

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİŞLİ ÇARK HATALARININ  
GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE ÖLÇÜMÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Fatih KÖSE**

**Anabilim Dalı : DİSİPLİNLER ARASI**

**Programı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2005**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DIŞLI ÇARK HATALARININ  
GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE ÖLÇÜMÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Fatih KÖSE  
(518021001)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2004  
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Ocak 2005**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. M. Turan SÖYLEMEZ  
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Hakan TEMELTAŞ  
Yrd.Doç.Dr. Muzaffer ERTEN**

**OCAK 2005**

## **Önsöz**

Mekatronik mühendisliği yüksek lisans programının bir öğrencisi olmam nedeniyle tez konusu olarak hem makine hem de elektronik ve bilgisayar alanlarının ortak bir endüstriyel problem üzerindeki uygulamalarından biri olan ‘Dişli çarkların boyutlarının görüntü işleme yöntemleri ile kalite kontrolünün yapılması’ konusunu seçtim. Çalışmamda bana yardımcı olan danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Turan Söylemez’e, Yrd. Doç. Dr. Muzaffer Erten’e, Öğr. Gör. Binnur Kurt’a ve Yılmaz Redüktör kalite kontrol bölümü çalışanlarına değerli katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2005

Fatih Köse

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>KISALTMALAR .....</b>                                                          | <b>v</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ .....</b>                                                        | <b>vi</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ .....</b>                                                        | <b>vii</b> |
| <b>SEMBOL LİSTESİ .....</b>                                                       | <b>ix</b>  |
| <b>ÖZET .....</b>                                                                 | <b>x</b>   |
| <b>SUMMARY .....</b>                                                              | <b>xi</b>  |
| <br>                                                                              |            |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                             | <b>1</b>   |
| 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı .....                                               | 1          |
| <br>                                                                              |            |
| <b>2. DIŞLI ÇARK SİSTEMLERİ .....</b>                                             | <b>2</b>   |
| 2.1 Dişli Çarklar ve Kullanım Alanları .....                                      | 2          |
| 2.2 Evolvent Dişli Çarklar .....                                                  | 3          |
| 2.2.1 Evolvent geometrisi (Evolvent fonksiyonu) .....                             | 4          |
| 2.3 Dişli Çark Kavramları ve Boyutları .....                                      | 5          |
| 2.4 Dişli Çarkların Kalite Etkenleri .....                                        | 7          |
| 2.5 Dişli Çarklarda Hataların Ölçülmesi ve Dişli Çarkların Kalite Değerleri ..... | 9          |
| 2.6 Ölçülecek Dişli Çark Parametreleri .....                                      | 10         |
| 2.6.1 Taksimat (hatve) hatası .....                                               | 10         |
| 2.6.2 Dairesellik hatası .....                                                    | 11         |
| 2.6.3 Profil form hatası .....                                                    | 11         |
| 2.6.4 Kavrama açısı hatası .....                                                  | 11         |
| 2.6.5 Diş kalınlığı hatası .....                                                  | 12         |
| 2.6.6 Diş yüksekliği hatası .....                                                 | 12         |
| <br>                                                                              |            |
| <b>3. DIŞLI ÇARK BOYUT ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ .....</b>                                 | <b>13</b>  |
| 3.1 Genel Ölçüm Teknikleri .....                                                  | 14         |
| 3.1.1 Dişli kumpası ile ölçme .....                                               | 14         |
| 3.1.2 Dişli genişlik mikrometresi .....                                           | 14         |
| 3.1.3 Pim veya bilya ile ölçü alma .....                                          | 14         |
| 3.1.4 Master dişli ile yuvarlanma hatasının ölçülmesi .....                       | 15         |
| 3.1.5 Diş yanağı form hatasının ölçülmesi .....                                   | 15         |
| 3.2 Profil Projeksiyon Ölçüm Sistemleri .....                                     | 15         |
| 3.3 Koordinat Ölçüm Cihazları (Coordinate Measuring Machines (CMM)) ....          | 16         |
| 3.4 Görüntü İşleme Sistemleriyle Ölçüm .....                                      | 17         |
| 3.5 Ölçüm Sisteminde Göz önünde Bulundurulacak Hususlar .....                     | 18         |

|                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4. YAZILIMIN OLUŞTURULMASI.....</b>                                                                                                        | <b>20</b> |
| 4.1 Resmi Alma (Capturing Image).....                                                                                                         | 21        |
| 4.2 Görüntü Filtreleme.....                                                                                                                   | 21        |
| 4.3 Kenar Piksellerini Bulma (Edge Detection).....                                                                                            | 23        |
| 4.3.1 Sobel kenar bulma algoritması.....                                                                                                      | 23        |
| 4.3.2 Canny kenar bulma algoritması .....                                                                                                     | 24        |
| 4.3.3 Laplas-Gauss kenar bulma algoritması .....                                                                                              | 25        |
| 4.4 Zincir Kodu (Chain Code) ile Sınır Piksellerin Belirlenmesi .....                                                                         | 26        |
| 4.4.1 Zincir kodu algoritmasının gerçekleştirilmesi .....                                                                                     | 27        |
| 4.5 Dış başı Çapı, Dış Sayısı ve Dışlı Modülünün Belirlenmesi .....                                                                           | 28        |
| 4.6 Dışlı Çark Parametrelerinin Belirlenmesi .....                                                                                            | 29        |
| 4.7 Resim Ölçeğinin Bulunması .....                                                                                                           | 30        |
| 4.8 Dışlı Çark Merkezinin ve Belirlenen Dışlı Parametrelerine göre Evolvent<br>Profillerin Bulunması.....                                     | 31        |
| 4.9 Taksimat Dairesi Üzerindeki Taksimatların (Hatvelerin) Bulunması .....                                                                    | 33        |
| 4.10 Dışlinin Daireselliğinin Kontrolü.....                                                                                                   | 34        |
| 4.11 Dış Kalınlığının Bulunması .....                                                                                                         | 34        |
| 4.12 Dış Yüksekliğinin Bulunması .....                                                                                                        | 35        |
| 4.13 Referans Evolvent Profillerin Bulunması .....                                                                                            | 36        |
| 4.14 Evolvent Profil Hatalarının Belirlenmesi.....                                                                                            | 37        |
| 4.14.1 Profil form sapmasının belirlenmesi .....                                                                                              | 37        |
| 4.14.2 Profil açısı sapmasının belirlenmesi .....                                                                                             | 38        |
| <b>5. DIŞLİLERİN BOYUTSAL ÖLÇÜM İŞLEMİNİN YAPILMASI .....</b>                                                                                 | <b>39</b> |
| 5.1 Dışlılerin Modül ve Kaydırma Faktörlerinin Belirlenmesi.....                                                                              | 39        |
| 5.2 Ölçüm Sonuçları.....                                                                                                                      | 40        |
| 5.3 Servo Kontrollü Sistem ile Dışlı Çark Görüntüsünün Alınması ve Verilenin<br>Geliştirilen Yazılımla İşlenmesi.....                         | 44        |
| <b>6. KOORDİNAT ÖLÇÜM CİHAZINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLARIN<br/>GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARLA<br/>KARŞILAŞTIRILMASI .....</b> | <b>47</b> |
| 6.1 Koordinat Ölçme Cihazında Dışlılerin Ölçümünün Yapılması .....                                                                            | 47        |
| 6.2 Koordinat Ölçüm Cihazı ile Elde Edilen Sonuçların Görüntü İşleme<br>Yöntemleri ile Elde Edilen Sonuçlarla Karşılaştırılması .....         | 48        |
| <b>7. SONUÇ VE TARTIŞMALAR .....</b>                                                                                                          | <b>50</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                                                                                                        | <b>52</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                                                                                             | <b>53</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                                                          | <b>54</b> |

## **KISALTMALAR**

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| <b>ev</b>  | :Evolvent                             |
| <b>inv</b> | :Involute                             |
| <b>DIN</b> | :Deutsches Institut für Normung       |
| <b>ISO</b> | :International Standards Organisation |
| <b>LoG</b> | :Laplacian of Gaussian                |
| <b>CMM</b> | :Coordinate Measuring Machine         |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                       | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Tablo 2.1</b> Kullanma maksadı ve imal usüllerine göre dişli kaliteleri arasındaki dağılım tablosu | 10                     |
| <b>Tablo 3.1</b> Ölçü toleranslarına göre kullanılan ölçme aletleri                                   | 13                     |
| <b>Tablo 5.1</b> Dişli çark modülünün ölçümünde kullanılacak veriler                                  | 39                     |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                   | <b>Sayfa No</b>                                                         |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.1</b>  | Farklı dişli çark tipleri                                               | 2  |
| <b>Şekil 2.2</b>  | Evolventin elde edilmesi                                                | 3  |
| <b>Şekil 2.3</b>  | Evolvent eğrisi                                                         | 4  |
| <b>Şekil 2.4</b>  | Silindirik düz dişli çarkın önemli boyutları                            | 5  |
| <b>Şekil 2.5</b>  | Kavrama doğrusu                                                         | 7  |
| <b>Şekil 2.6</b>  | İmalat yöntemine göre dişli çark kaliteleri                             | 8  |
| <b>Şekil 2.7</b>  | Dişli çarkın çevresel hızına göre kalitesi                              | 8  |
| <b>Şekil 2.8</b>  | Taksimat (Hatve)                                                        | 10 |
| <b>Şekil 2.9</b>  | Dairesellik hatası (salgı)                                              | 11 |
| <b>Şekil 2.10</b> | Profil form hatası                                                      | 11 |
| <b>Şekil 2.11</b> | Kavrama açısı hatası                                                    | 12 |
| <b>Şekil 2.12</b> | Diş kalınlığı                                                           | 12 |
| <b>Şekil 2.13</b> | Diş yüksekliği                                                          | 12 |
| <b>Şekil 3.1</b>  | Dişli genişlik mikrometresi ile diş kontrolü                            | 14 |
| <b>Şekil 3.2</b>  | Pim veya bilya ile yuvarlaklık kontrolü                                 | 15 |
| <b>Şekil 3.3</b>  | Projektör çalışma prensibi                                              | 15 |
| <b>Şekil 3.4</b>  | Profil projeksiyon cihazı (Mitutoyo PJ-H3000F)                          | 16 |
| <b>Şekil 3.5</b>  | Koordinat ölçüm makinesi (Crysta-Aqex C series)                         | 16 |
| <b>Şekil 3.6</b>  | Farklı prob tipleri                                                     | 17 |
| <b>Şekil 3.7</b>  | Görüntü işleme sistemi (Mitutoyo Quick Vision 404)                      | 17 |
| <b>Şekil 3.8</b>  | Kamera ve mesafe sensörleri ile oluşturulan melez sistemler             | 18 |
| <b>Şekil 4.1</b>  | Dişli Çark kalite kontrol sistemi algoritması                           | 20 |
| <b>Şekil 4.2</b>  | Üzerinde çalışılan dişli çark resimleri                                 | 21 |
| <b>Şekil 4.3</b>  | Konvolusyon işleminde kullanılan filtre matrisine göre görüntü değişimi | 22 |
| <b>Şekil 4.4</b>  | Histogram eşitlemesi sonucunda elde edilen görüntüler ve histogramları  | 22 |
| <b>Şekil 4.5</b>  | İki boyutlu Gauss fonksyonu                                             | 24 |
| <b>Şekil 4.6</b>  | $\sigma$ değerlerine göre Canny köşe bulma algoritması sonuçları        | 24 |
| <b>Şekil 4.7</b>  | İki boyutlu LoG fonksyonu                                               | 25 |
| <b>Şekil 4.8</b>  | $\sigma$ değerlerine göre LoG köşe bulma algoritması sonuçları          | 26 |
| <b>Şekil 4.9</b>  | Köşe bulma algoritmalarının sonuçları                                   | 26 |
| <b>Şekil 4.10</b> | Zincir kodu algoritması                                                 | 27 |
| <b>Şekil 4.11</b> | Zincir kodunda kullanılan mask ve dönüş yönleri (d)                     | 27 |
| <b>Şekil 4.12</b> | Zincir kodu tarama matrisinin dönüş yönüne göre değişimi                | 28 |
| <b>Şekil 4.13</b> | Zincir kodu ile elde edilen sınır pikselleri                            | 28 |
| <b>Şekil 4.14</b> | Dişli parametrelerinin belirlenmesi                                     | 29 |
| <b>Şekil 4.15</b> | Dişli çark merkezinin bulunması                                         | 31 |
| <b>Şekil 4.16</b> | Evolvent profillerin bulunması                                          | 32 |
| <b>Şekil 4.17</b> | İki örnek üzerinde merkez noktaların ve evolvent profillerin bulunması  | 32 |

|                   |                                                                         |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.18</b> | Hatvenin bulunması                                                      | 33 |
| <b>Şekil 4.19</b> | Dişli salgısının (yuvarlaklığının) kontrolü                             | 34 |
| <b>Şekil 4.20</b> | Diş kalınlığının bulunması                                              | 34 |
| <b>Şekil 4.21</b> | Diş yüksekliğinin bulunması                                             | 35 |
| <b>Şekil 4.22</b> | Dişli profilleri                                                        | 36 |
| <b>Şekil 4.23</b> | Evolvent profilin çıkartılması                                          | 36 |
| <b>Şekil 4.24</b> | Profil form sapması                                                     | 37 |
| <b>Şekil 4.25</b> | Profil form hatasının bulunması                                         | 37 |
| <b>Şekil 4.26</b> | Profil açısı sapması                                                    | 38 |
| <b>Şekil 5.1</b>  | Dişli üzerinden kumpas ile ölçü alınması                                | 39 |
| <b>Şekil 5.2</b>  | Büyük dişlinin evolvent hataları                                        | 41 |
| <b>Şekil 5.3</b>  | Büyük dişlinin yuvarlaklık ve taksimat hataları                         | 41 |
| <b>Şekil 5.4</b>  | Büyük dişlinin diş kalınlığı ve diş yüksekliği hataları                 | 42 |
| <b>Şekil 5.5</b>  | Küçük dişlinin evolvent hataları                                        | 42 |
| <b>Şekil 5.6</b>  | Küçük dişlinin yuvarlaklık ve taksimat hataları                         | 43 |
| <b>Şekil 5.7</b>  | Küçük dişlinin diş kalınlığı ve diş yüksekliği hataları                 | 43 |
| <b>Şekil 5.8</b>  | Servo sistem ile dişli çarkın görüntüsünün alınması                     | 45 |
| <b>Şekil 5.9</b>  | Servo sistem ile alınan parça görüntüsü                                 |    |
| <b>Şekil 5.10</b> | Taranan dişli çark dış hat koordinatlarının Matlab'e aktarılması        | 46 |
| <b>Şekil 6.1</b>  | Örnek dişlinin Koordinat ölçüm cihazında ölçümlerinin yapılması         | 47 |
| <b>Şekil 6.2</b>  | Küçük dişli çark evolvent profil hatası CMM ölçüm sonuçları             | 47 |
| <b>Şekil 6.3</b>  | Ölçüm alınan dişli çark profilleri                                      | 48 |
| <b>Şekil 6.4</b>  | Elde edilen sonuçların CMM ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması | 49 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                                    |                                                             |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>i</b>                           | :Çevrim oranı                                               |
| <b>w</b>                           | :Açısal hız (rad/sn)                                        |
| <b>n</b>                           | :Dönme hızı (devir/dak)                                     |
| <b>r<sub>b</sub></b>               | :Temel dairesinin yarıçapı                                  |
| <b>φ</b>                           | :Evolventin içinde bulunduğu açı (radyan)                   |
| <b>α</b>                           | :Basınç açısı (radyan)                                      |
| <b>d</b>                           | :Dişli çark taksimat dairesi çapı                           |
| <b>m</b>                           | :Dişli çark Modülü                                          |
| <b>z</b>                           | :Dişli çarkın diş sayısı                                    |
| <b>p</b>                           | :Dişli çark hatvesi                                         |
| <b>x</b>                           | :Profil kaydırma oranı                                      |
| <b>s</b>                           | :Diş kalınlığı                                              |
| <b>e</b>                           | :Diş aralığı                                                |
| <b>h</b>                           | :Diş yüksekliği                                             |
| <b>h<sub>a</sub></b>               | :Diş başı yüksekliği                                        |
| <b>h<sub>f</sub></b>               | :Diş dibi yüksekliği                                        |
| <b>d<sub>b</sub></b>               | :Dişli çark temel dairesi çapı                              |
| <b>ε</b>                           | :Profil kavrama oranı                                       |
| <b>K</b>                           | :Konvolusyon matrisi,                                       |
| <b>P</b>                           | :Görüntü pikseli                                            |
| <b>N</b>                           | :Köşe pikselleri belirlenmiş görüntü                        |
| <b>Scale</b>                       | :Resim/Görüntü ölçeği (mm/piksel)                           |
| <b>d<sub>a</sub></b>               | :Diş başı dairesi çapı (mm)                                 |
| <b>N<sub>piksel</sub></b>          | :Diş başı dairesinin piksel olarak uzunluğu                 |
| <b>d<sub>e1</sub></b>              | :Evolvent profil başlangıç çapı                             |
| <b>d<sub>e2</sub></b>              | :Evolvent profil bitiş çapı                                 |
| <b>x<sub>r</sub> y<sub>r</sub></b> | :Evolvent profil koordinatları                              |
| <b>rt</b>                          | :Taksimat dairesi çapı                                      |
| <b>centre</b>                      | :Dişli merkezi koordinatları                                |
| <b>x<sub>s</sub> y<sub>s</sub></b> | :Zincir kodu ile elde edilen dişlinin sınır koordinatları   |
| <b>p</b>                           | :Dişli çark taksimatları (hatveleri)                        |
| <b>r</b>                           | :Dişli çarkın diş tepe noktalarının değişimi (daireselliği) |
| <b>th</b>                          | :Dişli çarkın diş kalınlıkları                              |
| <b>height</b>                      | :Dişli çarkın diş yükseklikleri                             |
| <b>M</b>                           | :Evolvent profilin kutupsal koordinatları                   |
| <b>err</b>                         | :Evolvent profil form hatası                                |
| <b>p_err</b>                       | :Evolvent profil açısı hatası                               |
| <b>W<sub>k</sub></b>               | :Dişlinin kumpas ile ölçülen diş mesafesi                   |

## ÖZET

Dişli çarklar makine imalatında en çok kullanılan güç ve hareket aktarma elemanlarıdır. Dişli çarkların boyutsal kontrolünün yapılması kalite kontrol süreçlerinin en önemli parçasını oluşturmaktadır. Bu amaçla birçok ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu ölçüm yöntemleri dişli çarkların kalitelerine, dişli çark tipine ve ölçüm işleminin süresine göre belirlenir. Gelişen yeni teknolojiler sayesinde daha hassas, daha hızlı ölçüm yapılabilmektedir. Bilgisayar ve kontrol alanındaki yenilikler görüntü işleme çözümlerinin bu amaçla kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Görüntü işleme ile parçaların boyutlarının tespiti sanayide gün geçtikçe daha sık uygulama alanı bulmaktadır. İşlem hızı, kullanım kolaylığı, yüksek ölçüm hassasiyeti bu sistemlerin en önemli avantajları olarak sayılabilir. İki ve üç boyutlu ölçüm işlemleri görüntü işleme teknolojisi sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Dişli çarkların boyutsal kontrolü de bu sistemlerin özel bir uygulaması olarak sunulmaktadır. Bu çalışmada düz alın dişli çarkların görüntü işleme tekniklerini kullanarak boyutsal kalite kontrolünü gerçekleştirecek yazılım geliştirilmiştir. Dişli çarkların gerek üretim esnasında gerekse çalışma sırasında oluşacak boyutsal deformasyonları geliştirilen yazılım ile tespit edilebilmektedir. Geliştirilen yazılım ölçüm işlemini farklı dişli çarklar için seri olarak yapabilecek şekilde geliştirilmiştir. Farklı dişli çarkların tipini belirleyip standart ölçülerini hesaplar ve kullanıcının her dişli için ayrı ayrı bu verileri girmesine gerek kalmaz. İki numune dişli üzerinde yazılım çalıştırılmış ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Servo kontrollü bir sistem kullanılarak üzerinde çalışılan dişli çark numunelerinin görüntüleri alınmış, geliştirilen yazılım bu görüntü üzerinde çalıştırılıp elde edilen sonuçlar koordinat ölçüm makinasında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Son olarak görüntü işleme teknolojilerinin dişli çarkların boyut ölçümünde kullanılmasının alternatif yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

## **MEASURING GEAR ERRORS BY USING IMAGE PROCESSING METHODS**

### **SUMMARY**

Gears are most commonly used machine elements used for power and motion transmission. Dimensional control of gears is the most important part of quality control processes. For this purpose many measurement techniques are developed. These measurement techniques are determined considering gear quality, gear type and measurement time. With the help of newly developing technologies, more accurate, faster measurements can be performed. Technological progress in computer and control sciences enables the use of image processing solutions for this purpose. Measuring pieces by using image processing methods is being more widely used in industry day after day. Process speed, ease of use, high measuring accuracy are the most important advantages of these systems. Two or three dimensional measurements can be performed by image processing technologies. Dimensional control of gears is an extra benefit of these systems. In this study, a Matlab code that performs dimensional quality control of gears using image processing methods is developed. Advantages and disadvantages are determined by comparing with other methods. The deformations of gears occur during manufacturing or working, can be established by the help of this code. The code can perform measurement process for different gears. It specifies gear type and calculate standard dimensions so user does not have to input these values for each gear. For two sample pieces, the code have been executed and the results have been obtained. The images of the sample gears are captured with a servo controlled system, these images are then analysed using the developed code and then the results obtained are compared with the results obtained from coordinate measuring machine. Lastly, advantages and disadvantages of using image processing techniques in measuring the dimensional quality of gears are determined.

