

I

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**LAZER BENEK KONTRAST VE KORELASYON**

**YÖNTEMLERİYLE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ**

**İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Burak EREN**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 609.01.00

Sunuş Tarihi: 30.04.2009

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökalg KAHRAMAN**

**Bornova-İZMİR**



### III

**BURAK EREN** tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak sunulan “**LAZER BENEK KONTRAST VE KORELASYON YÖNTEMLERİYLE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ İYİLEŞTİRİLMESİ**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 30.04.2009 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza:**

**Jüri Başkanı :**

**Raportör Üye :**

**Üye :**



**ÖZET****LAZER BENEK KONTRAST VE KORELASYON  
YÖNTEMLERİ İLE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

EREN, Burak

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Gökalp KAHRAMAN

Ocak, 2009

Bu tezde, lazer ışının metal yüzeyinde oluşturduğu benek deseninden yola çıkılarak, metal yüzeyinin pürüzlülüğüne yaklaşımlar getirilmiştir. Metal yüzeyinin pürüzlülüğünün büyüklüğüne göre, benek kontrast ve benek korelasyon yöntemleriyle, pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.

Pürüzlülüğün, gelen ışının dalga boyundan küçük olduğu durumlarda benek kontrast yöntemi kullanılmış, bu yöntem ile farklı geliş açıları ve farklı polarizasyonlar için ölçümler yapılmış ve aralarındaki ilişki açığa çıkarılmıştır.

Pürüzlülüğün, gelen ışının dalga boyundan büyük olduğu durumlarda ise benek korelasyon yöntemi kullanılmıştır. Açısal benek korelasyonu ile ölçüm yapılırken, normal korelasyon yöntemi kullanılmış ve benek yer değiştirmesiyle ilişkilendirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Yüzey pürüzlülüğü, benek kontrast, benek korelasyon, lazer benek



**ABSTRACT**

**IMPROVEMENT TO SURFACE ROUGHNESS  
MEASUREMENT USING LASER SPECKLE CONTRAST  
AND CORRELATION METHODS**

EREN, Burak

MSc in Electric-Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gökalp KAHRAMAN

January, 2009

In this thesis, surface roughness on metallic surfaces have been brought, using laser speckle which have been created by laser beam on metal surface. Depending on surfaces' roughness, laser speckle contrast, and laser speckle correlation methods have been used to measure.

Laser speckle contrast method has been used in case that surface roughness is less than laser beam's wavelength. Measurements have been done using different angles of incidence and polarizations and their relationships have been exposed.

Laser speckle correlation method has been used in case that surface roughness is greater than laser beam's wavelength. While using angular speckle correlation, normal correlation method used and has been related to speckle displacement.

**Keywords:** Surface roughness, speckle contrast, speckle correlation, laser speckle



## TEŞEKKÜR

Bu alıőmada öncelikle beni her zaman destekleyen aileme, danıőmanım Do. Dr. Gökalp Kahraman'a, yardımlarını benden esirgemeyen Arő. Gör. Yavuz Öztürk'e, test malzemelerini sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden Arő. Gör. Orkut Sancakoğlu'na ve Hipokrat Tıbbi Malzemeler İmalat ve Pazarlama A.Ő. 'den Mehmet etin'e teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
TEŞEKKÜR.....	IX
İÇİNDEKİLER .....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XV
1.GİRİŞ .....	1
1.1 Önbilgi .....	2
1.2 Amaç .....	3
1.3 Alanlar.....	3
1.3.1 Kullanım alanı.....	3
1.3.2 Optik.....	3
1.3.3 Görüntü ve işlenmesi .....	3
1.4 Tez Yapısı .....	4

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ .....	5
2.1 Pürüzlülük.....	5
2.2 Pürüzlülük Ölçümü .....	6
2.2.1 Mekanik profilometre .....	6
2.2.2 Optik yöntemler .....	6
2.2.3 Ultrasonik yöntemler .....	7
2.2.4 Mikroskoplar.....	7
2.3 Yüzey Parametreleri .....	7
2.4 Pürüzlülük Parametreleri .....	9
2.5 Sanayide Yüzey İşlemleri .....	10
3.LAZER BENEĞİ.....	13
3.1 Benek Oluşumu.....	14
3.1.1 Objektif sistemde benek.....	15

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1.2 Subjektif sistemde benek .....	15
3.2 Benek İstatistiği.....	15
3.2.1 Polarize benek deseninin 1. Dereceden istatistiği .....	16
4. BENEK KONTRAST ANALİZİ.....	21
4.1 Deney Düzenegi.....	21
4.2 Görüntü İşleme.....	25
4.3 Deney .....	25
4.3.1 Eliptik polarizasyon, 30° geliş açısı .....	26
4.3.2 Doğrusal polarizasyon, 30° geliş açısı .....	27
4.3.3 Eliptik polarizasyon, 45° geliş açısı .....	28
4.3.4 Lineer polarizasyon, 45° geliş açısı.....	29
4.3.5 Eliptik polarizasyon, 70° geliş açısı .....	30
4.3.6 Doğrusal polarizasyon, 70° geliş açısı .....	31
5. BENEK KORELASYON ANALİZİ .....	33

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.1 Teori.....	33
5.2 Benek Yer Değiştirmesi.....	39
5.3 Görüntü İşleme .....	42
5.4 Deney .....	43
5.4.1 Korelasyon Yöntemi.....	44
6. SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	51
ÖZGEÇMİŞ .....	55



**ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)**

<b><u>Şekil</u></b> .....	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 2.1 Yüzey pürüzlülüğü örneği	5
Şekil 2.2 ISO 1302:2002 yüzey tanımlama şeması .....	8
Tablo 2.1 Yaygın yüzey pürüzlülüğü parametreleri .....	10
Tablo 2.2 Yüzey işlemleri sonrası oluşan pürüzlülükler .....	12
Şekil 3.1 Lazer benek görüntüsü.....	13
Şekil 3.2 Benek oluşumu .....	14
Şekil 3.3 Işık şiddeti olasılığı.....	20
Şekil 4.1 Benek kontrast analizi deney düzeneği (şematik) .....	21
Şekil 4.2 Benek kontrast analizi deney düzeneği .....	22
Şekil 4.3 Uzaysal Filtre.....	23
Şekil 4.4 Pürüzlülüğü 0.14 ile 0.45 µm arasındaki yüzeyler .....	24
Şekil 4.5 Kırpma işlemi .....	25



**ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)**

<b><u>Şekil</u></b> .....	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 4.6 30°'de eliptik polarize lazer ışığı kontrast ölçümleri.....	26
Şekil 4.7 30°'de doğrusal polarize lazer ışığı kontrast ölçümleri .....	27
Şekil 4.8 45°'de eliptik polarize lazer ışığı kontrast ölçümleri.....	28
Şekil 4.9 45°'de lineer polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri.....	29
Şekil 4.10 70°'de eliptik polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri.....	30
Şekil 4.11 70°'de doğrusal polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri.....	31
Şekil 5.1 Genel sistem düzeneği .....	33
Şekil 5.2 Uzak alan benek düzlemi.....	37
Şekil 5.3 Benek yer değiştirme örneği.....	39
Şekil 5.4 Birinci resmin otokorelasyon matrisi .....	40
Şekil 5.5 Birinci resmin ikinci resimle çapraz korelasyon matrisi ....	41



**ŞEKİLLER DİZİNİ (devamı)**

<b><u>Şekil</u></b> .....	<b><u>Sayfa</u></b>
Şekil 5.6 Açı değişimi ve korelasyon matrisi maksimumu ilişkisi...42	
Şekil 5.7 Benek korelasyon analizi deney düzeneği (şematik).....43	
Şekil 5.8 Benek korelasyon analizi deney düzeneği.....44	
Şekil 5.9 Pürüzlülüğü belli malzemeler.....45	
Şekil 5.10 6µm pürüzlülüğe sahip yüzeyin farklı gelme açıları için korelasyon matrisi kesiti.....46	
Şekil 5.11 1.5 µm pürüzlülüğe sahip yüzeyin farklı gelme açıları değişimi için korelasyon matrisi kesiti.....47	
Şekil 5.12 Farklı pürüzlülüklere sahip yüzeyler için korelasyon eğrileri .....48	
Şekil 5.13 Şekil 5.11'e Gaussian fit uygulanmış hali .....49	
Şekil 5.14 0.007 radyan benek kayması için pürüzlülük korelasyon ilişkisi.....50	



## 1. GİRİŞ

Tezdeki tüm çalışmalar Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde yapılmış ve Ege Üniversitesi Rektörlüğü'nün Bilimsel Araştırma Projeleri fonuyla desteklenmiştir.

Kullanılan pürüzlülük ölçümü yöntemleri basit olarak, uyumlu bir lazer ışığının, pürüzlü bir yüzeye çarptıktan sonra yaptığı saçılımlardan, yüzey hakkındaki bazı bilgilerin çıkarılması prensibine dayanmaktadır. Yapılan bu çalışma metal sanayinde kullanılmak üzere pürüzlülük ölçümünü ele aldığından metal yüzeylerle çalışılmış ve farklı pürüzlülük büyüklükleri için başlıca iki yöntem belirlenmiştir.

Seçilen yöntemlerden ilki lazer benek kontrast yöntemidir. Bu yöntemde hedef pürüzlülük, lazer ışığının dalga boyundan küçük olmalıdır. Benek kontrast yöntemi, uygulama açısından oldukça basittir. Alınan benek görüntüsünün birinci dereceden istatistiklerine bağlıdır. Benek kontrastı, belli koşullar sağlandığında, pürüzlülük arttıkça, kontrast değerinin doğrusal bir artış göstermesi beklenmektedir. Doğrusallık yakalandıktan sonra, aynı ölçüm parametreleriyle ölçüm rahatlıkla yapılabilir. Elde edilen doğru fit edildiğinde denklem için gerekli parametreler yerleştirilir ve pürüzlülük bulunur.

Seçilen yöntemlerin diğeri ise benek korelasyon yöntemidir. Bu yöntem kullanıldığında hedef pürüzlülük, lazer ışığın dalga boyundan büyük olmalıdır. Daha önceki çalışmalarda, pürüzlülük değerinin yaklaşık olarak lazer ışığın 20 katına kadar ölçülebilmektedir. Lazer benek korelasyonu için, her bir yüzeyden iki farklı örnek alınmalıdır. Açısal benek korelasyonu adı verilen yöntemde, iki farklı örnek, farklı açılardan alınır ve bu iki fotoğrafın korelasyonundan çıkarım yapılır. Benzer şekilde, spektral benek korelasyonu adı verilen yöntemde ise lazer ışığı farklı dalga boylarında verilir ve bu farklı dalga boylarına göre alınan iki fotoğrafın korelasyonundan çıkarım yapılır. Bu yöntem, lazer benek kontrast yöntemine göre uygulaması daha karmaşık bir yöntemdir fakat kontrast yöntemine göre çevre koşullardan fazla etkilenmez. Elde edilen korelasyon iki farklı

fotoğrafa bağılı olduğundan yoğunluk ya da uzaklık gibi değerlerin değişmesi sonuca etki etmeyecektir.

## 1.1 Ön bilgi

Yüzey pürüzlülüğü sanayinin birçok dalında büyük öneme sahip bir parametredir. Günümüzde kullanılan pürüzlülük ölçme yöntemlerinin en hızlılarından biri, lazer ile yapılan ve ışının saçılımına dayanan benek yöntemleridir.

Elektromanyetik dalgaların, pürüzlü yüzeyler üzerine düştüğünde yaptığı saçılımların farklı oldukları keşfedildiğinden beri, elektromanyetik dalgalar kullanarak yüzey pürüzlülüğü ölçümüne kolaylık getirilmek istenmiştir. İlk zamanlarda bazı belirsizlikler ve tutarsızlıklarla karşılaşılsa da, günümüzde pürüzlülük ölçümü için güvenilir ve hızlı bir yöntem olan lazer benek yöntemleri rahatlıkla kullanılabilirlerdir.

Yapılan araştırmalar tüm pürüzlülük değerlerinin tek bir optik yöntem ile ölçülemeyeceğini göstermiştir. Bu sorun, farklı ölçüm metotlarını açığa çıkarmış ve optik yöntemlerle pürüzlülük ölçümü işlemini geliştirmiştir. Bu tezde pürüzlülük ölçüsü olarak sanayide en çok kullanılan kesme işlemleri ele alınmış, ve bu kesme işlemlerinin yaratacağı pürüzlülüklerin ölçüsüne uygun ölçüm metotları seçilmiştir.

