,45  | 25,96      | 21,55  | 0,000 |

**Tablo 12.** Fz bileşeni modeli için varyans analizi tablosu (Variance of analysis table for Fz component model)

| Kaynak       | SD | KT      | KO     | F      | P     |
|--------------|----|---------|--------|--------|-------|
| Model        | 3  | 1216841 | 405614 | 235,30 | 0,000 |
| Artık (Hata) | 28 | 48266   | 1724   |        |       |
| Toplam       | 31 | 1265107 |        |        |       |

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Deney sonuçlarına göre kesme kuvvetlerinin, kesme hızından daha çok ilerleme değerinden etkilendiği ortaya çıkmıştır. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak Fy ve Fz kesme kuvveti bileşenleri değerlerinin azaldığı, Fx bileşeni değerinin ise bir miktar arttığı görülmektedir. Bunun nedeninin kesme hızının artması ile bu noktada iş parçasının daha hızlı dönmesi ve "x" yönündeki birim zamandaki temas sayısının bir miktar artışı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.
- İlerleme yönündeki Fz bileşeninin kesme parametrelerindeki değişimlere karşı daha duyarlı olduğu görülmüştür.

- Kaplamalı azdırma ile yapılan deneylerde kesme kuvvetleri kaplamasız olanlara göre % 59 oranında daha az çıkmıştır.
- Elde edilen kesme kuvvetleri değerlerinin istatistiksel analiz sonuçlarına göre (ANOVA) ilerleme Fx için % 58,15 Fy için % 91,95 ve Fz için % 64,92 katkı oranları ile en etkin parametre olmuştur. Kaplama % 31,1 katkı oranı ile en fazla Fz kuvvet bileşeni üzerinde etkili olmaktadır.
- Artan kesme kuvvetlerinin talaş kaldırma işlemindeki olumsuz etkileri dikkate alındığında, test edilen işleme parametreleri arasında düşük kesme kuvvetlerinin elde edildiği 0,25 mm/iş devri ilerleme ve 41,8 m/dak kesme hızı parametrelerinin daha uygun olduğu söylenebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

07/2005-11 numaralı proje kapsamında destek ve katkılarından dolayı Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- İpekçioğlu N., "Frezecilik", **Milli Eğitim Basımevi**, 1984.
- Sel S., "Notlar", **HEMA Dişli Fabrikası**, Ankara, 2000.
- Bouzakis K.D., Kombogiannis S., Antoniadis A., Vidakis N., "Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models", **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 124, 42-51, 2002.
- Sulzer G., "Leistungssteigerung bei der Zylinderradherstellung durch genaue Erfassung der Zerspankinematik," Dissertation, **TH Aachen**, 1974.
- Bouzakis K. D., and Antoniadis A., "Optimizing Tool Shift in Gear Hobbing," **CIRP Ann.**, 44, 1995.
- Cooke D.A.D, Welbourn D.B., "Forces in gear hobbing-1", **Machinery (Lond)**, Vol. 111, No. 2860, 475-477, 1967.
- Cooke D.A.D, Welbourn D.B., "Forces in gear hobbing-1", **Machinery (Lond)**, Vol. 112, No. 2882, 258-261, 1968.
- Wakuri A.; Ueno, T.; Ainoura M., "Study of gear hobbing" **Japan Society of Mechanical Engineers – Bulletin**, Vol. 9, No. 34, 409-416, 1966.
- Hannam R.G.; Andrew C., "Analysis of geometry of gear hobbing" **Institution of Mechanical Engineers – Proceedings**, V 182, N 25, 559-570, 1967-1968.
- Thamer "Investigation of the cutting force in hobbing", **Research report**, Aachen Polytechnic, 1964.
- Ziegler "Cutting forces when hobbing straight- and helical tooth spur gears", **Research report**, Aachen Polytechnic, 1966.
- Ohtubo T., "Simple equations for cut amount in hobbing", **Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C**

- Hen/Transactions of the JSME**, Part C Vol. 55, Issue 511, 818-819, 1989.
13. Koenig W., Bouzakis K., "Determination of the time course of the cutting force components in gear hobbing", **ASME**, (Paper) Issue 80 - C2/DET-75, 9, 1980.
  14. Bashkirov, V.N., "Experimental study of the dynamics of hobbing with coarse-module hobs", **Soviet Engineering Research**, Vol. 4, Issue 12, 67-69, 1984.
  15. Deb Sr., Bhattacharyya A., "Forces in gear cutting", **Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division**, Vol. 51, Issue 5 pt ME3, 102-107, 1971.
  16. Bhattacharyya A, Deb Sr., "Mechanics of gear hobbing", **ASME- 69-WA/Prod-7**, 6 1969.
  17. Ohtubo T., "Study on designing gear cutting fixtures", **Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the JSME**, Part C Vol.55, Issue 515, 1820-1822, 1989.
  18. Ali K. A., "Experimental determination of relationship of cutting force with cutting parameters", **Mechanical Engineering Research Bulletin (Dhaka)**, Vol. 7, 29-32, 1984.
  19. Ohtubo T., "Simple equations for prediction of cutting forces in gear hobbing", **Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the JSME** Part C Vol. 55, Issue 511, 820-822, 1989.
  20. Kaçal, A., Gülesin, M., "Azdırma Freze Çakılarında Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi Ve Takım Aşınmasının İncelenmesi Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi", **4rd International Advanced Technologies Symposium**, Konya, 574-580, 2005.
  21. TS 11133, "Kesici Takımlar-modül azdırma freze bıçakları", **TSE**, 1993.
  22. Shaw, M.C., "Metal cutting principles", **Oxford University Press**, Oxford, 1-9, 1989.
  23. Trent, E.M., "Metal cutting", **Butterworths Press**, London, 1-171, 1989.
  24. Habalı, K., "Kesici takım kaplama malzemesinin takım-talaş ara yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2003.
  25. Söderberg, S., "Wear mechanism and tool life of high speed steels related to microstructure", Doktora Tezi, **Uppsala Üniversitesi**, Uppsala, 1982.