## **1. GİRİŞ**

### **1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı**

Görüntü işleme teknolojisi parçaların boyutsal kontrolü konusunda, gelişen görüntüleme ve bilgisayar teknolojisi sayesinde son yıllarda kendisine gittikçe büyüyen bir uygulama alanı bulmuştur. Bu sistemlerin alternatifi olarak kullanılan sistemlere göre başlıca avantajı çok daha hızlı ölçüm yapabilmeleridir. Yüksek hassasiyette ölçüm yapabilmeleri, seri olarak ölçüm işleminin gerçekleştirilmesine imkan vermeleri, kullanım kolaylığı gibi diğer avantajları sayesinde görüntü işleme teknolojileri boyut ölçümünde oldukça sık kullanılmaktadır. Birçok makine parçasının iki ve üç boyutlu ölçümünde görüntü işleme teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Boyut ölçümü haricinde parça tanıma, hata bulma gibi çok çeşitli uygulamalarda görüntü işleme teknolojileri kullanılabilmektedir.

Bu çalışmada görüntü işleme teknolojisinin makine imalatında en çok kullanılan güç ve hareket aktarma elemanlarından biri olan dişli çarkların boyut kontrolünde kullanılması araştırılmış ve bu konu ile ilgili bir yazılım geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen bu yazılım dişli çarkların boyut ölçümünde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar alternatif yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

## 2. DIŞLİ ÇARK SİSTEMLERİ

### 2.1 Dişli Çarklar ve Kullanım Alanları



Şekil 2.1 Farklı dişli çark tipleri

Dişli çarklar güç ve hareket aktaran makine elemanlarıdır (Şekil 2.1). Güç ve hareket şekil bağına dayalı olarak iletilir. Dişli çark mekanizmaları bir milden diğer bir mile hareket ve güç iletiminde devir sayısını küçültüp büyütmede ve momenti değiştirerek iletmek için kullanılır.

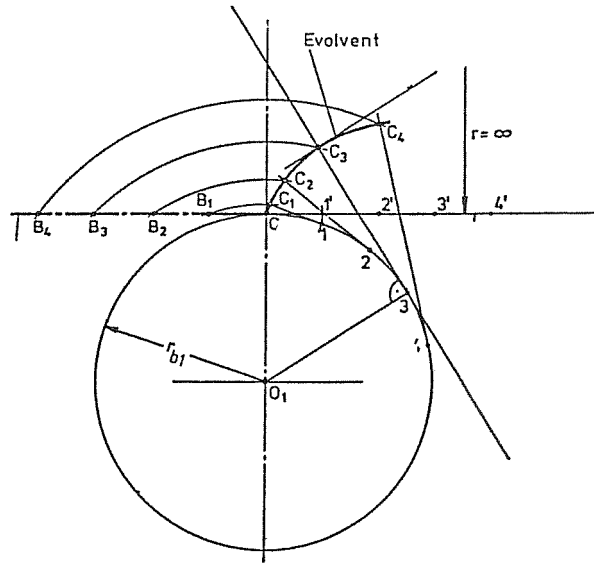
Bir dişli çark mekanizması biri döndüren diğeri döndürülen çark olmak üzere en az iki çarktan oluşmaktadır. Bu iki dişliden küçük olanına pinyon, büyük olanına çark adı verilir.

$$\text{Çevrim oranı: } i = \frac{w_1}{w_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.1)$$

şeklinde yazılır.

## 2.2 Evolvent Dişli Çarklar

Çeşitli avantajlarından dolayı, günümüzde makine imalatında dişliler için hemen hemen sadece evolvent dişliler kullanılır. Evolvent eğrisi,  $r_{b1}$  yarıçapında bir silindirin üzerinde teğet olarak duran bir doğrunun c teğet noktasının, doğrunun kaydırılmadan silindir üzerinde yuvarlanması ile çizdiği eğridir [1] (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Evolventin elde edilmesi

### -Avantajları:

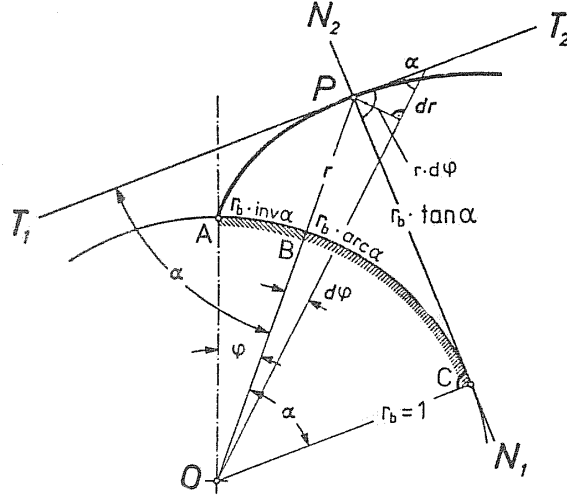
- i-İmalleri basit, kullanışlı ve verimi yüksek dişlilerdir.
- ii-Dişlinin her iki yüzeyi aynı geometrik kurallara göre meydana gelir.
- iii-Eksenler arası mesafede bir hata evolvent dişlilerin çalışmasını engellemez.
- iv-Aynı takımla farklı dişliler elde edilebilir.

### -Dezavantajları:

- i-İki konveks yüzeyin beraber çalışması sonucunda büyük aşınma meydana gelir.
- ii-Dişe gelen radyal yöndeki kuvvetin etkisi fazladır.
- iii-Diş sayısının fazla olması durumunda diş dibi kesilmesi ortaya çıkar.

### 2.2.1 Evolvent geometrisi (Evolvent fonksiyonu)

Yuvarlanma sırasında ana doğru her zaman temel dairesine teğet ve evolvente diktir [1]. Evolvent eğrisinin üzerinde bulunan bir P noktası için (Şekil 2.3);



Şekil 2.3 Evolvent eğrisi

$$AC = CP \quad AC = r_b \cdot (\varphi + \alpha) \quad (2.2)$$

$$CP = r_b \cdot \tan \alpha \rightarrow \varphi = \tan \alpha - \alpha = ev \alpha \quad (2.3)$$

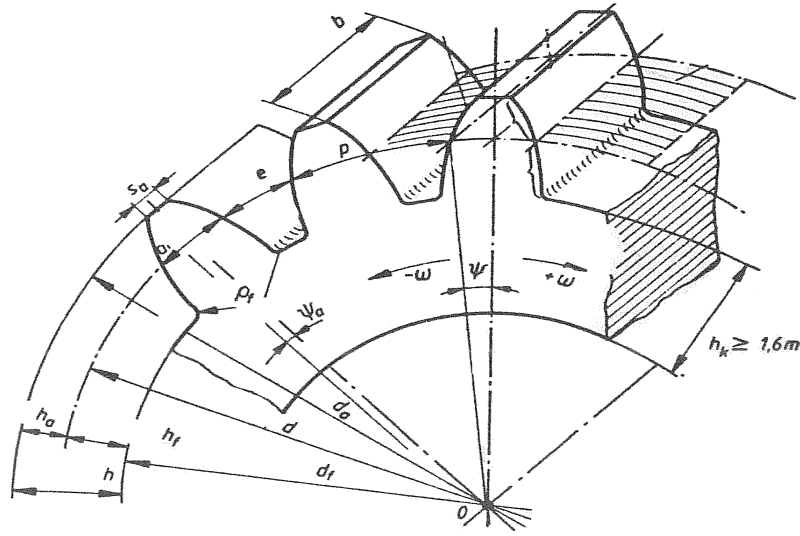
Burada;  $r_b$ =Temel dairesinin yarı çapı

$\varphi$ =Evolventin içinde bulunduğu açı (radyan)

$\alpha$ =Basınç açısı (radyan)

Literatürde;  $ev \alpha$  (evolvent  $\alpha$ ) veya  $inv \alpha$  (involute  $\alpha$ ) kullanılır.  $\varphi=f(\alpha)$  fonksiyonuna evolvent fonksiyonu  $ev \alpha$  adı verilir.

### 2.3 Dişli Çark Kavramları ve Boyutları



Şekil 2.4 Silindirik düz dişli çarkın önemli boyutları

-Taksimat Dairesi: Diş kalınlıklarının, diş aralıklarıyla eşit olarak taksim olduğu daireye taksimat dairesi ( $d$ :taksimat dairesi çapı) denir [1].

$$d = m \cdot z \quad (2.4)$$

$z$ =Dişli çarkın diş sayısı

-Modül  $m$ : Dişli çarklar, temel boyut olarak bilinen modülün büyüklüğüne göre sınıflandırılırlar [1].

$$m = \frac{d}{z} \quad (2.5)$$

Dişlilerin değiştirilmesini kolaylaştırmak ve takım sayısını azaltmak için DIN780'e göre modül standartlaştırılmıştır. Bir dişli çiftinde modüller eşit olmalıdır.

-Taksimat (hatve)  $p$ : Taksimat dairesi üzerinde bir diş kalınlığı ( $s$ ) ile bir diş arası ( $e$ ) boşluğunu kapsayan uzunluğa denir [1].

$$p = s + e \quad (2.6)$$

Taksimat dairesinin çevresi:

$$u = d \cdot \pi = z \cdot p \quad (2.7)$$

Böylece taksimat:

$$p = \frac{d}{z \cdot \pi} = m \cdot \pi \quad (2.8)$$

-Profil kaydırma yöntemi: İmalat sırasında referans profilinin orta doğrusunu geriye doğru çekmektir. Bu yöntemle referans olan kremayer bıçağı belirli bir miktar geriye çekilir. Böylece taksimatı  $p$  ve temel daireyi değiştirmeden sıfır referans profilini geriye doğru kaydırmakla diş dibi kesilmesi önlenir. Profil kaydırma miktarı modülün katı olarak şu şekilde ifade edilir [1].

$$K = (+)X \cdot m \quad (X: \text{Profil kaydırma faktörü}) \quad (2.9)$$

-Diş yüksekliği  $h$ :

$$h = h_a + h_f$$

$$h_a = m(1 \pm x) \quad (2.10)$$

$$h_f = m \cdot (1,25 \mu x) \quad (2.11)$$

-Diş başı dairesi çapı  $d_a$ : Profilin son bulduğu ve çarkın en büyük dairesine diş başı dairesi denir [1].

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = d + 2 \cdot m + 2 \cdot x \cdot m \quad (2.12)$$

-Diş dibi dairesi çapı  $d_f$ : Diş dibinden geçen daireye diş dibi dairesi denir [1].

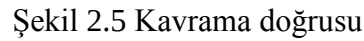
$$d_f = d - 2 \cdot h_f = d - 2,5 \cdot m + 2 \cdot x \cdot m \quad (2.13)$$

-Temel dairesi çapı  $d_b$ : Evolvent profili oluşturmada kullanılan dairenin çapıdır. Profil kaydırma işlemi temel dairesi çapını değiştirmez [1].

$$d_b = d \cdot \cos \alpha \quad (\alpha : \text{Basınç açısı}) \quad (2.14)$$

-Profil kavrama oranı  $\epsilon$ : Şekil 2.5'e göre üstteki dişlinin diş başı  $N_1N_2$  kavrama doğrusunu  $E_2$  noktasında ve alt dişlinin diş başı ise  $E_1$  noktasında kestiklerinden, dişliler ancak  $E_1$  ve  $E_2$  noktaları arasında birbirleri ile temas ederler.

Bu nedenle  $E_1E_2$  doğrusuna kavrama doğrusunun faydalı uzunluğu denir ve bir diş temastan ayrılmadan evvel ikinci bir dişin temasa geçmesi için  $E_1E_2 > p_e$ 'den olmalıdır. Ancak o zaman ( $\epsilon > 1$  olması durumunda) dişli çarklarda hareketin sürekli olması sağlanmış olur [1].

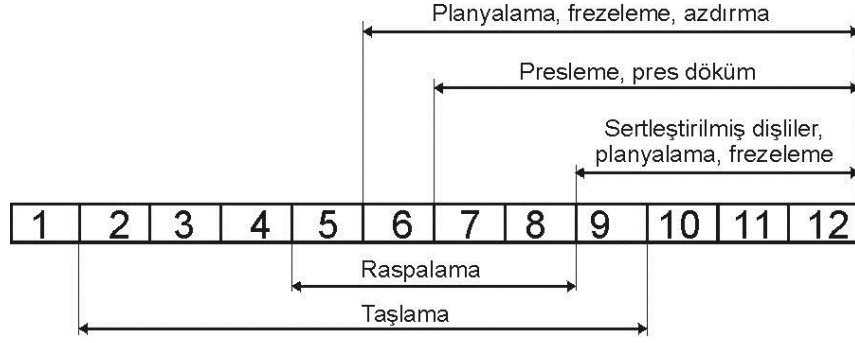


Pratikte kavrama oranı  $\epsilon=1.8-2.1$  arasında seçilir.

## 2.4 Dişli Çarkların Kalite Etkenleri

Her makine parçasında olduğu gibi dişlilerde imalat sırasında bazı hatalar ile imal edilirler. Bu hatalar çalışma fonksiyonlarına göre kabul edilebilir hatalar seviyesinde kaldıkça dişlilerin belirlenen kalitede imal edilmiş olduğu söylenebilir [2].

Dişlinin yük aktarma kabiliyetine, dişli malzemesinin ve dişli geometrisinin etkisi oldukça fazladır. Bilhassa dişlinin çalışırken çıkardığı gürültü şiddeti, dinamik kuvvetlerin etkime derecesi, dişli geometrisinin verildiği dişli işleme yöntemi ve işleme sonucu elde edilen dişli kalitesi, yük aktarma kabiliyeti için çok önemlidir.



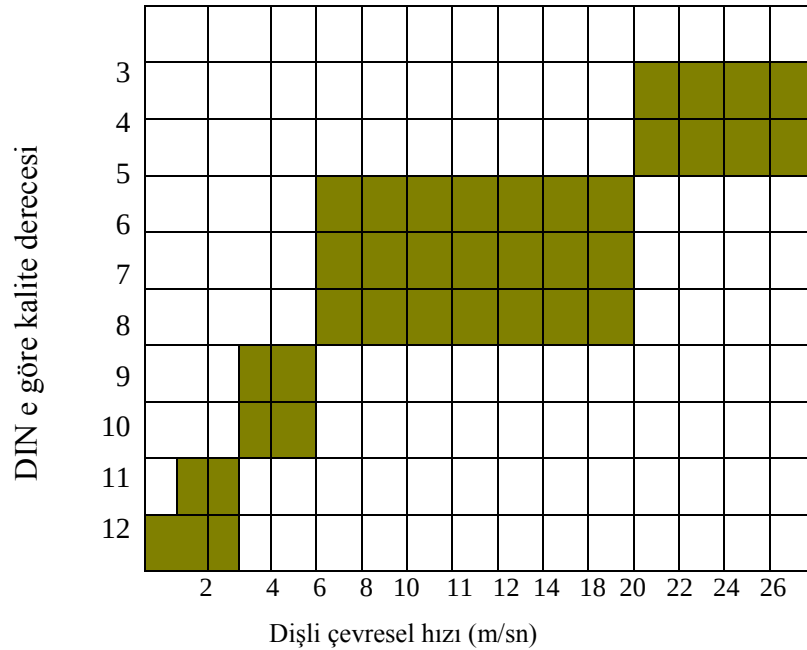
Şekil 2.6 İmalat yöntemine göre dişli çark kaliteleri

Şekil 2.6’da anlaşılaçağı üzere 1. kaliteden 12. kaliteye doğru dişlinin kalitesi düşmektedir.

Ekonomik ve kalite yönünden optimum dişli imalatı için aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

#### -Dişli çarklarda çevresel hıza göre kalite seçimi

Dişli çarkın çevresel hızına göre DIN 3060 ile tespit edilen kalite değeri aşağıdaki diyagramda (Şekil 2.7) hatve hatası esas alınarak gösterilmiştir. Küçük dişliler için alt değerler, büyük dişliler için üst değerler kaliteyi belirlemede esastır. Hız arttıkça dişli çarkın daha kaliteli imal edilmesi gerekmektedir [2].



Şekil 2.7 Dişli çarkın çevresel hızına göre kalitesi

### **-Kaliteye göre değişen döndürme kuvveti**

Aksine tesir yapan diğer hataların olmadığı bir dişlide hatve hatasının teorik olarak hesaplanan dişli hareket kuvvetinde değişimlere yol açtığı tespit edilmiştir. Kavrama hatve hatasından dolayı diş kuvvetinin (gerçek hareket kuvveti) teorik olarak hesaplanandan daha yüksek olduğu görülmüştür. Düz alın dişli çarklarda 16µm lik kavrama hatvesi hatası bulunduğu takdirde diş mukavemetinde %30 dan fazla bir eksilme olduğu tespit edilmiştir [2].

### **-Dişli kalitesi ve ömür**

Çeşitli dişler üzerinde farklı aşınmalar toplam hatve hatasından ileri gelir ve dişlerin birbirinden farklı hatve hataları, çalışma sırasında sıçramalar veya kaymalara neden olur. Bu sıçramalar ve kaymalar dişli ömrünü azaltır. Metal aşınması ile diş hatve hatası arasındaki bağ diş kalitesine tesir eder. Kalitesi yüksek olan bir dişli, kalitesi düşük olan diğer dişliye nazaran daha az aşınmaya uğrar ve daha uzun ömürlü olur [2].