Beckmann ve Spizzichino'nun 1960'lı yıllarda yaptığı çalışmalar pürüzlü bir yüzeye çarpıp saçılan elektromanyetik dalgaların durumuna ışık tutmuştur (Beckmann and Spizzichino, 1963). Bu zamandan beri optik yöntemlerle temassız bir yüzey pürüzlülüğü incelenmesi isteği oluşmuştur. İlk zamanlarda saçılan dalganın birinci derece istatistikleriyle uğraşmış, bu sırada Goodman'a göre ikinci dereceden istatistiği sadece kullanılan optik cihazlara bağlanmıştır, fakat daha sonra Crane'in yaptığı çalışmalar ikinci dereceden istatistiğin yüzey pürüzlülüğüyle yüksek derecede ilişkili olduğunu ispatlamıştır (Leger et al., 1975). Bu sıralarda Fujii ve Asakura'nın yaptığı deneysel çalışmalar birinci dereceden istatistiği yüzey pürüzlülüğüne bağlamıştır (Fujii and Asakura, 1974). Aynı zamanda Leger'in yaptığı çalışmalar ikinci dereceden istatistiği yüzey pürüzlülüğüne bağlamış ve analog ölçüm teknikleriyle

deneysel olarak ispatlamıştır. (Leger et al., 1975). Günümüzde fotoğraflama tekniklerinin gelişmesi, kolaylaşması ve gelişen görüntü işlemeyle bu çalışmalar hızlanmış ve Toh'un yaptığı çalışmalarla, bu gelişmelere adapte edilmiş ve 1.6  $\mu\text{m}$  ile 50  $\mu\text{m}$  arasında ölçümler başarılmıştır. (Toh et. al., 2001)

## **1.2 Amaç**

Çalışmamızın amacı sanayide yaygın bir şekilde kullanılan metal kesme işlemlerinde ortaya çıkan pürüzlülük büyüklüklerini ölçmektir. Ölçülen pürüzlülük büyüklüklerine, belli iyileştirme yöntemleri getirilerek, daha sonra gerek metal yüzeylerde gerekse diğer yüzeylerde yapılacak benzer çalışmalar için bir kaynak olması amaçlanmaktadır.

## **1.3 Alanlar**

Bu tez birkaç alandan ilgili bilgilerin alınmasıyla oluşturulmuştur. Bu alanları başlıca şu şekilde sıralamak mümkün olabilir.

### **1.3.1 Kullanım alanı**

Kullanım alanı sanayide kullanılması amacıyla metal kesim işlemlerine yönelik seçilmiştir.

### **1.3.2 Optik**

Optik alanında lazer benek konusu araştırılmış, ayrıca düzeneğin hazırlanmasında yardımcı olan uzaysal filtre gibi konular çalışılmıştır.

### **1.3.3 Görüntü ve işlenmesi**

Oluşan lazer benek deseninin işlenmesi amacıyla MATLAB paket programı kullanılmıştır. Bu konuda sadece tezle ilgili olan bilgilere yer verilmiştir.

#### **1.4 Tez Yapısı**

Tezin 2. bölümünde yüzey metrolojisi ve yüzey pürüzlülüğü hakkında genel bilgiler verilmiştir. Kullanılan değişik ölçüm yöntemleri hakkında kısa bilgiler verilmiş ve pürüzlülük parametrelere anlatılmıştır.

Tezin 3. bölümünde monokromatik ışığın pürüzlü bir yüzeyle karşılaştıktan sonra oluşturduğu benek deseni oluşumu hakkında bilgiler verilmiş ve birinci dereceden istatistiği hakkında teorik bilgilere yer verilmiştir.

Tezin 4. bölümünde benek kontrast ile ölçüm tekniği anlatılmaktadır. Farklı polarizasyon ve geliş açıları için ölçümlere yer verilmiştir.

Tezin 5. bölümünde benek korelasyon ile ölçüm tekniği anlatılmaktadır. Benek korelasyonu, kolay ölçüm sağlanması amacıyla benek yer değiştirmesine bağlanmıştır.

## 2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Pürüzlülük parametresi yüzey yapısının bir ölçütüdür. Pürüzlülük; yüzeyin ideal düzlüğünde meydana gelen dikey değişimler olarak tanımlanır. Tahmin edilebileceği gibi eğer bu dikey değişimlerin boyutu yüksek ise yüzey çok pürüzlü, eğer dikey değişimlerin boyutu düşük ise yüzey az pürüzlüdür.

### 2.1 Pürüzlülük

Ölçüm bilimlerinin bir bölümü olan yüzey metrolojisinin konusu, yüzeyin küçük ölçeklerde özelliklerinin bulunmasıdır. Yüzey pürüzlülüğü ise yüzey metrolojisinin bir parametresidir ve yüzeyin ideal düzlüğünde meydana gelen dikey değişimler olarak tanımlanmaktadır. Burada yüzeyin ideal düzlüğünden kasıt yüzey düzleminin şeklidir, yani yüzeyin dalgalı, düz ya da eğimli oluşunun yüzey pürüzlülüğüne bir etkisi bulunmamaktadır.



Şekil 2.1 Yüzey pürüzlülüğü örneği

Pürüzlülüğün, bir malzemenin çevresiyle etkileşiminde büyük önemi vardır. Eğer yüzey ya da yüzeyler pürüzlü ise malzemeler daha büyük sürtünme kuvvetine maruz kalacaklarından daha kolay aşınacaklar ve istenmeyen sonuçlar doğuracaklardır. Özellikle yüksek hızlı makineler, rulmanlar ve benzeri malzemelerin ömürleri bu yüzden gerçekten kısalabilir. Nispeten az pürüzlü yüzeyler üretmek ise diğerine göre pahalı bir işlemdir. Bu nedenlerle, böyle sorunlar için ideal maliyet ve yüzey pürüzlülüğünü oluşturmak için ciddi mühendislik hesaplamaları gerekmektedir.

## 2.2 Pürüzlülük Ölçümü

Günümüzde pürüzlülük ölçümü için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemler temaslı ve temassız olarak ikiye ayrılabilirler. Temaslı yöntemler, genellikle bir alıcının yüzeyde gezinmesine dayanmaktadır. Temassız yöntemler ise enterferometre, mikroskoplar, elektriksel kapasitans gibi konular içermektedir.

### 2.2.1 Mekanik profilometre

Mekanik profilometrelerde, yüzeyde gezdirilen çok sivri uçlu bir iğne kullanılmaktadır. Bu iğne yüzeydeki yükseklik farklarından dolayı aşağı yukarı hareket eder ve iğnenin yaptığı bu hareket, kapasitif yollarla profilometre tarafından bulunur ve pürüzlülük bu şekilde ölçülür.