## **2.5 Dişli Çarklarda Hataların Ölçülmesi ve Dişli Çarkların Kalite Değerleri**

Dişli çarklar hata oranlarına göre kalite sıralamasına tabi tutulmuştur (Tablo 2.1). Bu sıralama düz ve helis alın dişliler için DIN 3960 da, ISO 1328 de gösterilmiş olup, 12 cins kalite tespit edilmiştir. Bu sıralamaya giren 1 ve 2. kalitedeki dişliler çok hassas imal edilmiş dişliler olup ancak ölçme dişlileri olarak karşılaştırmada kullanılır ve çok pahalıdırlar.

Dişli hatalarının tespitinde bütün hata değerleri µm veya 1/1000 inç olarak uzunluk ölçüsü ile tespit edilmektedir. Çeşitli ölçü vasıtaları ile ölçülerek tespit edilen hata değerleri DIN 3960 ta ve ISO 1328 de kalite sıralamasında gösterilen kalitelerin karşıtındaki hata değerlerinin hangisine karşılık geliyorsa veya hangisine çok yakın ise, dişlinin o kalite sıralama numarasında bulunduğu anlaşılır. Ölçülen çeşitli hatalara ait, bir dişli için tespit edilen kalite değerleri çıkarılır. Bu kalite değerlerinden en yüksek (yani en düşük kalitede) olanı o dişlinin kalitesi olur [2].

Tablo 2.1 Kullanma maksadı ve imal usüllerine göre dişli kaliteleri arasındaki dağılım tablosu

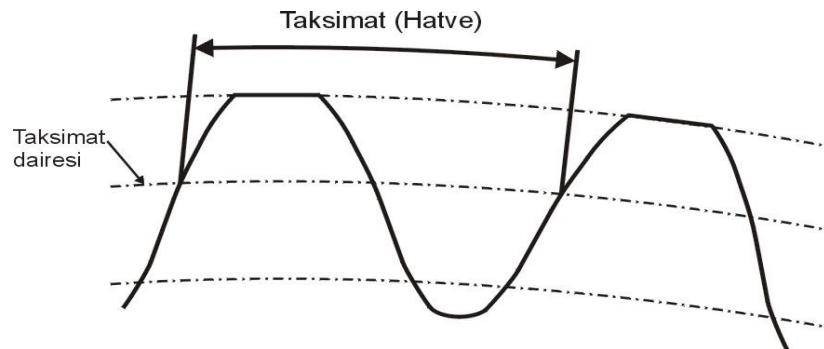
| Sıra no | Dişlinin kullanılma maksadı                                                                                                                 | DIN 3960 kalitesi | Dişlinin son işleminde uygulanan işleme usulü |        |          |           | Son ısıtıl işlem Cinsi                     |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|--------|----------|-----------|--------------------------------------------|
|         |                                                                                                                                             |                   | Azdırma                                       | Planya | Taşılama | Raspalama |                                            |
| 1       | Ölçme odaları için Master dişlileri                                                                                                         | 3                 |                                               |        |          |           |                                            |
| 2       | Yüksek güçlü uçak dişli Kutuları, takım tezgahları dişli kutuları, ölçü aletleri dişli tertipleri, dişlilerin kontrolü için master dişliler | 4                 |                                               |        |          |           | Yapılmaz                                   |
| 3       | Uçak dişli kutuları, takım tezgahları, ölçü aletleri, gaz ve buhar türbinleri dişlileri                                                     | 5                 |                                               |        |          |           | Nitrasyon banyosunda sertleştirme          |
| 4       | Uçak dişli kutuları, takım tezgahları, ölçü aletleri, gaz ve buhar türbinleri, otomobil, minibüs dişlileri                                  | 6                 |                                               |        |          |           | Nitrasyon banyosunda sertleştirme          |
| 5       | Otomobil, minibüs, kamyon , takım tezgahı dişlileri                                                                                         | 7                 | Kaba ve hassas frezeleme                      |        |          |           | Nitrasyon veya indüksiyon ile sertleştirme |
| 6       | Orta ve düşük kalitede nakil vasıtaları, otomobiller, tramvaylar, takım tezgahları ve kamyon gibi araçların dişlileri                       | 8                 | Kaba ve hassas frezeleme                      |        |          |           | Normal ısıtıl işlem                        |
|         |                                                                                                                                             | 9                 |                                               |        |          |           |                                            |
| 7       | Traktörler, genel makine imalatının adi konstrüksiyonlu dişli kutusu dişlileri, kaldırma makinesi dişlileri                                 | 10                |                                               |        |          |           |                                            |
| 8       | Genel ziraat ve arazi makineleri                                                                                                            | 11/12             |                                               |        |          |           |                                            |

■ Hassas işlem yapılmalı  
■ Normal işlem yapılmalı

## 2.6 Ölçülecek Dişli Çark Parametreleri

### 2.6.1 Taksimat (hatve) hatası

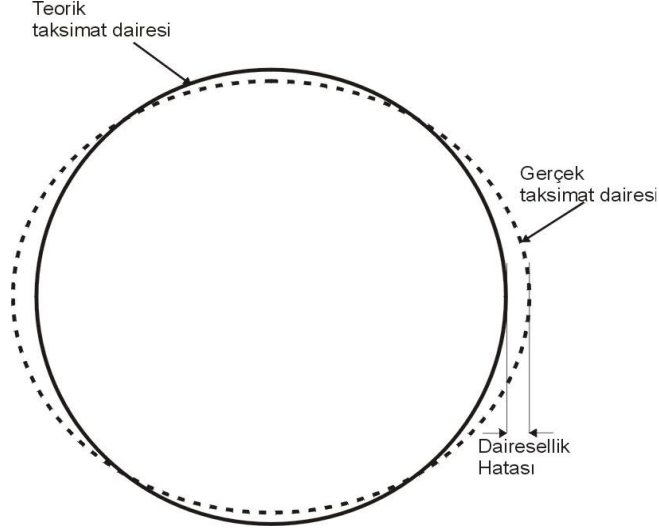
Alın dişlilerinde tek dişte teorik dairesel hatve ile imalat sonundaki gerçek dairesel hatve arasındaki farktır [2] (Şekil 2.8).



Şekil 2.8 Taksimat (Hatve)

### 2.6.2 Dairesellik hatası

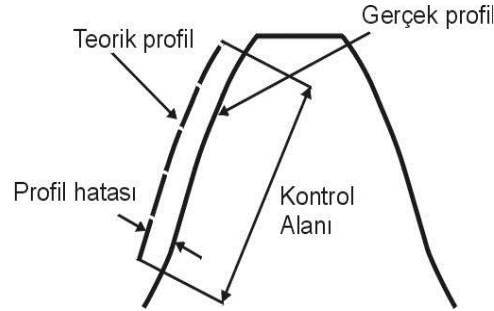
Dişlinin yuvarlanması sırasında eş çalıştığı ve doğru kabul edilen karşılık dişli eksenini ile kendi eksenini arasındaki mesafenin değişimidir [2] (Şekil 2.9). En büyük değişim dairesellik hatası olarak alınır. Bu ölçüm bütün dişli çevresinde radyal doğrultuda ölçülerek yapılır.



Şekil 2.9 Dairesellik hatası

### 2.6.3 Profil form hatası

Teorik diş profili ile gerçek diş profili arasındaki farklılıktır [2] (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 Profil form hatası

### 2.6.4 Kavrama açısı hatası

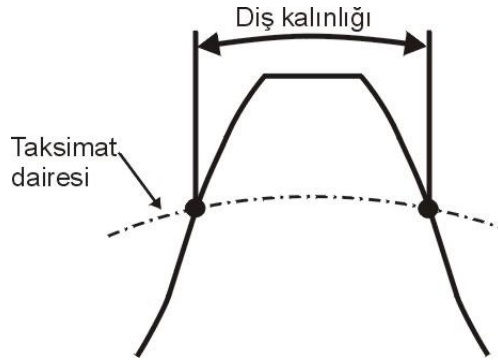
Teorik profilin ve gerçek profilin ortalama hatları arasındaki kavrama açısının farkı olarak tanımlanır [2] (Şekil 2.11). Diğer bir deyimle; Teorik profil kavrama açısı ile gerçek profil kavrama açısı arasındaki açısal farka denir.



Şekil 2.11 Kavrama açısı hatası

### 2.6.5 Diş kalınlığı hatası

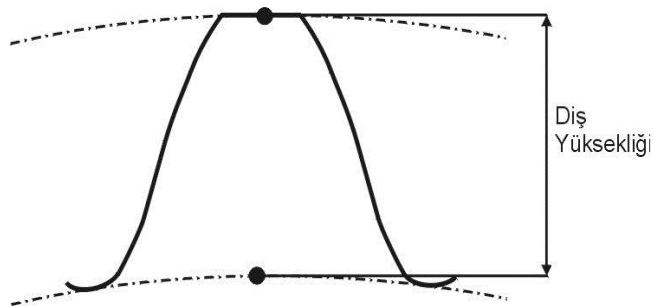
Taksimat dairesi üzerindeki diş kalınlığı ile teorik diş kalınlığı arasındaki farktır [2] (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Diş kalınlığı

### 2.6.6 Diş yüksekliği hatası

Diş dibi dairesi ile diş başı dairesi arasında kalan diş yüksekliği ile teorik diş yüksekliği arasındaki farktır [2] (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Diş yüksekliği

### 3. DIŞLİ ÇARK BOYUT ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Dişli hatalarının ölçülmesinde kullanılan tekniklerin çoğu uzunluk olarak ölçüm yapar. En iyi ölçme tekniğinde dahi bazı kaçınılmaz hatalar yapılır [2]. Bunlar;

- a-) Ölçme vasıtasının imalat ve toleransları içinde kalan hataları
- b-) Ölçme yapan personelin hataları
- c-) Ölçme yöntemine bağlı hatalar
- d-) Zamana bağlı değişimlerin meydana getirdiği hatalardır.

Doğru bir ölçme aletinin seçilmesi Tablo 3.1’de gösterilen ISO standart değerlerine göre yapılmalıdır.

Tablo 3.1 Ölçü toleranslarına göre kullanılan ölçme aletleri

| ISO’ya göre iyilik derecesi | Anma ölçüleri (mm) |        | Ölçme Metodu                             | Ölçme aleti veya ölçme cinsi                                                                                                                                           |
|-----------------------------|--------------------|--------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | 6-10               | 80-120 |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 1                           | 0,0015             | 0,003  | Sabit ölçü Masterları kullanılmaz        | Solex (Işık dalga boyu ile)<br>Endmass (Johnson mastları ile)<br>Optik (Optik ölçme)<br>Supra (Hassas ölçme)<br>1/1000 milimetrik ölçme<br>1/1000 komparatör ile ölçme |
| 2                           | 0,002              | 0,004  |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 3                           | 0,003              | 0,006  |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 4                           | 0,004              | 0,01   |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 5                           | 0,006              | 0,015  |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 6                           | 0,009              | 0,022  |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 7                           | 0,015              | 0,035  |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 8                           | 0,022              | 0,054  | Ölçü saatleri veya sabit ölçü masterları | Ölçü saati<br>1/100 taksimatlı ölçü aleti<br>Ay masterları<br>Tampon masterları                                                                                        |
| 9                           | 0,036              | 0,087  |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 10                          | 0,058              | 0,14   |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 11                          | 0,090              | 0,22   |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 12                          | 0,15               | 0,35   | Genel ölçme aletleri                     | Kumpaslar<br>Derinlik Kumpasları                                                                                                                                       |
| 13                          | 0,22               | 0,54   |                                          |                                                                                                                                                                        |
| 14                          | 0,36               | 0,87   |                                          |                                                                                                                                                                        |

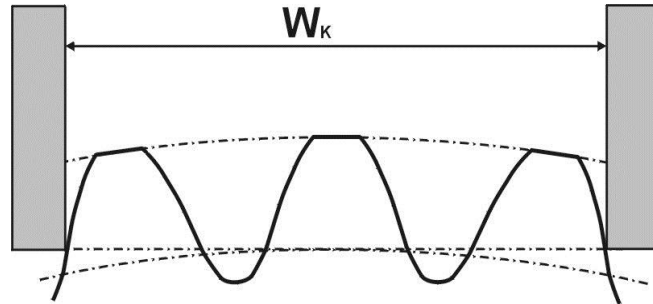
### 3.1 Genel Ölçüm Teknikleri

#### 3.1.1 Dişli kumpası ile ölçme

Dişli kumpası ile kavrama hatve hatası, diş kalınlığı ölçülebilir. Diş kalınlığı bir tek dişin sağ ve sol yanakları arasında yuvarlanma dairesi üzerindeki kirişsel açıklıktır. Öncelikle diş başı yüksekliği bulunur. Ardından dişli kumpasının düşey eksenini bulunan bu diş yüksekliğine ayarlanır. Daha sonra diş kalitesine göre ölçüm değerlerinin minimum ve maksimum değerleri tespit edilir. Dişli kumpasının yatay ekseninde ölçülen diş kalınlığının bu değerler arasında olması gereklidir [2].

#### 3.1.2 Dişli genişlik mikrometresi

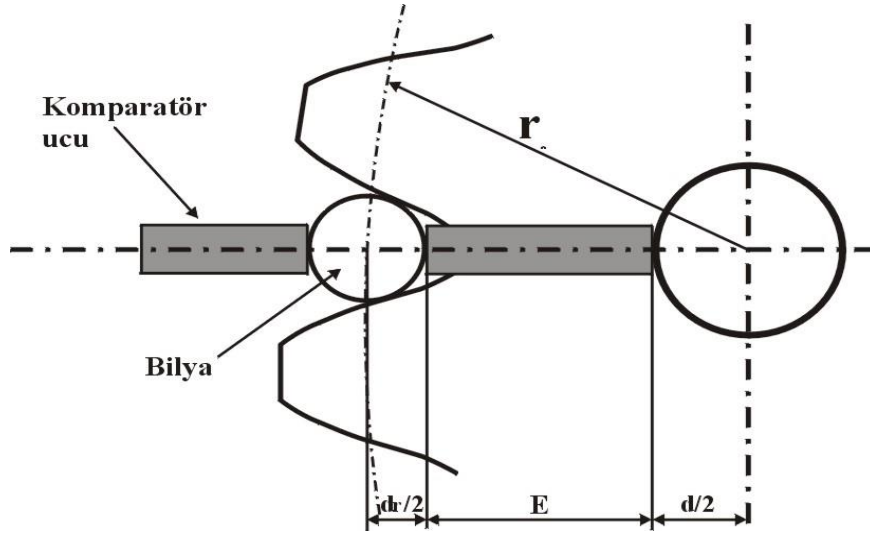
Dişli genişlik mikrometresi birden fazla diş ve boşluğunu kapsayan iki paralel yüzey arasındaki açıklığı ölçer (Şekil 3.1). Bu ölçü ile dişlinin hatve hataları ve profil hataları tesbit edilmiş olur. İmalat esnasında alınan birkaç ölçüm ile dişlinin tesbit edilen toleranslar içinde olup olmadığı kontrol edilebilir. Diş genişlik ölçüsü temel daire silindiri üzerinde birkaç hatveden ibaret açıklığın ölçüsüdür ( $W_K$ ) [2].



Şekil 3.1 Dişli genişlik mikrometresi ile diş kontrolü

#### 3.1.3 Pim veya bilya ile ölçü alma

Bu ölçme metodu ile yuvarlanma dairesi çapı ve çap hataları ölçülür. Komparatörün taster ucundaki bilya, ölçülecek dişlinin taksimat dairesi silindiri üzerinde, diş boşluğuna oturtulur (Şekil 3.2). Bilya çapı hatvenin yarısı kadar seçilir. Her diş için bu ölçü alınarak dişlinin yuvarlaklığının değişimi ölçülmüş olur [2].



Şekil 3.2 Pim veya bilya ile yuvarlaklık kontrolü

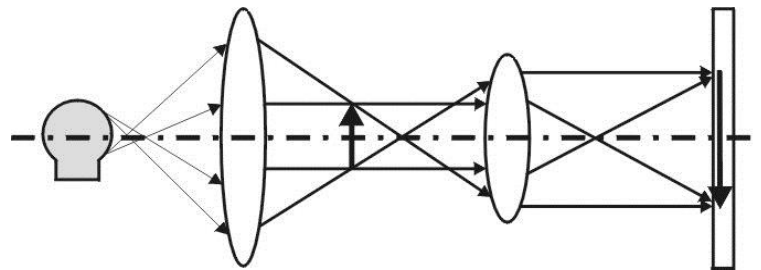
### 3.1.4 Master dişli ile yuvarlanma hatasının ölçülmesi

Master dişlisi ile kontrol edilecek dişli eş çalıştırılarak eksenler arasındaki açılmalar ibre üzerinden okunarak yuvarlanma dairesinde meydana gelen hatalar tespit edilir ve diyagram üzerine kaydedilir. Diyagram üzerinden  $\mu\text{m}$  olarak okunarak yuvarlanma hatası tespit edilir [2]

### 3.1.5 Diş yanağı form hatasının ölçülmesi

Diş evolvent profilin referans evolvent profilden hatasını tespit eden düzeneklerdir. Evolvent profil üzerinde gezinen bir ucun çizdiği profilin bir kağıt üzerine aktarılması ile kontrol edilmesidir [2].

## 3.2 Profil Projeksiyon Ölçüm Sistemleri



Şekil 3.3 Projektör çalışma prensibi

Profil projeksiyonları Şekil 3.3'te görüldüğü gibi iki mercek arasına yerleştirilen numunenin görüntüsünün büyütülmüş halini bir ekran üzerine düşürür [3].

Hazır şablonlarla veya ölçüm aletleri ile büyütülmüş görüntü üzerinden ölçü alınır. Profil projeksiyonları ile parça görüntüleri 100 kez büyütülebilir.

Profil projeksiyonlarının en büyük dezavantajı incelenen boyutların aynı düzlem içinde olması gerekmesidir.



Şekil 3.4 Profil projeksiyon cihazı (Mitutoyo PJ-H3000F)

Profil projeksiyon cihazlarının ekranlarına yapılacak bazı standart kontrollere göre hazırlanmış özel şablonlar bağlanabilir. Bu şablonlar ile aç, vida dişi ve evolvent profil kontrolleri kolaylıkla yapılabilir.

### 3.3 Koordinat Ölçüm Cihazları (Coordinate Measuring Machines (CMM))

Koordinat ölçüm cihazları çok gelişmiş ölçüm aletleridir ve günümüzde endüstride çok kullanılmaktadır (Şekil 3.5). Üç boyutlu koordinat ölçümü yapabildikleri gibi yüzeylerin açısal konumlarını da belirleyebilmektedirler. Bilgisayar kontrollü koordinat ölçüm cihazları ile bir parçanın ölçüm süreci programlanabilir ve bütün işlem otomatik, kullanıcının müdahalesinden bağımsız olarak gerçekleştirilebilir. Yapılan ölçüm işlemi sonuçları bilgisayarda kaydedilip daha sonra yapılacak işlemlerle kıyaslanabilir [3].



Şekil 3.5 Koordinat ölçüm cihazı (Crysta-Aqex C series)

Düşük temas kuvvetli problar sayesinde kauçuk gibi yumuşak malzemelerde bu cihazları ile ölçülebilmektedir. Farklı prob tipleri (Şekil 3.6) parça büyüklüklerine göre kullanılabilir. Kullanılan probların belirli aralıklarla kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.6 Farklı prob tipleri

### 3.4 Görüntü İşleme Sistemleriyle Ölçüm

Gün geçtikçe makine parçalarının daha küçük, daha hafif olması üreticileri temassız ölçüm tekniklerini kullanmaya zorlamaktadır. Görüntü işleme sistemleriyle ölçümde en çok kullanılan temassız ölçüm tekniğidir. Görüntü işleme sistemleri parçanın görüntüsü üzerinden boyut ölçümünü gerçekleştirir. Parçanın resmi büyütüldüğünden mikroskop sistemlerine benzer [3] (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Görüntü işleme sistemi (Mitutoyo Quick Vision 404)



Şekil 3.8 Kamera ve mesafe sensörleri ile oluşturulan melez sistemler

Bu sistemler, yüksek çözünürlüklü siyah-beyaz veya renkli bir kamera, ışıklandırma sistemi, bilgisayar-kamera arayüz kartı ve görüntü işleme yazılımının çalıştığı bilgisayardan oluşur. Bazı görüntü işleme sistemlerine dokunma ve mesafe sensörleri eklenerek sistemin verimliliği ve hızı arttırılmaktadır (Şekil 3.8). Bazı koordinat ölçme makineleri ise problu sistem bir kamera ile değiştirilerek görüntü üzerinden ölçüm yapabilmektedirler.

### 3.5 Ölçüm Sisteminde Göz önünde Bulundurulacak Hususlar

En uygun ölçüm sistemini belirlemek için farklı değişkenleri gözönünde bulundurmak gereklidir. Projektör sistemleri basit ve diğerlerine nazaran ucuz olmalarına rağmen kullanıcı hatalarına açık ve iki boyut ile sınırlıdır. Diğer yandan koordinat ölçüm sistemleri ve bilgisayarla görü sistemleri hızlı, hassas ve otomatik ölçüm yapabilmektedirler. Aşağıda uygun ölçüm sistemini seçerken dikkat edilecek parametreler sıralanmıştır [3].

**a-Ölçülecek parçaların ağırlığı, boyutları ve geometrisi:** Üretilen parçaların geometrisi, boyutları hem ölçüm yönteminin belirlenmesinde hem de kullanılacak donanımın boyutlarının belirlenmesinde en önemli faktördür.

**b-Temaslı veya temassız ölçüm:** Yumuşak parçalar için temassız sistemler kullanılmalıdır.

**c-Parça toleransları:** Hem koordinat ölçüm sistemlerinde hemde görüntü işleme sistemlerinde çok yüksek toleranslarda (yaklaşık  $0.1\mu\text{m}$ ) ölçüm yapılabilmektedir. Ancak maliyet açısından aynı toleranslarda ölçüm yapabilen iki sistem

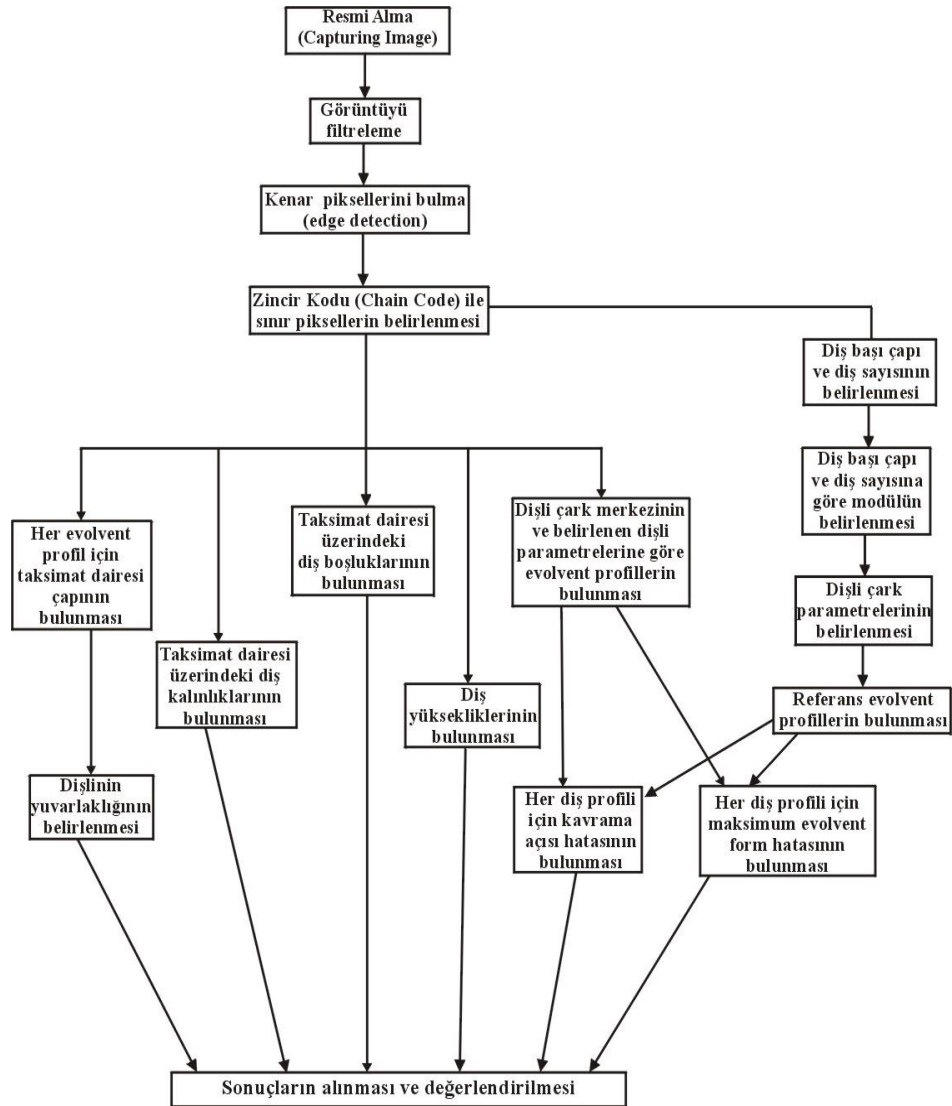
karşılaştırıldığında görüntü işleme sistemlerinin yüksek maliyetli olduğu söylenebilir.

**d-Üretim miktarı ve ölçüm yapılacak parça miktarı:** Düşük üretim miktarlarında yüksek maliyetli koordinat ölçüm veya bilgisayarla görü sistemlerini seçmek yerine projeksiyon sistemleri gibi daha ucuz ve yavaş donanımlar uygun olur.

**e-Yazılım maliyeti ve kullanım kolaylığı:** Farklı işler için kullanılacak yazılımların kullanımı da o derecede zor olacaktır. Ancak günümüzde yazılımların gelişmiş arayüzleri sayesinde kullanımları oldukça kolaylaşmıştır.

#### 4. YAZILIMIN OLUŞTURULMASI

Bölüm 2.6’da belirlenen dişli çark parametrelerinin ölçümü için ilk olarak nasıl bir yazılım yapısı oluşturulacağı belirlenmiştir. Yazılım, genel olarak giriş verisi olan dişli çark resmini alacak, veritabanında girilmiş dişli tiplerinden hangisi olduğunu belirleyip referans dişli değerlerini hesaplayacak, son olarakta bu referans verilerini resim görüntüsü üzerinden aldığı verilerle karşılaştıracaktır. Şekil 4.1’de bu görevleri yerine getirecek yazılımın yapısı verilmiştir.

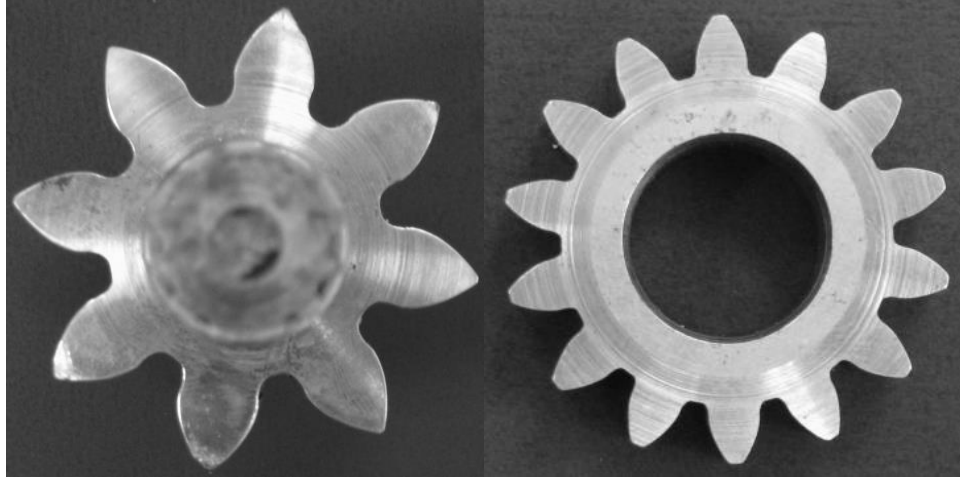


Şekil 4.1 Dişli Çark kalite kontrol sistemi yazılım yapısı

#### 4.1 Resmi Alma (Capturing Image)

Yazılımın çalışması için yüksek çözünürlükte resimler gerekmektedir. İlk adım olarak bilgisayar ortamında hazırlanan dişli çark resimleri üzerinde çalışılmıştır. Daha sonra gerçek dişli resimleri üzerinde algoritmanın eksikleri giderilmiştir (Şekil 4.2).

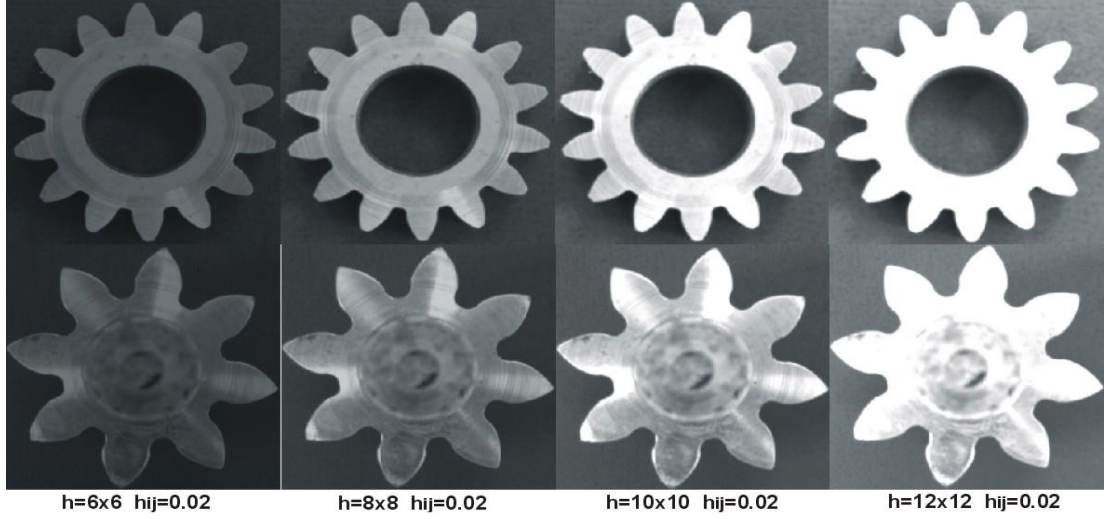
Gerçek resimler üzerinde çalışırken ortamın ışığının kontrol edilmesi, üzerinde çalışılan parçaların yüzeylerinin lekesiz olması, çalıştırılan algorithmadan doğru sonuç elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Servo sistemlerde ise parçanın resmi bir bütün olarak alınmamaktadır. Parçanın belirli bir bölümünden dış hat taranmaya başlanır, servo sistem ile parça hareket ettirilerek dış hattın takip ettiği form çıkartılır. Böylece yüksek çözünürlük elde edilir. Ayrıca servo sistemlerde kullanılan özel alt tabla sayesinde parça altından ışık verilerek kamera üzerinde sadece parçanın gölgesi düşürülür. Bu sayede herhangi bir filtreleme işlemine ihtiyaç kalmaz [4].



Şekil 4.2 Üzerinde çalışılan dişli çark resimleri

#### 4.2 Görüntü Filtreleme

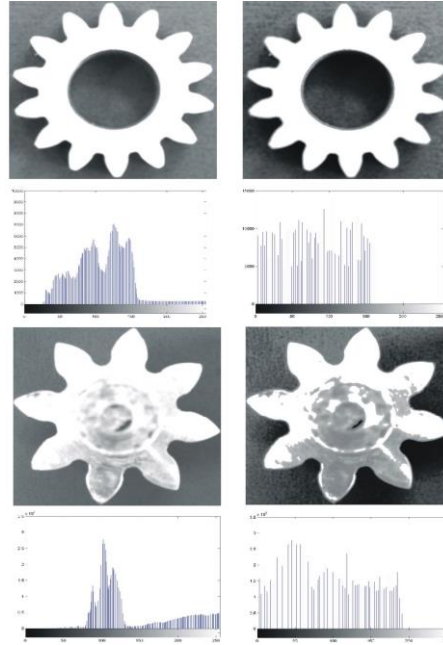
Alınan görüntü üzerinde filtreleme işlemi uygulanarak görüntü içerisindeki gürültü giderilir ve daha sağlıklı bir resim üzerinden veriler alınabilir. Filtreleme işlemi iki aşama şeklinde uygulanmıştır. Birincisinde alınan görüntüyü gürültüden arındırmak için konvolusyon işlemi uygulanmış, ikinci aşamada kontrast ayarlaması için histogram eşitlemesi kullanılmıştır [5]. Konvolusyon işleminde kullanılan filtre matrisine göre alınan görüntünün değişimi Şekil 4.3'deki gibidir.



Şekil 4.3 Konvolusyon işleminde kullanılan filtre matrisine göre görüntü değişimi

Konvolusyon işleminde kullanılan filtre matrisi  $h$ ,  $12 \times 12$  boyutlarında ve  $h_{ij}=0,02$  olarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada kullanılan histogram eşitleme işlemi (Şekil 4.4) ile dişli çarkın sınır pikselleri daha belirgin hale getirilmeye çalışılmıştır. Histogram eşitleme işleminde alınan resim üzerindeki piksellerin renk değerleri gri skalada 150'ye eşitlenmiştir.



Şekil 4.4 Histogram eşitlemesi sonucunda elde edilen görüntüler ve histogramları

### 4.3 Kenar Piksellerini Bulma (Edge Detection)

Filtreleme işlemi ile elde edilen görüntünün kenar pikselleri bulunarak 1 bitlik siyah ve beyaz görüntüye dönüştürülür. Bu sayede bir sonraki aşamada uygulanacak sınır piksellerinin bulunması işlemi gerçekleştirilebilir. Aşağıda üç farklı kenar bulma algoritması denenmiş ve aralarından en uygun olanı seçilmiştir [6].

#### 4.3.1 Sobel kenar bulma algoritması

Sobel kenar bulma algoritması yüksek derecede gradient değişimi olan bölgelerdeki pikselleri tespit eder.

$$N(i, j) = \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 K(j, k) \cdot p(x - j, y - k) \quad (4.1)$$

K: Konvolusyon matrisi,

p: görüntü pikseli

N: köşe pikselleri belirlenmiş görüntü

Sobel kenar bulma algoritması yatay ve dikey yönde gradiyent değişimlerini bulmak için iki farklı konvolusyon matrisi kullanır. Bunlar;

$$h_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, h_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Her piksel için yukarıdaki matrisler ile komşu piksellerin değerleri kullanılarak yeni gradiyent değerleri tespit edilir. Yatay ve dikey yönde komşu piksellerin gradiyent değişimi yüksek olan pikseller köşe pikselleri olarak tespit edilir. Yatay ve dikey yöndeki gradiyentler;

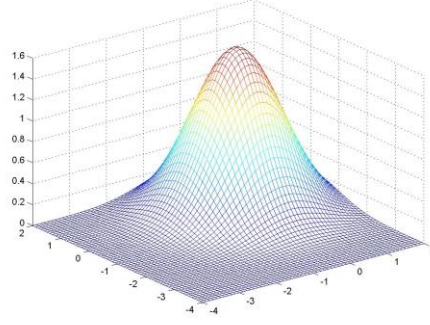
$$\bar{g} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} \quad g = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (4.2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (4.3)$$

Belirli bir eşik değerden yüksek ‘g’ değerine sahip pikseller kenar pikselleri olarak belirlenir.

#### 4.3.2 Canny kenar bulma algoritması

Canny kenar bulma algoritması iki aşamalı bir işlemdir. İlk aşamada resim üzerinde ‘Gaussian Smoothing’ uygulanarak görüntü gürültüden arındırılır. İki boyutlu Gaussian fonksyonu aşağıdaki gibidir;



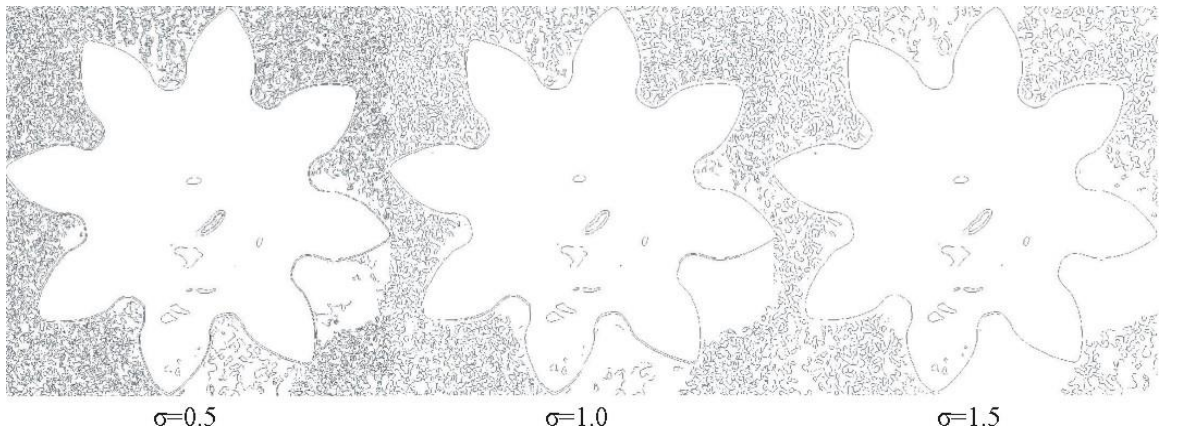
Şekil 4.5 İki boyutlu Gauss fonksyonu

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.4)$$

Yukarıda verilen gaussian fonksyonu ayrık resim verileri üzerinde aşağıdaki konvolusyon matrisi kullanılarak uygulanır. Bu matris değişen  $\sigma$  değerlerine göre belirlenir.

$$\sigma=1.4 \text{ için} \quad K = \frac{1}{115} \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 5 & 12 & 15 & 12 & 5 \\ 4 & 9 & 12 & 9 & 4 \\ 2 & 4 & 5 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

Farklı  $\sigma$  değerleri için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.6  $\sigma$  değerlerine göre Canny kenar bulma algoritması sonuçları

İkinci aşamada Bölüm 4.3.1’de anlatılan Sobel kenar bulma işlemi uygulanır. Canny kenar bulma algoritması gerek işlem zamanı bakımından gerekse elde edilen sonuçların çok fazla gürültü içermesi nedeniyle kullanılmamıştır.