Mekanik profilometreler kullanılarak yüzey için gerekli birçok parametre bulunmasına karşılık bu işlem genellikle sadece 2 boyutlu olarak yapılmaktadır (tek bir çizgi üzerinde hareket eden iğne). Her ne kadar 3 boyutlu ölçümler de uygulanabilse, bu işlem uzun bir zaman alır ve zaman bu tip ölçümlerde önemlidir. Bir diğer yandan mekanik profilometre yüzeyde bir tür iğne gezdirdiğinden, özellikle yumuşak yüzeyler için, yüzeye zarar verme olasılığı vardır. Aynı zamanda çok sert yüzeyler de iğneye zarar verebilir. Ayrıca iğne her ne kadar çok ince de olsa, tabii ki bir kalınlığı vardır ve yüzeyde kendi kalınlığından daha ince çukurlara girmeyecektir. Bu da özellikle yüksek frekanslı pürüzlülüklerde sonucu etkileyebilir.

Mekanik profilometrelerin en büyük dezavantajı ise yüzeye birebir temas gerektirdiğinden bir çok durumda ölçülecek malzemenin yerinden sökülüp profilometre tarafından işlenmesi gerekmektedir.

### 2.2.2 Optik yöntemler

Optik yöntemlerle yapılan pürüzlülük ölçümleri temassızdır. Bu nedenle mekanik profilometrelerin getirdiği bir çok dezavantajı ortadan kaldırmaktadırlar. Yüzeye verecekleri herhangi bir zararları yoktur, ve kullanımı, ölçülecek parçaların sökülüp geniş alana taşınmasından ziyade, durduğu yerde rahatlıkla yapılabilir.

Tabii ki optik yöntemlerinde kendilerine özgü dezavantajları bulunmaktadır. Her ne kadar kullanımı basit ve uygulanması kolay olsa da maalesef optik yöntemlerin ölçüm bölgeleri dardır. Bu yüzden tek bir yöntemle geniş ölçekleri ölçmekten çok, daha dar aralıklar için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin birçoğu ışığın saçılması ve enterferansına dayanır. Tezimizin konusu da benek kontrast ve benek korelasyon yöntemleridir ve bu gruba girmektedir.

### **2.2.3 Ultrasonik yöntemler**

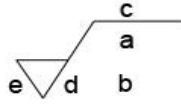
Ultrasonik yöntemlerde aslında ışık ile yapılan ölçümlerle aynı temele dayanmaktadır. Pürüzlü yüzeye çarpıp saçılan dalgalar (bu yöntemde ses dalgaları) aynı ışık gibi girişim oluşturur ve bu yöntemle ölçüm yapılır. Ultrasonik yöntem daha çok ışığın kullanılamayacağı yerlerde kullanılmaktadır. Bu yolla okyanus dibi gibi ışık kullanılamayan ortamların makroskopik pürüzlülük dereceleri ölçülebilmektedir.

### **2.2.4 Mikroskoplar**

Günümüzde mikroskoplar çok geliştiğinden yüzey dokusu rahatlıkla ölçülebilmektedir. Hatta bu mikroskoplarla sadece yüzeyin pürüzlülüğü değil, tüm profili ve topografik yapısı çıkarılabilir. Son derece hassas bir yöntem olsa da, bu yöntemin en büyük dezavantajı malzemenin yerinde pürüzlülüğü ölçmemesidir. Malzeme bulunduğu ortamdan sökülerek mikroskopta incelenmeli ve alınan fotoğraflardan pürüzlülük çıkarılmalıdır.

## **2.3 Yüzey Parametreleri**

Yüzey pürüzlülüğü çok karmaşık bir forma sahiptir ve bu yüzden kimi durumlar için basitçe tek bir parametreyle anlatmak yeterli değildir. Bir çok durumda malzemenin belli özellikleri, diğerlerinden daha önemli olabilir. Bu sebepten dolayı Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (ISO) tarafından kabul edilen ISO 1302:2002 standartında spesifikasyonlar şu şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 ISO 1302:2002 yüzey tanımlama şeması

Şekil 2.2'deki harflerin tanımları ve alabileceği değerler şu şekilde gösterilmektedir.

- a: Yüzey parametre spesifikasyonu D F S-L / Rz N C V şeklinde kullanılır. Bu diğer parametrelerin tanımı şu şekildedir.
  - D: Tolerans yönü. Yukarı doğru için U (upper), aşağıya doğru için L (lower) kullanılır.
  - F: Filtre tipi
  - S: Gürültüyü kaldırmak için kısa filtre kesimi
  - L: Dalgalanmayı kaldırmak için uzun filtre kesimi
  - R: Profil tipi (P: Primer, W: Dalgalanma, R: Pürüzlülük)
  - z: R profili için parametre tipi.
  - N: Örnekleme uzunlukları için değerlendirme boyu
  - C: Karşılaştırma kuralı
  - V: Mikrometre cinsinden belirtilen değer
- b: İkincil yüzey parametre spesifikasyonu
- c: Gerekli üretim yöntemi
- d: Gerekli yerleştirme doğrultusu
  - = : Paralel
  - ⊥ : Dik
  - X : Çapraz
  - M : Çok yönlü
  - C : Dairesel
  - R : Radyal
  - P : Tanecikli

- e: Gerekli minimum materyal çıkarımı

## 2.4 Pürüzlülük Parametreleri

Pürüzlülük parametreleri genellikle yüzeyden alınan örneklemelerin genliğiyle ilişkilidir. Yüzey pürüzlülüğü özelliği için birçok parametre kullanılsa da en genel olarak kullanılan büyüklük, bize ortalama pürüzlülüğü veren parametresidir.  $R_a$  'nın matematiksel tanımı şu şekildedir ve görüldüğü gibi basitçe tüm örnekleme noktalarının aritmetik ortalamasına dayanır.

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad (2.4.1)$$

Pürüzlülük parametrelisi arasında  $R_a$  parametresinden sonra en çok kullanılan parametre RMS pürüzlülük değerini veren  $R_q$  parametresidir. Pratiksel olarak  $R_q$  bize yüzey yüksekliklerinin standart sapmasını vermektedir. Matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} \quad (2.4.2)$$

Yüzey pürüzlülüğü rastlantısal bir ölçü olduğundan tanımlamak için birçok parametre kullanılmaktadır. Bu konuda standartlarda yer alan diğer parametreler tablo 2.1'de verilmiştir.

Parametre	Tanım	Matematiksel İfade
$R_a$	Yüzey yüksekliğinin aritmetik ortalaması	$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  y_i $
$R_q$	Yüzey yüksekliğinin standart sapması	$R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}$
$R_v$	Maksimum vadi derinliği	$R_v = \min(y_i)$
$R_p$	Maksimum tepe yüksekliği	$R_p = \max(y_i)$
$R_t$	Profilin maksimum yüksekliği	$R_t = R_p - R_v$
$R_{zk}$	Ortalama çizgisi dolaylarında dağılımın eğriliği	$R_{zk} = \frac{1}{NR^3} \sum_{i=1}^N y_i^3$

Tablo 2.1 Yaygın yüzey pürüzlülüğü parametreleri

## 2.5 Sanayide Yüzey İşlemleri

Üretim sanayinde yüzey pürüzlülüğü bir çok etmene bağlıdır. Eğer ölçülecek yüzey dökmeysen, dökülen kalıbın yüzeyi birincil derecede önemlidir. Eğer yüzey işlenirken bir şekilde kesildiyse ya da aşındırıcı etkilere maruz bırakıldıysa, kesim şekli, kesme aletinin mikroskopik özellikleri ve kimyasalların aşındırıcı etkileri bir şekilde yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir.