#### 4.3.3 Laplas-Gauss kenar bulma algoritması

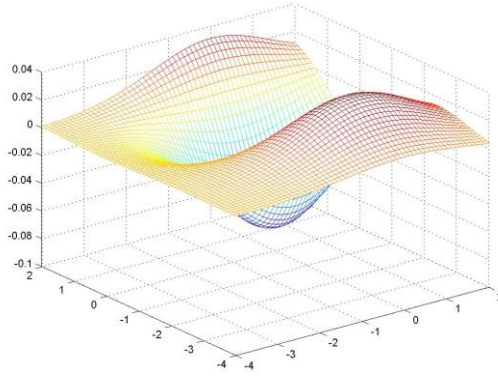
Laplas fonksyonu görüntünün ikinci türevini bulur. Piksel değerleri  $I(x,y)$  olan bir görüntünün Laplacian transformu;

$$L(x,y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (4.5)$$

Alınan görüntü ayırık bir veri olduğu için yukarıdaki ikinci türeve yakınsayacak konvolusyon matrisini oluşturmak gereklidir. Bunun için aşağıdaki matrisler kullanılabilir.

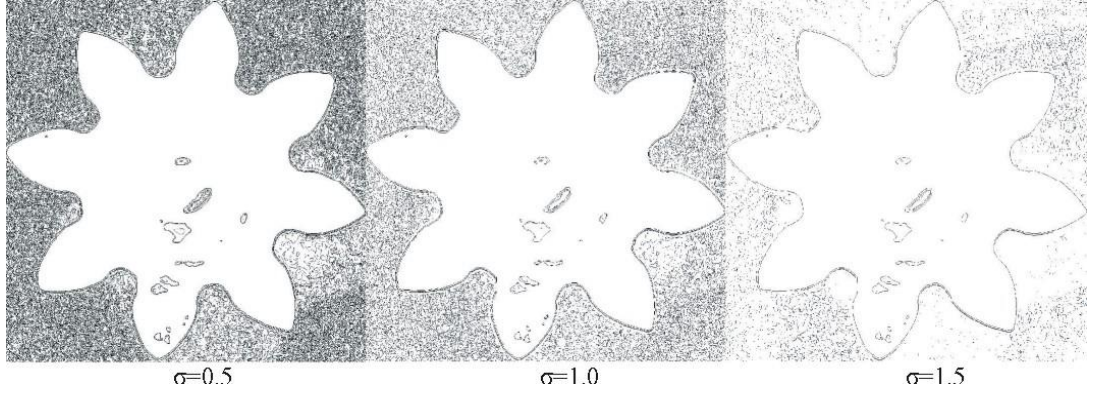
$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 2 & -4 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$$

Bulunan bu matrislerle elde edilecek görüntüler gürültüye çok hassas olacaklarından bu işlemden önce Gauss filtresi eklenirse aşağıdaki LoG (Laplacian of Gaussian) fonksyonu elde edilir.

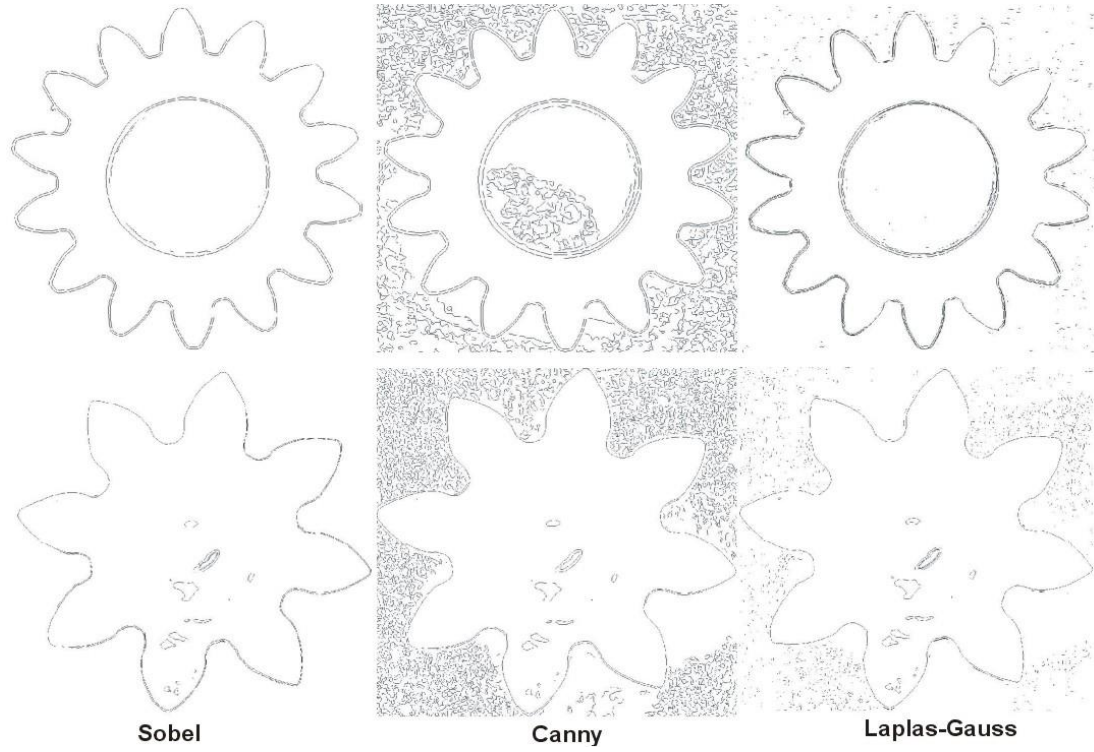


Şekil 4.7 İki boyutlu LoG fonksyonu

$$LoG(x,y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \cdot \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] \cdot e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (4.6)$$



Şekil 4.8  $\sigma$  değerlerine göre LoG kenar bulma algoritması sonuçları

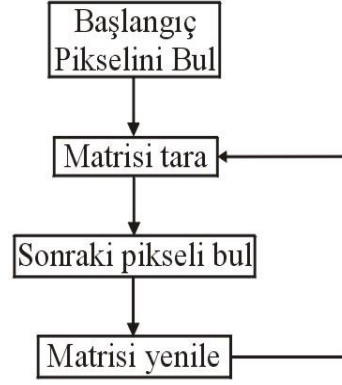


Şekil 4.9 Kenar bulma algoritmalarının sonuçları

En iyi sonuç Sobel kenar bulma algoritmasında elde edilmiştir. Böylece kenar bulma algoritması olarak bu algoritmanın kullanılması kararlaştırılmıştır.

#### 4.4 Zincir Kodu (Chain Code) ile Sınır Piksellerin Belirlenmesi

Zincir kodu işlemi Sobel kenar bulma işlemi ile elde edilen ikili (binary) görüntü üzerinde dişli çarkın dış hatlarını oluşturan piksellerin tespit edilmesi olarak özetlenebilir. Boyut ölçümü işlemi bu pikseller referans alınarak yapılacağı için yapacağımız kontrol işleminin başarılı olmasında oldukça büyük öneme sahiptir.



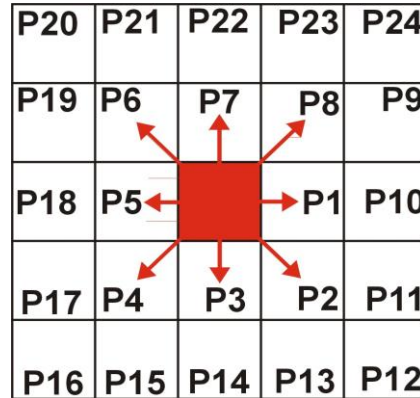
Şekil 4.10 Zincir kodu yapısı

#### 4.4.1 Zincir kodu algoritmasının gerçekleştirilmesi

##### -Başlangıç pikselinin bulunması

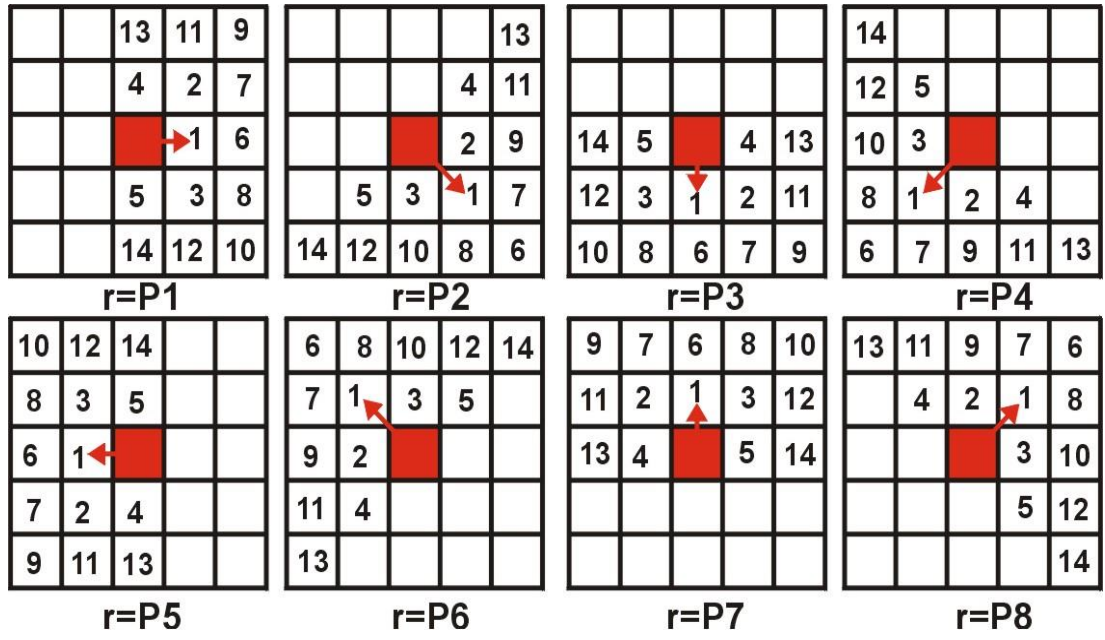
Görüntü üzerinde iç içe iki döngü ile tarama işlemi gerçekleştirilir. İlk siyah piksel başlangıç pikseli olarak belirlenir ve iki döngüden de çıkarılır. Bulunan pikseller zincir kodu işlemine başlangıç pikseli olarak kullanılır.

Daha sonra matris taranır (Şekil 4.12). Matris içerisinde bulunan ilk siyah piksel sonraki piksel olarak belirlenir. Önceki piksel ve yeni bulunan piksele göre dönüş yönü belirlenir. Belirlenen dönüş yönüne (Şekil 4.11) göre yeni matris sıralaması oluşturulur (Şekil 4.12). Böylece her piksel değişiminde matris yenilenerek daha etkili bir zincir takibi işlemi gerçekleştirilmiş olur [10].



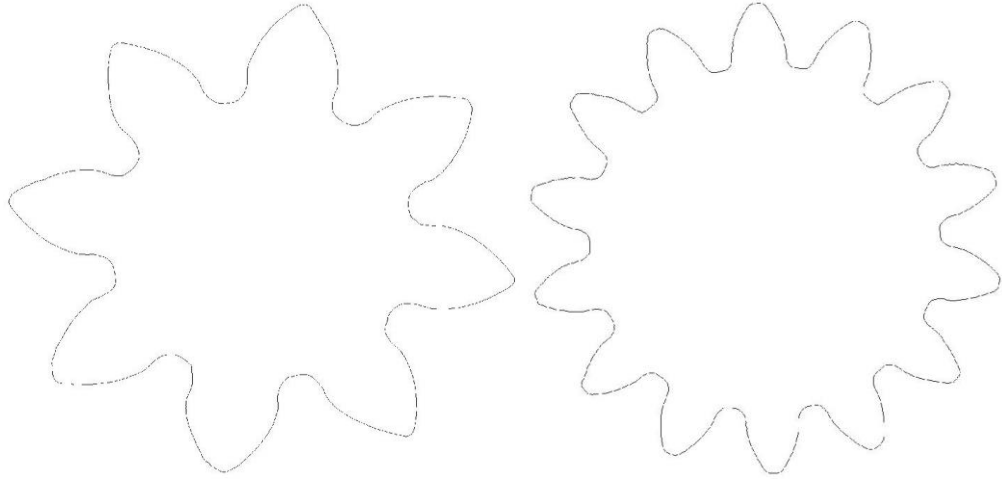
Şekil 4.11 Zincir kodunda kullanılan mask ve dönüş yönleri (d)

Dönüş yönüne göre tarama matrisleri aşağıdaki gibi oluşturulur.



Şekil 4.12 Zincir kodu tarama matrisinin dönüş yönüne göre değişimi

Sırasıyla dönme yönlerine göre yukarıdaki piksel matrisleri taranır ve bir sonraki sınır pikseli bulunur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Zincir kodu ile elde edilen sınır pikselleri

Ekte verilen yazılımda bulunan `function data=image_data(gear1)` fonksyonu kullanılarak filitreleme ve zincir kodu işlemleri yapılabilmektedir.

#### 4.5 Diş Başı Çapı, Diş Sayısı ve Dişli Modülünün Belirlenmesi

Dişli çarkların en temel boyutu modülleridir. Üzerinde çalıştığımız sistem belirli sayıda, daha önceden bir veritabanına standart modülleri ve boyutları girilmiş, dişli

çarklar için çalıştırılacağı için dişli tipini belirlemede zincir kodu ile elde edilen sınır pikseller kullanılacaktır.

İki dişliyi birbirinden ayıran faktörler dişlinin dış çapı ve diş sayısıdır. Bir başka deyişle dişli dış çapı ve diş sayısı aynı olan dişli çarklar birbirinin aynı olarak kabul edilmiştir. Dişli çarkın tipinin belirlenmesi için aşağıdaki algoritma oluşturulmuştur (Şekil 4.14).

Ekte verilen yazılımda bulunan function `zet=get_tooth_count(x_s,y_s)`; fonksyonu zincir kodu ile elde edilmiş sınır piksellerin koordinatlarını alarak aşağıdaki algoritmaya ile diş sayısını bulur.



Şekil 4.14 Dişli parametrelerinin belirlenmesi

#### 4.6 Dişli Çark Parametrelerinin Belirlenmesi

Dişlinin tipi belirlendikten sonra o tipe ait standart modül (m) ve profil kaydırma miktarı (x) veritabanından alınır. Daha sonra aşağıdaki temel dişli ölçüleri

hesaplanır. Bu ölçüler ileride dişli görüntüsü üzerinden elde edilecek verilerin kontrolünde kullanılacaktır.

$$\text{Temel dairesi çapı} \quad d = m \cdot z \quad (4.7)$$

$$\text{Dişli hatvesi} \quad p = \frac{d}{z \cdot \pi} = m \cdot \pi \quad (4.8)$$

$$\text{Diş başı dairesi çapı} \quad d_a = d + 2 \cdot h_a = d + 2 \cdot m + 2 \cdot x \cdot m \quad (4.9)$$

$$\text{Diş dibi dairesi çapı} \quad d_f = d - 2 \cdot h_f = d - 2.5 \cdot m + 2 \cdot x \cdot m \quad (4.10)$$

$$\text{Temel dairesi çapı} \quad d_b = d \cdot \cos \alpha \quad (4.11)$$

$$\text{Evolvent profil dış çapı} \quad d_{e2} = 0.95 \cdot d_a \quad (4.12)$$

$$\text{Evolvent profil iç çapı} \quad d_{e1} = 1.05 \cdot d_f \quad (4.13)$$

$$\text{Diş başı yüksekliği} \quad h_a = m(1 \pm x) \quad (4.14)$$

$$\text{Diş dibi yüksekliği} \quad h_f = m \cdot (1,25 \pm x) \quad (4.15)$$

Ekte verilen function `par=get_parameters(m,zet,alpha,x,scale)` fonksyonu dişli modülü, diş sayısı, basınç açısı, kaydırma faktörü ve resim ölçeğine göre yukarıdaki dişli parametrelerini hesaplar.

#### 4.7 Resim Ölçeğinin Bulunması

Temel dişli ölçüleri bulunduktan sonra bu değerlerin alınan görüntü üzerinde piksel olarak değerlerini belirleyebilmek için mm/piksel olarak resmin ölçeğinin tespiti gerekmektedir. Bunun içinde dişli tipine göre veritabanından alınacak olan  $d_a$  dişbaşı dairesi çapı dişlinin düşeyde maksimum ve minimum iki noktası arasında bulunan piksel sayısına bölünür ve resim ölçeği hesaplanır.

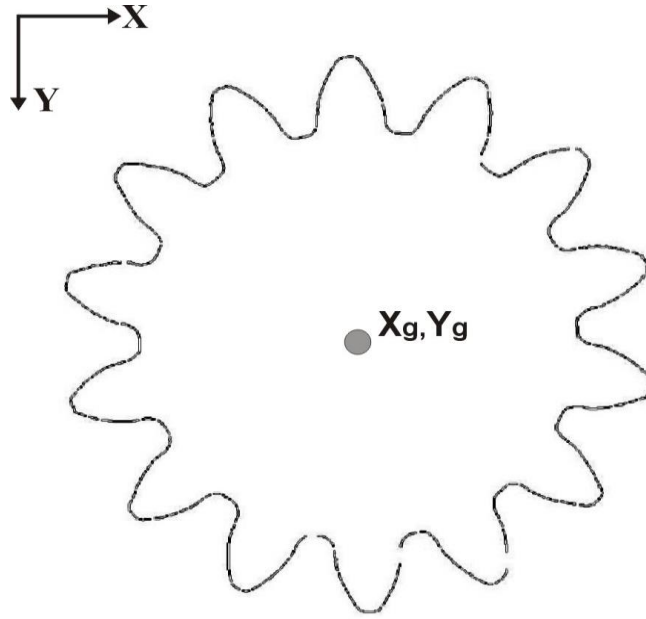
$$scale = \frac{d_a}{N_{piksel}} \quad (4.16)$$

Ekte verilen function `scale=find_scale(x_s,y_s,dl)`; fonksyonu mm/piksel olarak resim ölçeğini bulur.

#### 4.8 Dişli Çark Merkezinin ve Belirlenen Dişli Parametrelerine göre Evolvent Profillerin Bulunması

Zincir kodu ile elde edilen dişlinin dış formunu oluşturan piksellerin dişli merkezinden olan mesafeleri belirli bir aralıkta olanlar evolvent profil pikselleri olarak tespit edilir. Bunun için ilk aşamada dişli çarkın merkezi tespit edilmelidir. Daha sonra belirlenen dişli parametreleri ile evolvent profiller tespit edilerek kontrol işlemi gerçekleştirilir.

-Dişli çark merkezinin bulunması:



Şekil 4.15 Dişli çark merkezinin bulunması

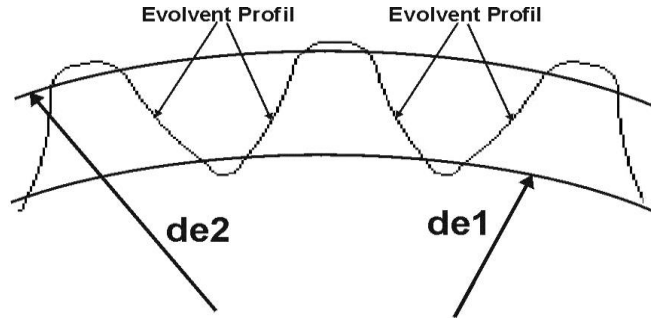
Dişli çark merkezi dış hattı oluşturan piksellerin ağırlık merkezinin bulunması ile elde edilir.

$$X_g = \frac{\left( \sum_{i=1}^n X_i \right)}{n}, \quad Y_g = \frac{\left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)}{n} \quad (4.17)$$

olarak hesaplanır. (n:Sınır piksel sayısı)

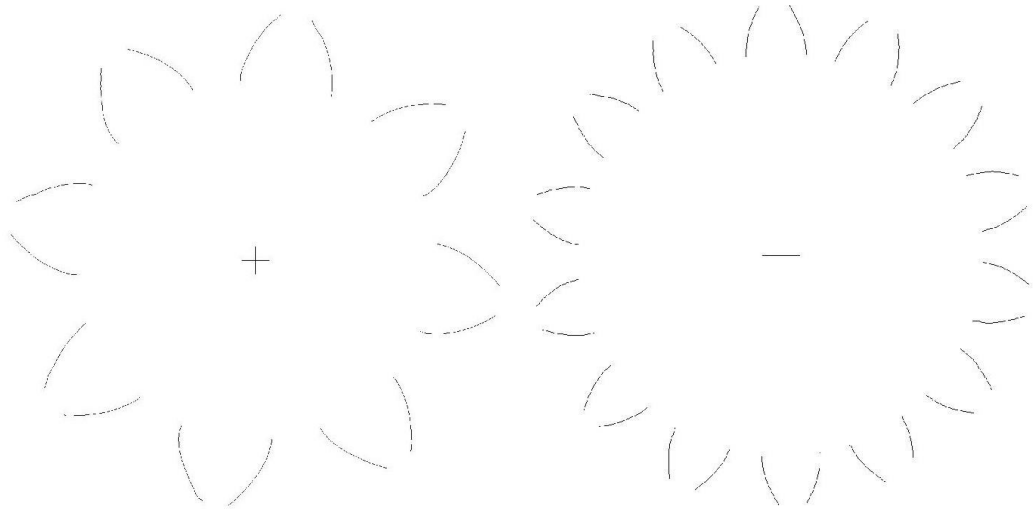
Ekte verilen function `cent=find_gravity_centre(x_s,y_s)` fonksyonu 'image\_data' fonksyonu ile elde edilen dış hatlarının koordinatları üzerinden dişli çarkın merkez koordinatlarını hesaplamaktadır.

-Evolvent profil eğrilerinin bulunması:



Şekil 4.16 Evolvent profillerin bulunması

Zincir kodu ile elde edilen sınır piksellerinin bulunan merkez noktasından mesafeleri hesaplanır. Evolvent profilleri oluşturan pikseller dişli çark merkezinden mesafeleri  $d_{e2}$  ( $d_{e2} = 0,95 \cdot d_b$ ) ile  $d_{e1}$  ( $d_{e1} = 1,05 \cdot d_f$ ) arasında bulunan pikseller olarak belirlenir (Şekil 4.16, Şekil 4.17).



Şekil 4.17 İki örnek üzerinde merkez noktaların ve evolvent profillerin bulunması

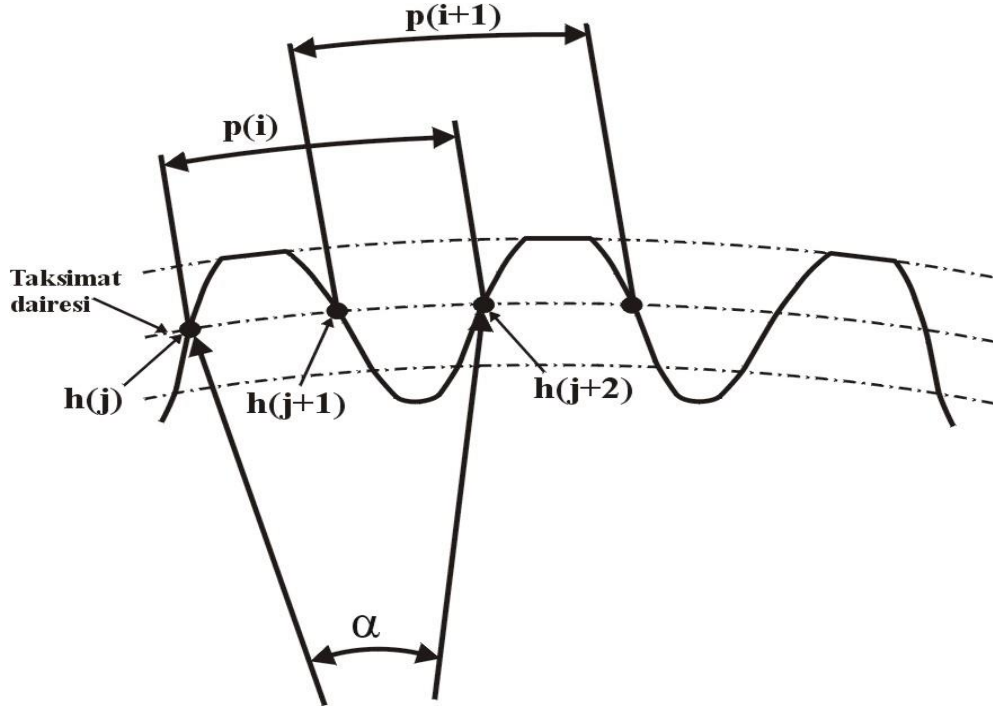
Ekte verilen;

function find\_evolver\_x(x\_s,y\_s,de2,de1,centre) ve

function find\_evolver\_y(x\_s,y\_s,de2,de1,centre) fonksiyonları 'image\_data'

fonksiyonu ile belirlenen sınır pikselleri olarak de1 ve de2 çapları arasında kalan evolvent profillere ait piksellerin sırasıyla, x ve y koordinatlarını geri döndürür. X ve Y değerlerini mxn matris şeklinde hesaplar. Bu matriste m evolvent profil numarası ve n ise piksel numarasıdır.

#### 4.9 Taksimat Dairesi Üzerindeki Taksimatların (Hatvelerin) Bulunması



Şekil 4.18 Hatvenin bulunması

$d_p$ : Taksimat dairesi çapı

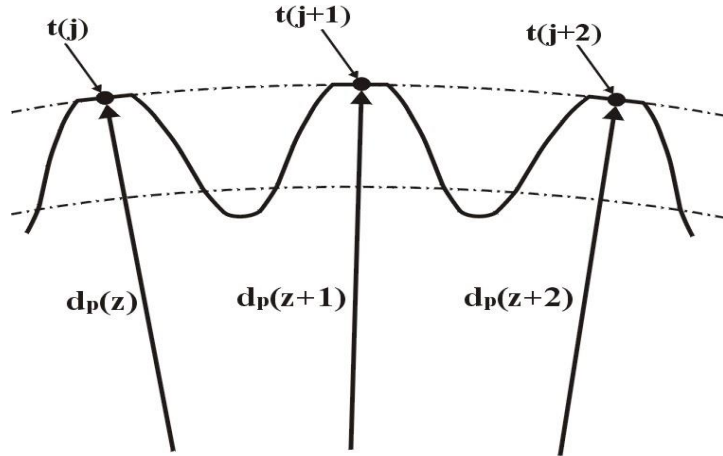
Ekte verilen function  $h = \text{pitch\_point}(x\_r, y\_r, \text{centre}, dp, j)$  fonksyonu  $j$ . evolvent profil üzerinde merkez noktasından taksimat dairesi yarı çapı kadar ( $r_t$ ) uzaklıkta olan noktayı tespit edip koordinatlarını geri gönderir.

$$h(j) = \text{pitch\_point}(x\_r, y\_r, j)$$

$$h(j+2) = \text{pitch\_point}(x\_r, y\_r, j+2)$$

Ekte verilen function  $p = \text{pitch\_control}(x\_r, y\_r, \text{centre}, dp, \text{scale})$  fonksyonu ise her bir evolvent profil üzerinde bulunan  $h(j)$  noktası ile bir sonraki evolvent profil üzerinde bulunan  $h(j+2)$  noktası arasındaki mesafeyi hatve değerini 'mm' olarak hesaplar (Şekil 4.18).

#### 4.10 Dişlinin Daireselliğinin Kontrolü



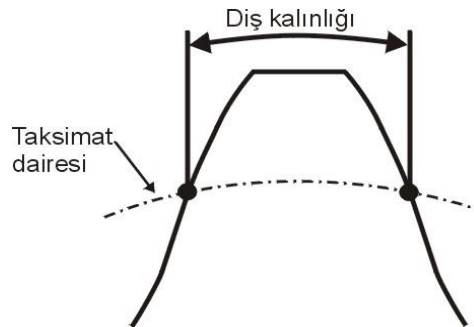
Şekil 4.19 Dişli salgısının (yuvarlaklığının) kontrolü

Ekte verilen function `find_tooth_tips(x_s, y_s)` fonksyonu zincir kodu ile elde edilmiş dişlinin sınır koordinatlarından  $(x_s, y_s)$  dişli çarkın her bir dişinin merkezden maksimum uzaklıktaki noktasının koordinatlarını bulur. (Şekil 4.19)

Ekte verilen function `r=circularity(x_s, y_s, centre, scale)` fonksyonu ise 'find\_tooth\_tips' fonksyonu ile belirlenen diş tepe noktaları koordinatları ile merkez arasındaki mesafeyi 'mm' olarak hesaplar. Daha sonra bulduğu ilk diş başı çapını sıfır kabul ederek diğerlerinin bu ilk çap değerine göre değişimini yani dişlinin salgısını bulur.

#### 4.11 Diş Kalınlığının Bulunması

Hatve değişiminin bulunmasında olduğu gibi her evolvent profil üzerinde bulunan taksimat dairesi noktası tespit edilir (Şekil 4.20). Bir dişi oluşturan iki evolvent profile ait bu noktalar arasındaki mesafe ölçülerek diş kalınlığı tespit edilir.



Şekil 4.20 Diş kalınlığının bulunması

Ekte verilen function `th=tooth_thickness(x_r,y_r,rt,centre,scale);` fonksyonu her bir dişin yukarıdaki tanıma göre diş kalınlığını hesaplar.

`x_r, y_r`: Evolvent profil koordinatları

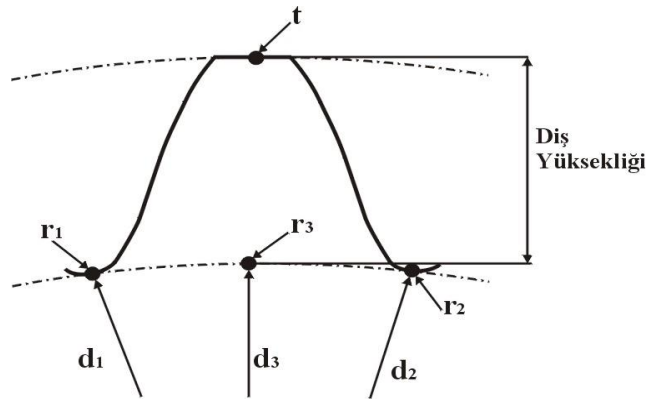
`rt`: Taksimat dairesi apı

`centre`: Dişli merkezi koordinatları

`scale`: resim öleği

#### 4.12 Diş Yüksekliğinin Bulunması

Herbir dişin tepe ve diş dibi noktaları bulunur. Daha sonra diş dibi noktalarının orta noktası ile diş tepe noktası arasındaki mesafe ölölerek diş yüksekliği hesaplanır.



şekil 4.21 Diş yüksekliğinin bulunması

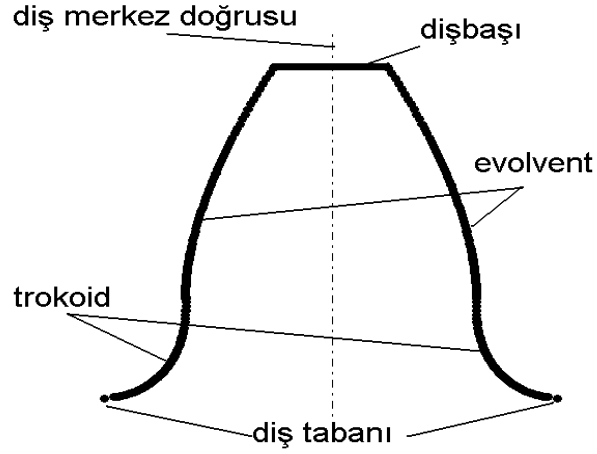
Ekte verilen function `find_tooth_roots(x_s,y_s)` fonksyonu şekil 4.21’de  $r_3$  ile gösterilen diş dibi noktasını bulur. İlk olarak  $r_1$  ve  $r_2$  noktaları tespit edilir. Daha sonra bu noktaların merkezden uzaklıkları ( $d_1$ ,  $d_2$ ) bulunur. Daha sonra bu iki nokta arasında merkezden  $d_3 = \frac{d_1 + d_2}{2}$  uzaklıkta bulunan  $r_3$  noktası dişin dib noktası olarak tespit edilir.

Yine ekte verilen function `height=tooth_height(x_s, y_s, scale)` fonksyonu her bir dişin diş yüksekliğini ‘find\_tooth\_tips’ fonksyonu ile bulunan diş uç noktaları ile ‘find\_tooth\_roots’ fonksyonu ile bulunan diş dib noktaları arasındaki mesafeyi hesaplayarak bulur.

`x_s, y_s`: Zincir kodu ile elde edilen dişlinin sınır koordinatları

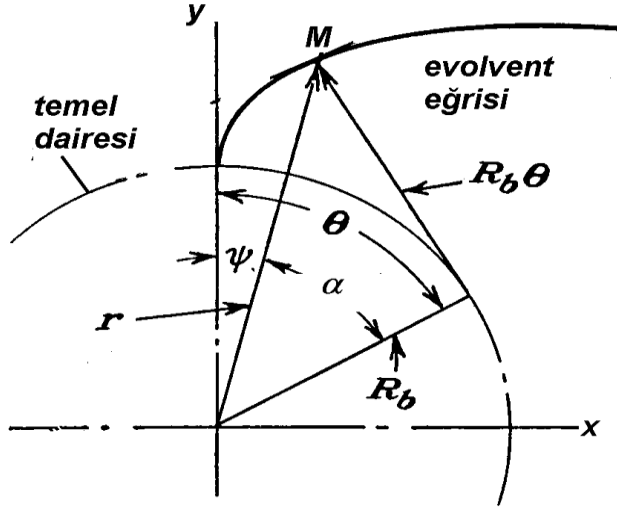
`scale`: Resim öleğidir.

#### 4.13 Referans Evolvent Profillerin Bulunması



Şekil 4.22 Dişli profilleri

Evolvent eğrisi  $R_b$  yarıçapında bir silindirin üzerinde teğet olarak duran bir doğrunun teğet noktasının, doğrunun kaydırılmadan silindir üzerinde yuvarlanması ile çizdiği egridir.  $R_b$  yarıçaplı daireye temel daire, doğruya da ana doğru denir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 Evolvent profilin çıkartılması

Bu çalışmada, evolvent düz dişli profili elde etmek için, Litvin tarafından geliştirilen parametrik ifadeler [8] kullanılmıştır.

$$M(\theta, r_b) = \begin{cases} x(\theta) = r_b (\sin(\theta) - \theta \cos(\theta)) \\ y(\theta) = r_b (\cos(\theta) + \theta \sin(\theta)) \end{cases} \quad (4.18)$$

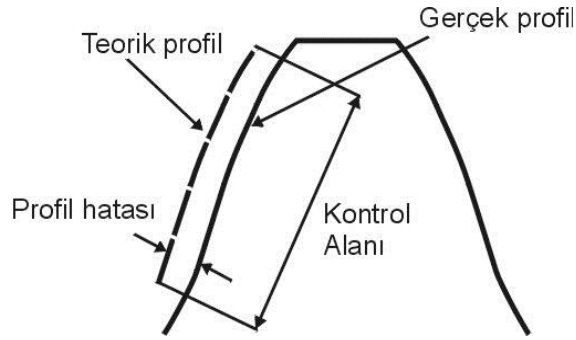
Ekte verilen function  $evol=ref\_evolvent(x\_r,y\_r,z,rb,centre,de1,de2)$  fonksyonu verilen 'x\_r,y\_r' evolvent eğrisinin koordinatları, 'z' diş numarası, 'centre' dişlinin merkezi ve 'de1', 'de2' evolvent profilin başlama ve bitiş çapları için referans evolvent profilleri oluşturur.

#### 4.14 Evolvent Profil Hatalarının Belirlenmesi

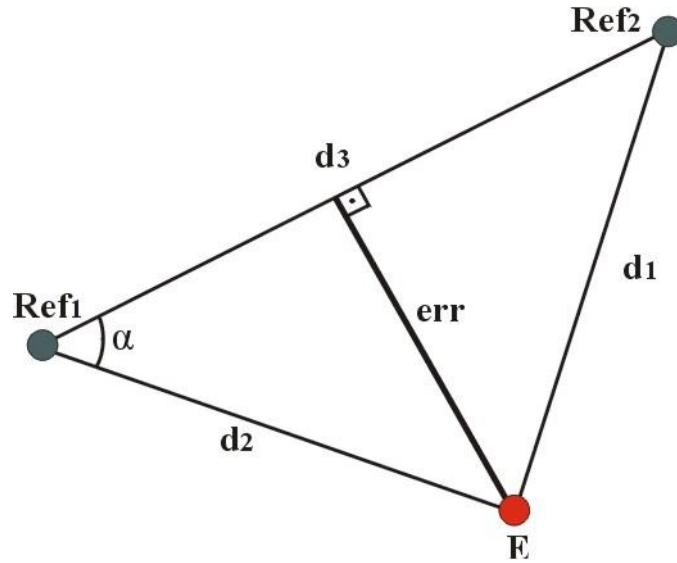
İki çeşit evolvent profil hatası hesaplanmaktadır. Birincisi profil form sapması, ikincisi profil açısı sapmasıdır.

##### 4.14.1 Profil form sapmasının belirlenmesi

Resim üzerinden alınan evolvent profil ile referans evolvent profil arasındaki maksimum fark olarak hesaplanır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24 Profil form sapması



Şekil 4.25 Profil form hatasının bulunması

Resim üzerinden elde edilen evolvent profilin her bir noktasına en yakın iki referans evolvent profil noktası bulunur ve Şekil 4.25’de görünlüğü gibi bu üç noktanın oluşturduğu üçgenin yüksekliği o evolvent noktasının hatası olarak belirlenir. Daha sonra her evolvent profil için bulunan hataların en büyüğü o evolvent profilin hatası olarak tespit edilir.

Şekil 4.25’ten

$$d_1^2 = d_2^2 + d_3^2 - 2 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot \cos \alpha \quad (4.19)$$

$$\alpha = \arccos \left( \frac{d_2^2 + d_3^2 - d_1^2}{2 \cdot d_2 \cdot d_3} \right) \quad (4.20)$$

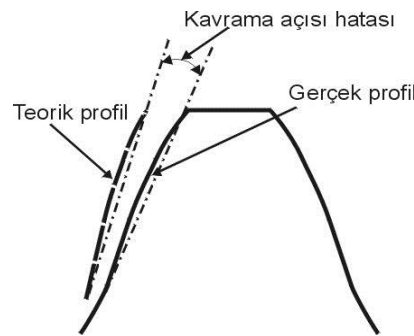
$$err = d_2 \cdot \sin \alpha \quad (4.21)$$

olduğu gösterilebilir.

Ekte verilen function `err=evolvent_error(ev_data,ref_data)` fonksyonu ‘ev\_data’, evolvent eğri verisi ve ‘ref\_data’ referans evolvent verisi arasındaki farkı yukarıda anlatılan şekilde hesaplar.