Üretim esnasında yüzeyde yükseklikler arasındaki farklar pürüzlülüğü belirlerken, genelde bu farkın az olması (bu yolla pürüzlülük de az olur) aynı zamanda da pürüzlülüğün, yapılan işlemten sonra her malzeme için benzer büyüklüklerde olması istenir. Daha önce söylediğimiz gibi pürüzlülük azalırken maliyet artarken, aynı zamanda üretim tekniğinin oluşturduğu malzemeler arası pürüzlülük farkı da azalırken maliyet artmaktadır. Tablo 2.2'de sanayide yaygın olarak kullanılan tekniklerden sonra elde edilen pürüzlülük değerleri görülmektedir.

Teknik	Genel pürüzlülük değerleri ( $\mu\text{m}$ )	Ender pürüzlülük değerleri ( $\mu\text{m}$ )
Metal Kesme		
Testereleme	1.6 – 25	0.8 – 50
Rendeleme	1.6 – 12.5	0.8 – 25
Delme	1.6 – 6.3	0.8 – 12.5
Presleme	0.8 – 6.3	0.2 – 25
Torna	0.4 – 6.3	0.025 - 25
Delme	0.8 – 3.2	0.4 – 6.3
Delik genişletme	0.8 – 3.2	0.4 – 6.3
Aşındırıcı İşlemler		
Zımparalama	0.1 – 1.6	0.025 – 6.3
Dolaplama	0.2 – 0.8	0.05 – 3.2
Silindir taşlama	0.1 – 0.8	0.025 – 1.6
Elektro cilalama	0.1 – 0.8	0.012 – 1.6
Elektrolit aşındırma	0.2 – 0.6	0.1 – 1.6
Cilalama	0.1 – 0.4	0.012 – 0.8
Lepleme	0.05 – 0.4	0.012 – 0.8
Döküm İşlemleri		
Kum döküm	12.5 – 25	6.3 – 50
Kalıcı kalıp döküm	1.6 – 3.2	0.8 – 6.3
Eriyen kalıpla döküm	1.6 – 3.2	0.4 – 6.3
Pres döküm	0.8 – 1.6	0.4 – 3.2
Şekillendirme		
Sıcak haddeleme	12.5 – 25	6.3 – 50
Dövme	3.2 – 12.5	6.3 – 25
Presleme	0.8 – 3.2	0.4 – 12.5

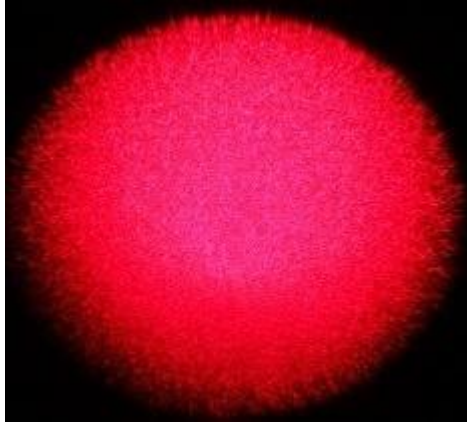
Teknik	Genel pürüzlülük değerleri ( $\mu\text{m}$ )	Ender pürüzlülük değerleri ( $\mu\text{m}$ )
Soğuk haddeleme	0.8 – 3.2	0.2 – 6.3
Merdane cilalama	0.2 – 0.4	0.1 – 0.8
Diğer İşlemler		
Ateşle kesim	12.5 – 25	6.3 – 50
Kimyasal frezeleme	1.6 – 6.3	0.8 – 12.5
Elektron ışın kesimi	0.8 – 6.3	0.2 – 6.3
Lazer kesimi	0.8 – 6.3	0.2 – 6.3

Tablo 2.2 Yüzey işlemleri sonrası oluşan pürüzlülükler

### 3. LAZER BENEĞİ

1960'ların başında sürekli dalgalı lazerlerin kullanılabilir olmasıyla araştırmacılar daha önce görmedikleri garip bir olayla karşılaştılar. Faz uyumlu lazer ışığı kağıt, metal, duvar gibi przly bir yzeeye tutulduğunda oluşan yansımada yüksek kontrasta sahip parçacıklı bir ışık deseni oluşturduğunu gördüler. Yzeeye arpan ışık her ne kadar eşit şiddetle dağılmış olarak gelse de oluşan desendeki ışık şiddeti konuma göre değişmekteydi. Bu desene benek (speckle) adı verildi.

Lazer beneği, yüksek derecede faz uyumlu (koherent) bir ışık ışınının, herhangi bir przly yüzeyden yansması sonucu oluşturduğu rastlantısal bir ışık şiddeti desenidir.

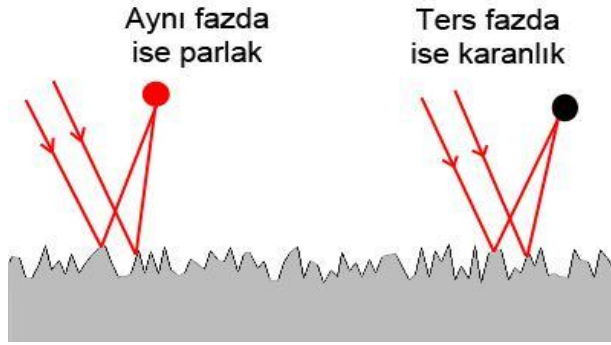


şekil 3.1 Lazer benek görüntüsü

Lazer ışını gibi yüksek derecede faz uyumlu bir ışın przly bir yzeeye çarptığında, karanlık ve aydınlık bölgelerden oluşan, rastlantısal bir ışık deseni meydana getirirler. Oluşan desenin kontrastı hayli yüksektir. Yani aydınlık noktalar çok aydınlık, karanlık noktalar ise çok karanlıktır. Oluşan desenin istatistiksel özellikleri gelen ışının koheransına ve yansıyan ya da geçiş yapan yüzeyin yüzey özelliklerine bağlıdır.