#### 4.14.2 Profil açı sapmasının belirlenmesi

Resim üzerinden alınan evolvent profil ile referans evolvent profilin başlangıç ve bitiş noktalarından geçen iki doğrunun arasındaki açısal fark olarak hesaplanır. (Şekil 4.26)



Şekil 4.26 Profil açı sapması

Ekte verilen function `p_err(z)=pressure_angle_error(evol,x_ev,y_ev);` fonksyonu referans ve resim evolvent profil değerlerini alarak yukarıdaki tanıma göre profil açı sapmalarını hesaplamaktadır.

## 5. DİŞLİLERİN BOYUTSAL ÖLÇÜM İŞLEMİNİN YAPILMASI

### 5.1 Dişlilerin Modül ve Kaydırma Faktörlerinin Belirlenmesi

Uygulamada kullanılacak dişliler bir hidrolik pompadan söküldükleri için elimizde modül ve kaydırma faktörü bilgileri bulunmamaktadır. Dişli çarkların modüllerinin bulunması için kumpas ile belirli sayıda diş arası mesafeleri ölçülür ( $W_k$ ). Ölçülecek diş sayısı dişlinin diş sayısına bağlı olarak belirlenir. Dişli çarkın modülünün bir katsayıyla çarpımı alınan ölçü olan  $W_k$ 'yı verir [9].

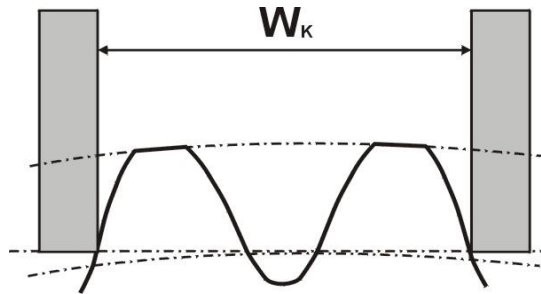
$$W_k = C \cdot m \quad (5.1)$$

Tablo 5.1 Dişli çark modülünün ölçümünde kullanılacak veriler

| z (diş sayısı) | s (ölçülecek diş sayısı) | C      |
|----------------|--------------------------|--------|
| 8              | 2                        | 4.5403 |
| 9              | 2                        | 4.5542 |
| 13             | 2                        | 4.6102 |
| 14             | 2                        | 4.6242 |
| 15             | 2                        | 4.6383 |

Aşağıdaki hesaplamalarla bu veriler elde edilmiştir.

-Büyük dişli için: İki diş arası kumpasla ölçülmüş ve modül değeri bulunmuştur. Diş sayısı 8 olduğu için Tablo 5.1'den C katsayısı 4.5403 olarak alınmıştır.



Şekil 5.1 Dişli üzerinden kumpas ile ölçü alınması

$$W_k = 4.5403 \cdot m = 22.7 \Rightarrow m = 5 \quad (5.2)$$

olarak bulunmuştur. Büyük dişli çarkın modülü 5 olarak belirlenmiştir.

Kaydırma faktörünün belirlenmesinde dişlinin diş başı çapından yararlanılır.

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = m \cdot z + 2 \cdot m + 2 \cdot x \cdot m = 51mm \quad (5.3a)$$

$z=8$  (diş sayısı)

$$10 \cdot x = 1 \Rightarrow x = 0.1 \quad (5.3b)$$

olarak belirlenmiştir.

-Küçük dişli için: Diş sayısı 14 olduğu için Tablo 5.1'den C katsayısı 4.6242 olarak alınmıştır.

$$W_K = 4.6242 \cdot m = 8.1 \Rightarrow m = 1.75 \quad (5.4)$$

olarak bulunmuştur. Küçük dişlinin modülü 1.75 olarak belirlenmiştir.

Kaydırma faktörünü belirlemek için ise;

$$d_a = d + 2 \cdot h_a = m \cdot z + 2 \cdot m + 2 \cdot x \cdot m = 29mm \quad (5.5a)$$

$z=14$  (diş sayısı)

$$3.5 \cdot x = 1 \Rightarrow x = 0.286 \quad (5.5b)$$

olarak belirlenmiştir.

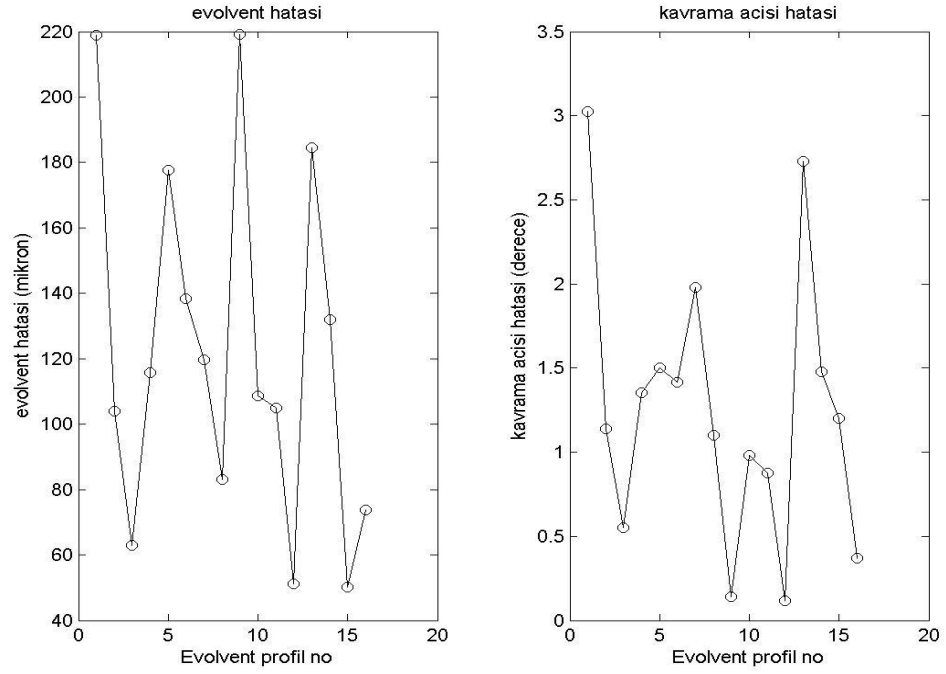
Ekte verilen function par=get\_parameters(m,zet,alpha,x,scale); girilen modül, diş sayısı, basınç açısı, kaydırma faktörü ve ölçeğe göre ölçüm işlemi için gereken dişlinin temel boyutlarını hesaplamaktadır. Bu parametreler;

```
rt=par(1); %taksimata dairesi yari çapi  
re1=par(2); %evolvent profil alt yari çapi  
re2=par(3); %evolvent profil üst yari çapi  
rb=par(4); %temel dairesi yari çapi  
pt=par(5); %disli hatvesi  
s=par(6); %dis kalinligi  
ha=par(7); %dis basi yüksekligi  
hf=par(8); %tavan yüksekligi
```

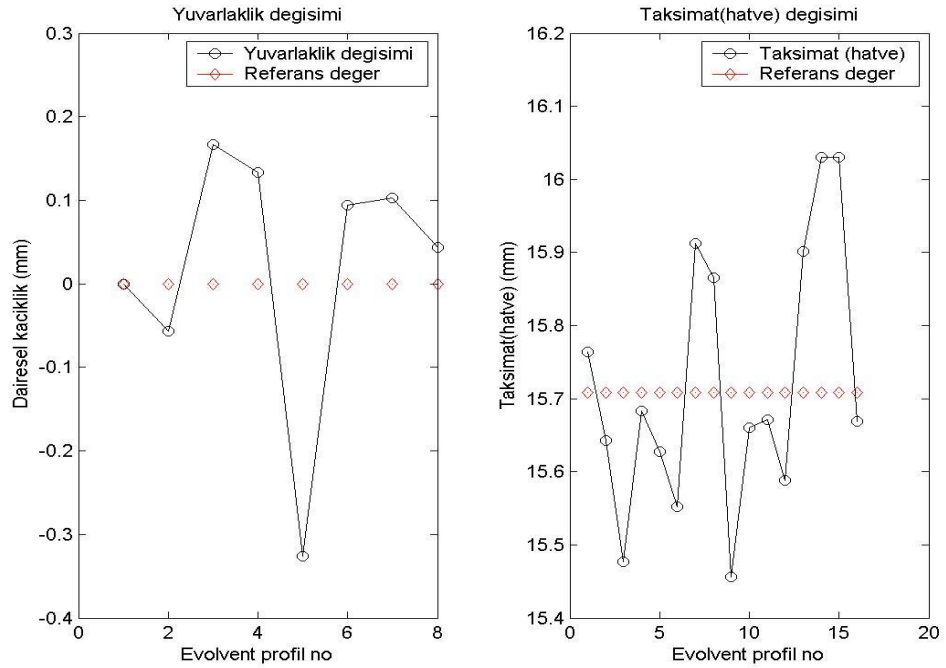
## 5.2 Ölçüm Sonuçları

İki ayrı numune için elde edilen sonuçlar Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilmiştir. Aşağıda verilen büyük dişlinin sonuçları elde etmek için kullanılan

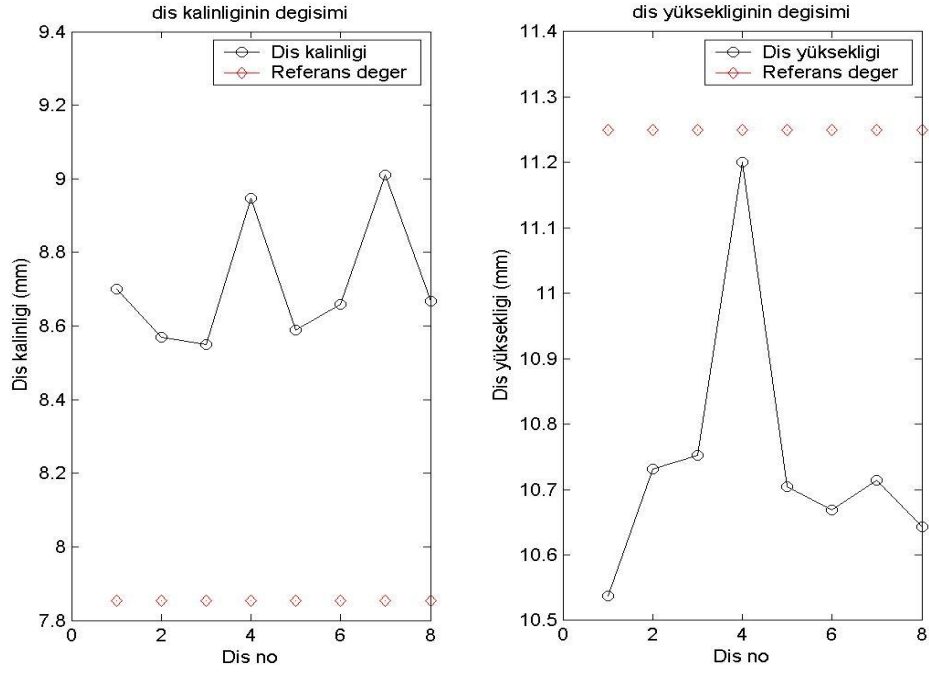
resminin çözünürlüğü 1162x1162 piksel ve resim ölçeği 0.0448mm/pikseldir. Büyük dişli çarkın kontrol işlemi 71 saniyede tamamlanmıştır. Ekte verilen 'DISLI\_KONTROL.m' dosyası bu işlemi gerçekleştirmektedir.



Şekil 5.2 Büyük dişlinin evolvent hataları

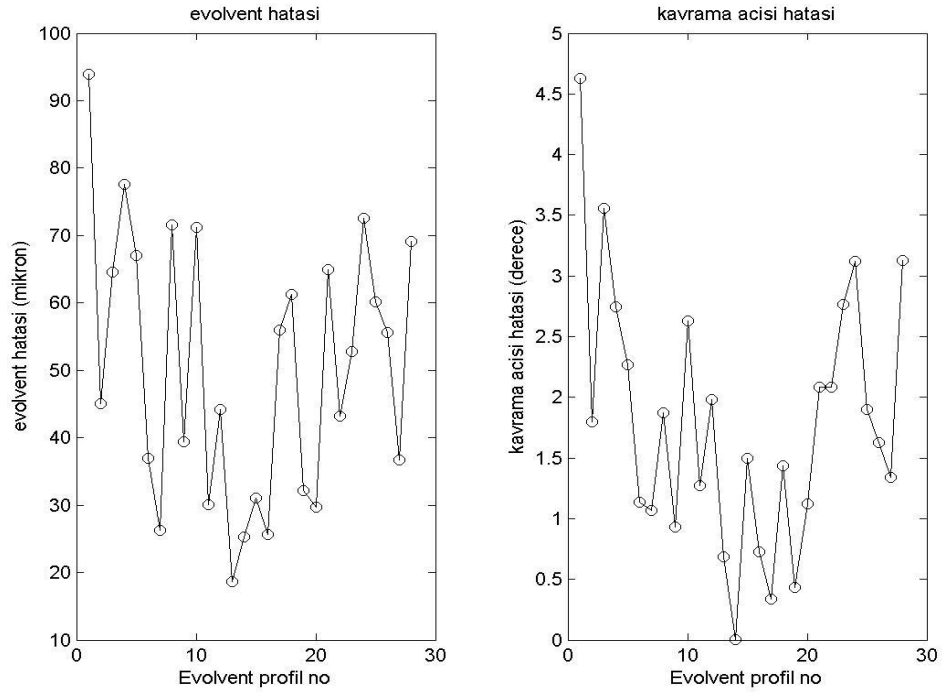


Şekil 5.3 Büyük dişlinin yuvarlaklık ve taksimat hataları

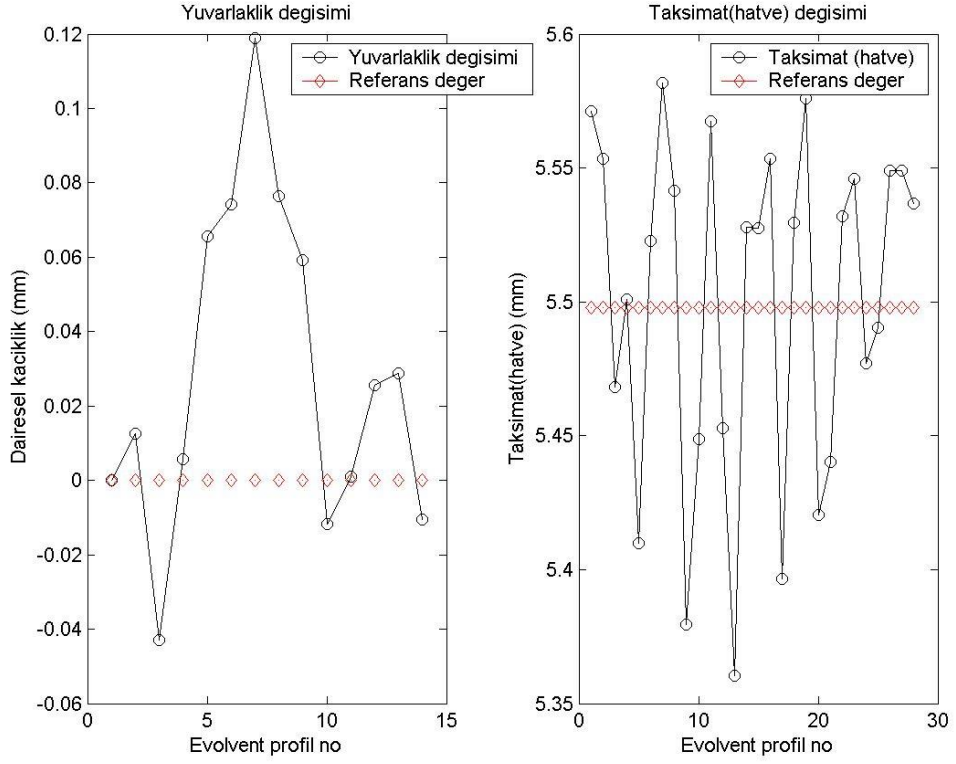


Şekil 5.4 Büyük dişlinin diş kalınlığı ve diş yüksekliği hataları

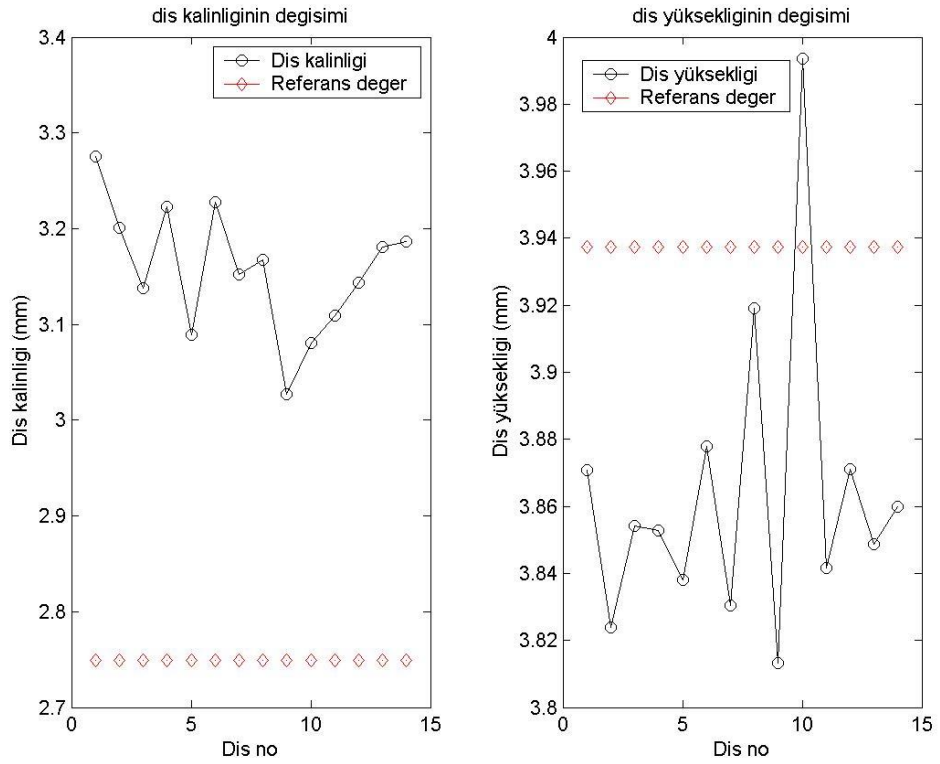
Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilen küçük dişli sonuçlarını elde etmek için kullanılan resminin çözünürlüğü 907x907 pikseldir ve resim ölçeği 0.034mm/pikseldir. Küçük dişli çarkın kontrol işlemi 31 saniyede tamamlanmıştır.



Şekil 5.5 Küçük dişlinin evolvent hataları



Şekil 5.6 Küçük dişlinin yuvarlaklık ve taksimat hataları



Şekil 5.7 Küçük dişlinin diş kalınlığı ve diş yüksekliği hataları

### *-Ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi*

Görüntü işleme ile boyut ölçümünde kullanılan sistemlerde kamera ve ölçülecek parça servo motor kontrollü bir sistem ile hareket ettirilerek sağlıklı bir görüntü elde edilebilmektedir. İlk aşamada üzerinde çalışılan parçaların görüntüleri servo sistem olmadan alınmış ve yazılım geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemin çözünürlük imkanlarının kısıtlı olması ve kamera ekseninin parça eksenine ile karşılaştırılamaması nedeniyle elde edilen hata değerleri nispeten yüksek çıkmıştır.