### 3.1 Benek Oluşumu

Benek deseni, basit olarak, lazer ışınının yansıması yada iletimi sonucunda tek bir gözlem noktasında, farklı fazlara sahip birçok dalganın, o gözlem noktasında yaptığı girişimler sonucu farklı şiddetlere sahip noktalar oluşturmasıyla açıklanabilir. Şekil 3.2'de basit olarak karanlık ve aydınlık nokta oluşması gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Benek oluşumu

Herhangi bir yüzey, bir ışıkla aydınlatıldığında ışığın dağılma teorisine göre yüzeydeki her nokta, küresel ışımaya yapan noktasal bir kaynak gibi davranır. Böylelikle herhangi bir noktadaki ışık şiddeti o noktadan geçen diğer tüm dalgaların toplamıyla oluşur. Aynı fazdaki dalgalar birbirlerini güçlendirirken, ters fazdaki dalgalar birbirlerini sönmümler ve bu şekilde karanlık ve aydınlık noktalar oluşur. Eğer yüzeyin pürüzlülüğü ışığın dalga boyundan çok yüksek ise faz değişimleri  $2\pi$ 'den çok daha büyükse, benek deseni ve şiddeti rastlantısal bir düzen gösterir.

Benek deseni teorik olarak sadece faz uyumlu ışılarda geçerlidir. Fakat günümüzde çok renkli ve faz uyumu az olan ışık ışınlarıyla da benek deseni çalışmaları bulunmaktadır.

### 3.1.1 Objektif sistemde benek

Lazer ışını, pürüzlü bir yüzeye çarpıp saçıldıktan sonra, direkt olarak başka bir yüzeye düşüyorsa, objektif bir benek deseni oluşturuyor denir. Oluşan benek deseni, herhangi bir lens kullanılmadan, direkt olarak bir fotoğraf filmine ya da herhangi bir optik alıcıya alınıyorsa, benek deseni sistemin geometrisine ve ışığın dalga boyuna bağlıdır.

Oluşacak benek büyüklüğü şu şekilde formülize edilir. Formülasyonda  $s$  benek büyüklüğü,  $\lambda$  dalga boyu,  $z$  gözlem noktasının uzaklığı ve  $d$  cisme çarpan ışığın çapıdır.

$$s = 1,22 \frac{\lambda z}{d} \quad (3.1.1)$$

### 3.1.2 Subjektif sistemde benek

Lazer ışını pürüzlü yüzeye çarpıp saçıldıktan sonra bir lens yardımıyla gözlem yüzeyine aktarılıyorsa subjektif bir benek deseni oluşmaktadır. Bu tür sistemlerde benek büyüklüğü kullanılan lensin odak uzaklığına bağlıdır.

Oluşacak benek büyüklüğü;  $s$  benek büyüklüğü,  $\lambda$  dalga boyu,  $f/D$  merceğin odak sayısı olmak üzere, şu şekilde formülize edilir.

$$s = 1,22 \frac{\lambda f}{D} \quad (3.1.2)$$

## 3.2 Benek İstatistiği

Benek deseninde uzaya bağlı olan ışık şiddeti değişimleri rastlantısal meydana gelmektedir ve bu ışık şiddeti değişimleri yüzeyin pürüzlülüğüne bağlıdır. Benek deseni, bir sinyal içinde bulunan ve çok fazla sayıda bağımsız fazlı kompleks genlik bileşenlerinin toplamıyla oluşur. Bu bileşenler kompleks düzlemde rastlantısal genliklerden ve rastlantısal fazlardan oluşabileceği gibi, bilinen genlik ve fazlardan da oluşabilir. Bu bileşenler birbirlerine eklendiğinde rastlantısal yürüyüş adı verilen olayı meydana getirirler. Rastlantısal yürüyüş sonucu ortaya çıkan uzunluk, toplamdaki değişik bileşenlerin, birbirlerine göre olan fazlarına bağlı olarak büyük ya da

küçük çıkabilir. Bu uzunluğun karesi gözlenen dalganın şiddetini verir. (Goodman, Speckle Phenomena in Optics)

### 3.2.1 Polarize benek deseninin 1. dereceden istatistiği

Monokromatik bir dalga için  $(x,y,z)$  gözlem noktasında ve  $t$  zamanında tek bir polarizasyon bileşeni olan  $u(x,y,z;t)$ 'yi şu şekilde yazabiliriz:

$$u(x, y, z; t) = A(x, y, z) \exp(i2\pi vt) \quad (3.2.1)$$

Burada  $v$  ışığın frekansı ve  $A$ , elektriksel alanın fazör genliğidir.

$$A(x, y, z) = |A(x, y, z)| \exp[i\theta(x, y, z)] \quad (3.2.2)$$

Buradan, oluşan dalganın şiddeti:

$$I(x, y, z) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} |u(x, y, z; t)|^2 dt = |A(x, y, z)|^2 \quad (3.2.3)$$

Daha önce  $(x,y,z)$  gözlem noktasında oluşan genliğin, aslında yüzeyin pürüzlülüğü yüzünden çok fazla sayıda ve farklı açılarda yansıyan elektromanyetik dalgalardan  $(x,y,z)$  gözlem noktasına düşenlerin toplamından oluştuğundan bahsetmiştik. Buna göre  $A(x,y,z)$  fazör genliğinin  $\sqrt{N}$  adet  $a_k$  fazör katılımlarından oluştuğunu düşünebiliriz. Burada  $\sqrt{N}$  adet olmasının nedeni ışık şiddeti  $I(x,y,z)$ , fazör genliği  $A(x,y,z)$ 'nin karesi olduğundan  $N$  bileşen verecektir. Buna göre:

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{N}} a_k(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| e^{i\phi_k} \quad (3.2.4)$$

Olayı iki boyutlu rastlantısal yürüyüş olarak ele aldığımızda  $A(x,y,z)$  değerinin reel ve imajiner olarak iki bileşeni vardır),  $N$  rastlantısal yürüyüşteki fazör sayısını,  $A(x,y,z)$  sonuç uzuluğunu,  $a_k(x, y, z)$  her bir fazörün uzunluğunu verir.

Buradan itibaren olayın fiziksel yönü de düşünülerek şu iki varsayım yapılabilir:

İlk olarak k'ncı bileşenin  $a_k$  genliği ve  $\phi_k$  fazı birbirlerinden ve diğer tüm bileşenlerin fazörlerinden istatistiksel olarak bağımsızdır. Fiziksel olarak her birim saçılım alanları için, o anda ele alınan saçılım yapan bileşenin gücü ve fazı arasında bir ilişki bulunmaz.

İkinci olarak da  $\phi_k$  fazı  $(-\pi, \pi)$  arasında düzgün dağılımlıdır. Yaptığımız bu iki varsayımla öncelikle ortaya çıkan kompleks alanın istatistiksel özelliklerini araştıralım.

$$A_R = \text{Re}\{A\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \cos \phi_k \quad (3.2.5)$$

$$A_I = \text{Im}\{A\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N |a_k| \sin \phi_k \quad (3.2.6)$$

Reel ve imajiner kısımlarını ayırdığımız A uzunluğunun yukarıdaki varsayımlardan yararlanarak ortalama değerlerini bulursak;

$$E \{A_R\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N E \{|a_k| \cos \phi_k\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N E \{|a_k| \} E \{\cos \phi_k\} = 0 \quad (3.2.7)$$

$$E \{A_I\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N E \{|a_k| \sin \phi_k\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N E \{|a_k| \} E \{\sin \phi_k\} = 0 \quad (3.2.8)$$

$A_R$  ve  $A_I$  bileşenlerinin ortalama değerleri görüldüğü gibi 0'dır. Bu yüzden varyansları ikinci momentlerine eşit olacaktır.

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E \{|a_k| |a_m| \cos \phi_k \cos \phi_m\} \quad (3.2.9)$$

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E \{|a_k| |a_m| \sin \phi_k \sin \phi_m\} \quad (3.2.10)$$

$$\Gamma_{RI} = E \{A_R A_I\} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E \{|a_k| |a_m| \cos \phi_k \sin \phi_m\} = 0 \quad (3.2.11)$$

Yaptığımız ikinci varsayımdan yararlanarak sinüs ve kosinüs çarpımlarının ortalama değerlerini hesaplayabiliriz. Öncelikle faz değerlerinin birbirinden bağımsız olduğunu söylediğimiz için  $k \neq m$  olduğu durumlarda ortalama 0'dır.  $k=m$  olduğu durum için:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E |a_k|^2 E \cos^2 \phi_k \quad (3.2.12)$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E |a_k|^2 E \left[ \frac{1}{2} + \frac{\cos 2\phi_k}{2} \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|a_k|^2}{2}$$

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E |a_k|^2 E \sin^2 \phi_k \quad (3.2.13)$$

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N E |a_k|^2 E \left[ \frac{1}{2} + \frac{\sin 2\phi_k}{2} \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{|a_k|^2}{2}$$

Burada daha önce bahsettiğimiz N adım sayısı çok büyüktür. Bu durumda A fazörünü oluşturan imajiner ve reel kısımları çok fazla sayıda rastlantısal süreçlerin toplamından oluşur. Bu yüzden merkezi limit teoremine göre N adım sayısı, sonsuza giderken dağılım Gaussian dağılımına yaklaşır. Bu özellikten yararlanarak A fazörünün reel ve imajiner kısımlarının ortak olasılık yoğunluk fonksiyonunu şu şekilde verebiliriz:

$$p_{R,I}(A_R, A_I) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[ -\frac{A_R^2 + A_I^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.2.14)$$

$$\sigma^2 = \sigma_R^2 = \sigma_I^2$$

I ışık şiddetini  $I = A_R^2 + A_I^2$  şeklinde yazabiliriz. Aynı zamanda

$$\begin{aligned} A_R &= \sqrt{I} \cos \theta \\ A_I &= \sqrt{I} \sin \theta \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{A_I}{A_R} \end{aligned} \quad (3.2.15)$$

Buradan ortak olasılık yoğunluk fonksiyonunu ışık şiddeti cinsinden yazabiliriz. Buna göre;

$$\|J\| = \left\| \begin{array}{cc} \frac{\partial A_R}{\partial I} & \frac{\partial A_R}{\partial \theta} \\ \frac{\partial A_I}{\partial I} & \frac{\partial A_I}{\partial \theta} \end{array} \right\| = \frac{1}{2} \quad \text{Jacobian'ı olmak üzere;} \quad (3.2.16)$$

$$p_{I,\theta} = p_{R,I}(\sqrt{I} \cos \theta, \sqrt{I} \sin \theta) \|J\| \quad (3.2.17)$$

$$p_{I,\theta} = \begin{cases} \frac{1}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right) & 1 \geq 0 \\ & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2.18)$$

Ortak olasılık yoğunluk fonksiyonlarından, rahatlıkla  $I$  ve  $\theta$  ya göre marjinal olasılık yoğunluk fonksiyonlarını bulabiliriz.

$$p_I(I) = \int_{-\pi}^{\pi} p_{I,\theta}(I, \theta) d\theta = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right) & I \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2.19)$$

$$p_\theta(\theta) = \int_{-\pi}^{\pi} p_{I,\theta}(I, \theta) dI = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & -\pi \leq \theta \leq \pi \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2.20)$$

Görüldüğü gibi bir noktadaki  $I$  ışık şiddetinin dağılımı azalan eksponansiyeldir. Aynı zamanda da  $\theta$  düzgün dağılım göstermektedir.  $p_{I,\theta} = p_I(I)p_\theta(\theta)$ 'dan görüleceği gibi ışık şiddeti ve faz istatistiksel olarak birbirinden bağımsızdır.

$I$  ışık şiddetinin  $n$ 'inci momentine şu şekilde bir yaklaşım getirilebilir.

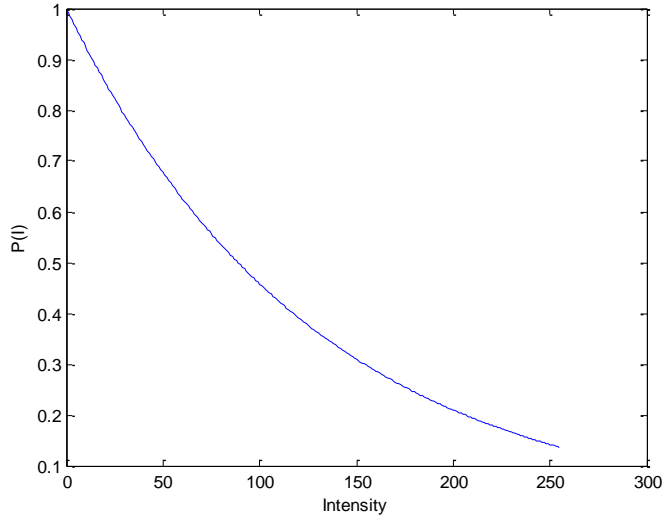
$$E \left[ I^n \right] = n!(2\sigma^2)^n = n! E \left[ I^n \right] \quad (3.2.21)$$

$$E \left[ I^2 \right] = 2E \left[ I^2 \right] \quad \sigma_I^2 = E \left[ I^2 \right] - E \left[ I \right]^2 = E \left[ I^2 \right] \quad (3.2.22)$$

Böylece polarize ışıkla oluşmuş benek deseni için  $\sigma_I$  standart sapması ortalama ışık şiddetine eşittir. Bu yüzden benek deseninin kontrastını ölçmek için gerekli oran  $C = \sigma_I / E \left[ I \right]$  olacaktır.