Örnek dişliler için elde edilen evolvent hatası değerleri yüksek çıkmıştır. Diğer boyutsal kontroller olan dairesellik, hatve, diş kalınlığı ve diş yüksekliği kontrollerinde ise referans değerlerine yaklaşık değerler bulunmuştur.

Daha iyi sonuç elde etmek amacı ile ikinci aşamada servo bir sistem kullanılarak dişli resmi alınmış parça ve kameranın eksenlerinin karşılaştırılması sorunu bu sistem ile giderilmiştir.

### **5.3 Servo Kontrollü Sistem ile Dişli Çark Görüntüsünün Alınması ve Verilenin Geliştirilen Yazılımla İşlenmesi**

Görüntü işleme sistemlerinde servo kontrollü sistemlerin kullanılmasının birçok nedeni vardır. Bunlar;

1. Servo sistemlerin kamera kontrolü ile yüksek çözünürlük elde edebilmeleri,
2. Boyut ölçümünün hassasiyetinde çok etkili olan parça ve kamera düzlemlerinin paralelliğinin sağlanabilmesi,
3. Işık kontrolü sayesinde parça üzerinden daha sağlıklı bir görüntünün alınabilmesi, olarak özetlenebilir.



Şekil 5.8 Servo sistem ile dişli çarkın görüntüsünün alınması

Üzerinde çalıştığımız iki numuneden küçük dişli çarkın Nikon VMR-3020 model bilgisayarlı görüntü işleme sistemi (Şekil 5.4) ile görüntüsü alınmıştır. Büyük dişli çark mille yekpare dişli çark olması nedeniyle kameranın hareketini kısıtlamış olmasından dolayı sistemden ölçüm alınamamıştır.

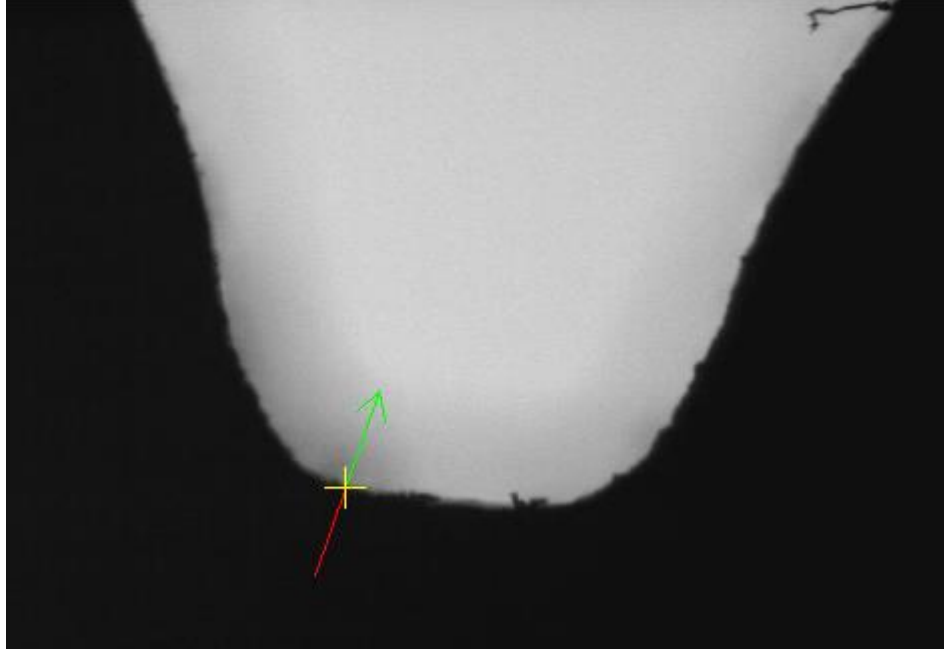
Servo sistemlerin parça görüntüsünü alması, yüksek çözünürlüğü sağlamak amacıyla tek bir görüntüde olmamaktadır. Aşağıdaki adımlar takip edilerek istenilen çözünürlükte parça boyut bilgisi elde edilebilmektedir.

1. Dış hat başlangıç noktası belirlenir,
2. İlerleme yönü belirlenir,
3. İstenilen çözünürlük belirlenir,
4. Servo sistem ile elde edilen dış hattın ilerleme yönüne göre, bütün dış hat taranır.
5. Elde edilen veriler boyut ölçüm işleminde kullanılır.

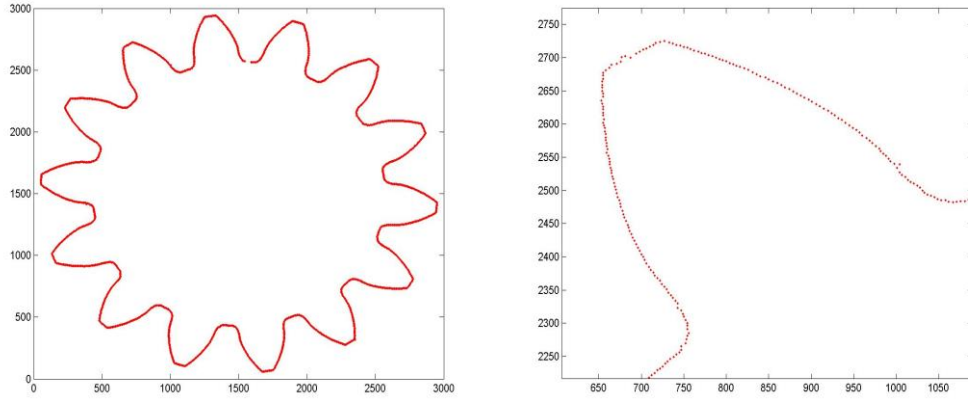
Şekil 5.5’de görüldüğü gibi ilk olarak parçanın üzerinden taranması istenen dış hat üzerinden bir nokta belirlenir, daha sonra bu noktanın ilerleme yönü tespit edilir. Daha sonra servo sistem, istenilen çözünürlükte bu dış hattı elde edecek şekilde kamera ve parça hareketlerini kontrol ederek dış formu çıkarır. Dişli çark cam bir

zemin üzerinde ve altında bir ışık kaynağı olduğu için kamera parçanın gölgesi üzerinden bu işlemleri gerçekleştirir.

Daha sonra alınan bu koordinat verileri \*.csv dosyası olarak alınır. Alınan bu veriler geliştirdiğimiz yazımda kullanılmak üzere Matlab ortamına aktarılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.9 Servo sistem ile alınan parça görüntüsü

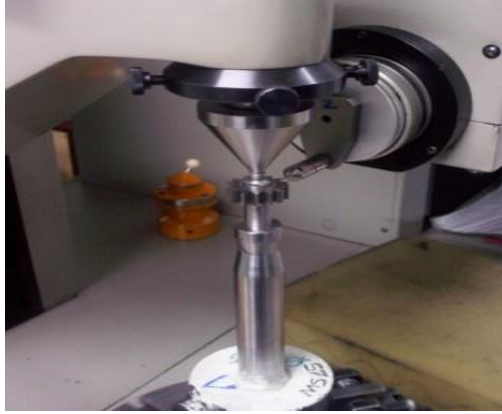


Şekil 5.10 Taranan dişli çark dış hat koordinatlarının Matlab'e aktarılması

Servo kontrollü sistem ile 50µm hassasiyetinde koordinat verileri alınabilmektedir. Parça üzerindeki çapaklar (Şekil 5.5) daha hassas ölçüm almaya imkan vermemiştir.

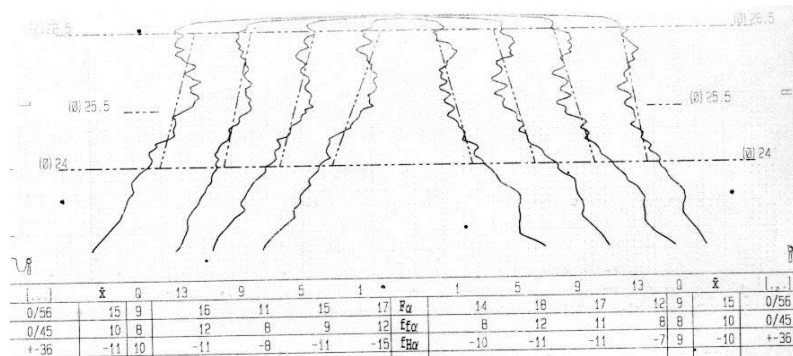
## 6. KOORDİNAT ÖLÇÜM CİHAZINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLARIN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARLA KARŞILAŞTIRILMASI

### 6.1 Koordinat Ölçme Cihazında Dişlilerin Ölçümünün Yapılması



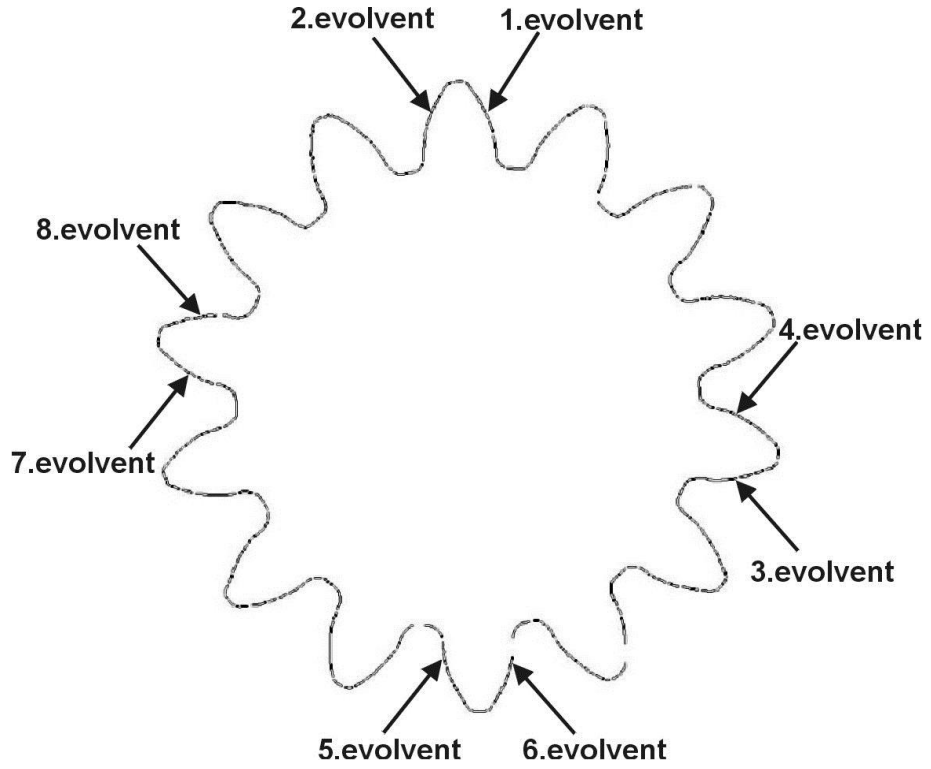
Şekil 6.1 Örnek dişlinin Koordinat ölçüm cihazında ölçümlerinin yapılması

Örnek dişli çarkların koordinat ölçüm cihazında ölçümleri yapılarak evolvent profil hatası tespiti yapılmıştır (Şekil 6.1). Evolvent profil hatası sadece dört diş üzerinden alınmıştır (Şekil 6.2). Koordinat ölçüm cihazlarında ölçüm süresi uzun olduğu için bütün dişler üzerinden ölçü alınmamakta, belirlenen sayı –ki bu sayı 5’in üzerinde olmamaktadır- kadar dişin üzerinden ölçüm alınmaktadır.



Şekil 6.2 Küçük dişli çark evolvent profil hatası CMM ölçüm sonuçları

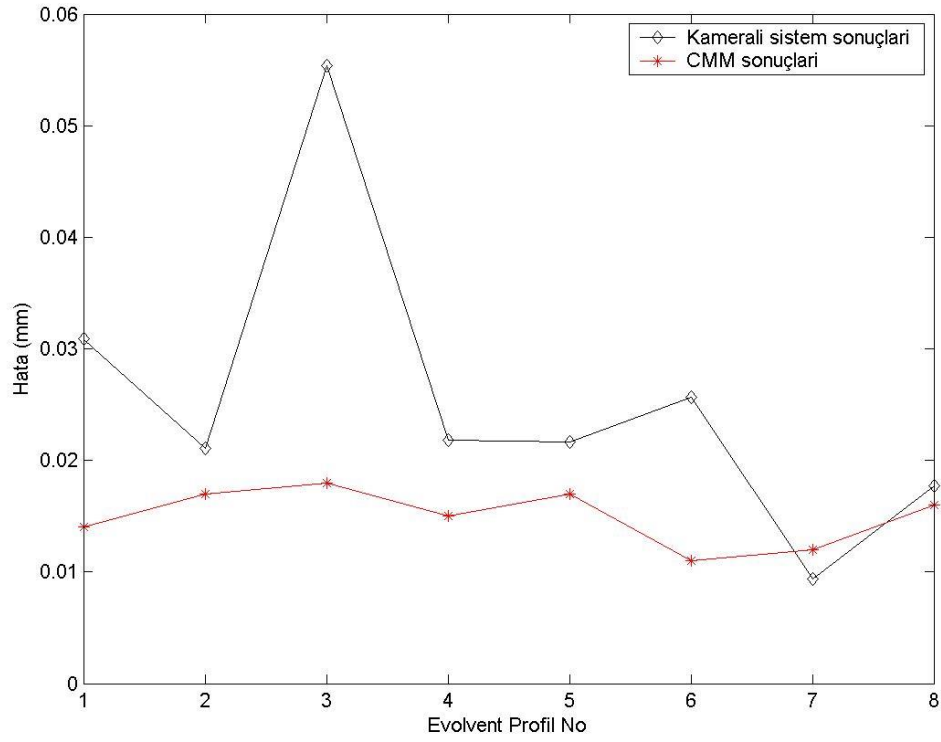
## 6.2 Koordinat Ölçüm Cihazı ile Elde Edilen Sonuçların Görüntü İşleme Yöntemleri ile Elde Edilen Sonuçlarla Karşılaştırılması



Şekil 6.3 Ölçüm alınan dişli çark profilleri

Koordinat ölçüm makinesinden alınan evolvent profil hataları (Şekil 6.3) ile görüntü işleme sistemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 6.4’de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Ekte verilen ‘kucuk\_disli\_CMM.m’ dosyası bu işlemi gerçekleştirmektedir.



Şekil 6.4 Elde edilen sonuçların CMM ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması

Servo kontrollü sistemden alınan görüntü verileri üzerinde yazılımın çalıştırılması ile elde edilen evolvent profil hataları Şekil 6.4’de CMM ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Parça üzerinde belirli evolvent profiller üzerindeki çapaklar nedeniyle bu profiller üzerindeki hatalar yüksek çıkmış ancak diğerlerine belirli bir yakınsama sağlanabilmiştir.

Servo kontrollü sistem üzerinde görüntünün alınma süresi istenilen çözünürlüğe bağlı olarak değişebilmektedir. Alınan görüntü 50µm hassasiyette olup 30 saniyede alınmıştır. Bu görüntü üzerinde yazılımın gerekli hesaplamaları gerçekleştirmesi ise 58,3 saniye sürmüştür.

## 7. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Görüntü işleme yöntemleri ile dişli çarkların boyut ölçümünün yapılmasının diğer ölçüm yöntemlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Sanayide kullanılan görüntü işleme yöntemleri ile boyut ölçümü yapan sistemlerde bu dezavantajlar farklı şekillerde çözülmeye çalışılmıştır. Geliştirilen yazılımın avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir;

Avantajları;

- Boyut ölçüm işleminin daha hızlı yapılması
- Daha çok sayıda diş üzerinden ve daha çeşitli ölçümlerin alınabilmesi
- Dişlinin temel boyutlarını (modül, diş sayısı gibi) kendi bularak sistemi önceden programlamaya gerek kalmaması ve boyut ölçüm işleminin farklı dişliler için ard arda yapılabilmesi
- Koordinat ölçüm sistemlerinde olduğu gibi farklı dişliler için farklı ölçüm problemlerinin kullanımı ve değişimi gibi sorunların olmaması

Dezavantajları;

- Ölçüm sonucunun kullanılan mekandaki ışık değişiminden etkilenmesi
- Parça üzerindeki çapak gibi bozuklukların sonucu etkilemesi
- Kamera sisteminin parça ekseninde yerleştirilmiş olması zorunluluğu

Avantaj ve dezavantajlarına bakıldığında geliştirilen yazılımın alternatif yöntemlere göre en büyük avantajı seri boyut ölçüm işlemleri için kullanılabilir olmasıdır. Diğer yandan en büyük dezavantajı ise yüksek kalitede dişliler için gerekli hassasiyette ölçümün gerçekleştirilememesidir.

Ortamdaki ışığın kontrol edilmesi, servo kontrollü bir kamera sisteminin kullanılması gibi endüstriyel bilgisayarlı görüntü işleme sistemlerinde kullanılan yöntemlerle geliştirilen yazılımın dezavantajları yok edilebilir ve sistem yüksek hassasiyette ölçümler içinde kullanılabilir hale getirilebilir.

Kullanım kolaylığı açısından bakıldığında geliştirilen yazılımın oldukça büyük bir avantajı mevcuttur. Bu yazılım ile kullanıcının kontrol edilecek dişlilerin temel boyutları olan modül, profil kaydırma oranlarını ve dış çapını bir veritabanına girmesi yazılımın çalışması için yeterli olacaktır.

Avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurularak kullanılacak en uygun ölçüm sistemine karar verilebilir. Günümüzde gelişen yazılım ve donanım teknolojisi ile birlikte görüntü işleme teknikleri boyut ölçümünde her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Prof. Dr. Hikmet Rende**, 2000. Makine Elemanları. Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- [2] **Osman Taşyüz**, 1974. Dişli Çarklarda Kalite Kontrol Esasları, Makina Mühendisleri Odası Yayınları Yayın No:91, İstanbul.
- [3] **Connie Dotson, Roger Harlow and Richard Thompson**, 2003. Fundamentals of Dimensional Metrology, Newyork.
- [4] **William K. Pratt**, 2001. Digital Image Processing, John Wiley & sons inc.
- [5] **John C. Russ**, 1998. The Image Processing Handbook, CRC Press.
- [6] **Gerhard X. Ritter, Joseph N. Wilson**, 1996. Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra, CRC Press.
- [7] **Mike Heath, Sudeep Sarkar, Thomas Sanocki and Kevin Bowdery**, 1996. Comparison of Edge Detectors, *Computer Vision and Image Understanding*, **69**, 38–54.
- [8] **Litvin, F.L.**, 1994. Gear Geometry and Applied Theory, PTR Prentice Hall, NewJersey.
- [9] **Akkurt, Mustafa**, 1990. Makina elemanları Cilt 2, Birsen Yayın Evi, İstanbul.
- [10] **Ian T. Young**, 2000. Image Processing Fundamentals CRC Press LLC.

## **EKLER**

**Ek 1:** Matlab kodu.

## **ÖZGEÇMİŞ**

29-Ekim-1979'da İstanbul'da doğdu. 1997 yılında İstanbul Ticaret Odası Anadolu Ticaret Meslek Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünü kazandı. Mezun olduktan bir yıl sonra, 2002 yılında, İTÜ Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans programına başladı.

Üniversite son sınıfta Y.T.Ü Kosgeb bünyesinde faaliyet gösteren Alarge lim. Şti.'de mühendis olarak çalışmaya başladı. Daha sonra sırasıyla 2003 yılında İronFT Makina A.Ş'de üç ay, İTÜ Rotam araştırma merkezinde bir yıl süreyle çalıştı.