Aynı zamanda görüldüğü gibi gözlem noktasında belli bir I ışık şiddetinin oluşma olasılığı:

$$P(I) = \int_0^{\infty} \frac{1}{E} \exp\left(-\frac{\xi}{E}\right) d\xi = \exp(-I/E)$$



Şekil 3.3 Işık şiddeti olasılığı

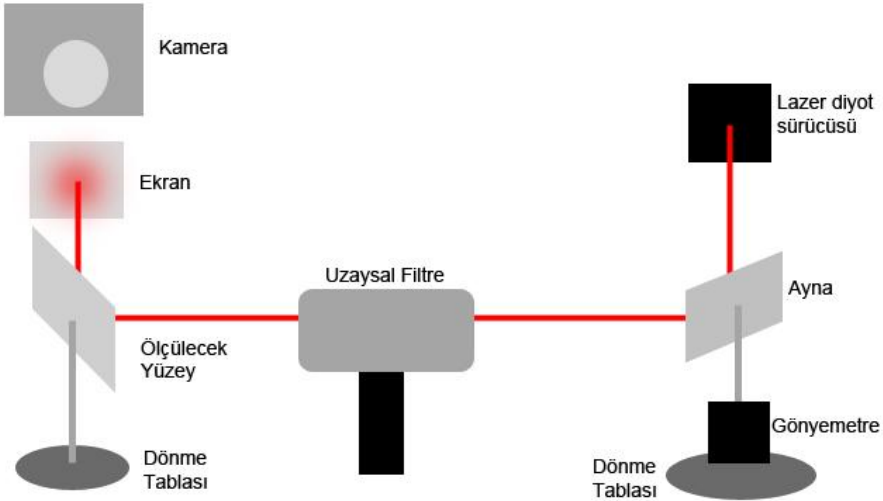
Şekil 3.3'de görüldüğü gibi ışık şiddeti, en fazla karanlık şekilde oluşur. Bu da benek desenlerinin yüksek kontrastının nedenini açıklamaktadır.

## 4. BENEK KONTRAST ANALİZİ

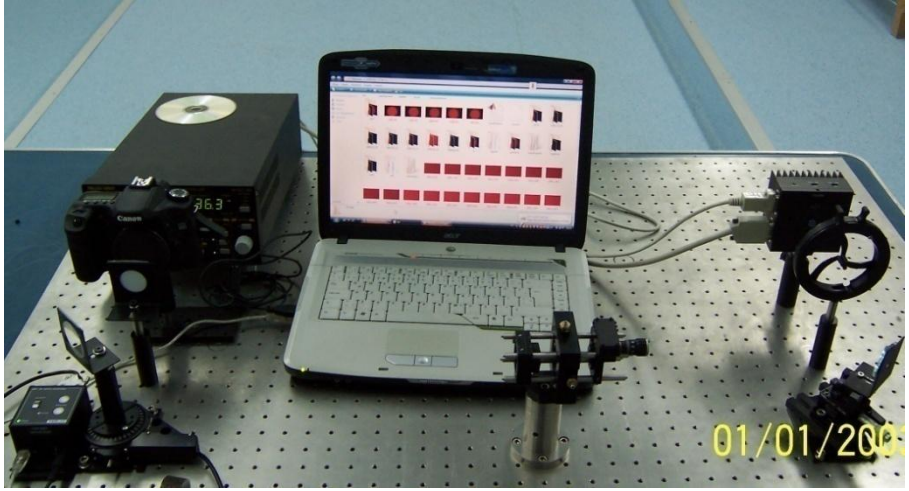
Benek kontrast analizi yöntemi benek deseninin birinci dereceden istatistiğine dayanmaktadır. Daha önceki çalışmalarda enterferometrik olmayan yöntemler kullanılarak  $0.25 \mu\text{m}$   $R_a$  'ya kadar ölçülmüştür (Özdemir, 2007). Çalışmamızda yüksek güçlü lazer diyot kullanarak ve ışığın geliş açısı artırılarak ölçülebilen ortalama pürüzlülük değeri  $0.35 \mu\text{m}$   $R_a$  'ya kadar çıkartılmıştır.

Benek kontrast analizi, benek deseninin birinci dereceden istatistiğine dayanmaktadır ve uygulanması gayet olmakla birlikte kurulacak entegre bir sistem için fazla bileşen gerektirmemektedir. Bu yüzden yapılacak bir cihaz uygulaması, oldukça ucuza mal olabilir.

### 4.1 Deney Düzenegi



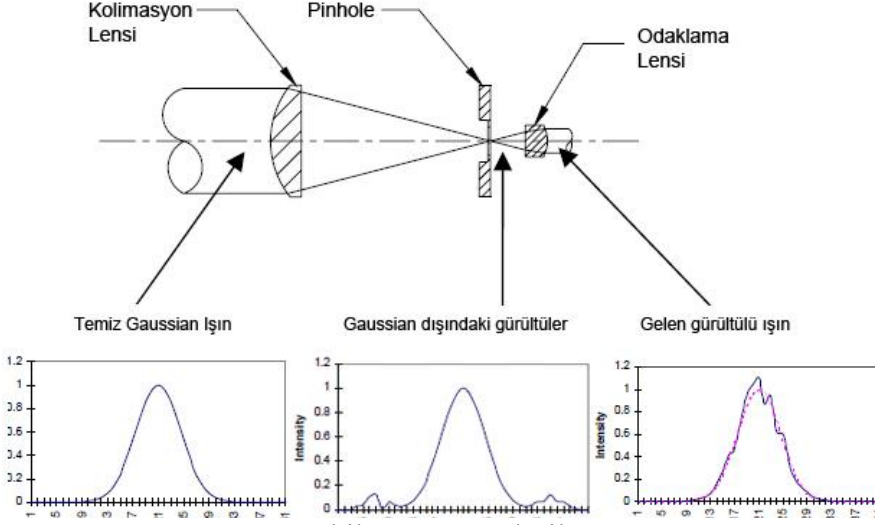
Şekil 4.1 Benek kontrast analizi deney düzenegi (şematik)



Şekil 4.2 Benek kontrast analizi deney düzeneği

Deney düzeneği basit olarak şekil 4.1’de gösterilmiştir. Lazer diyot olarak Hitachi markalı HL6535MG kod numaralı lazer diyot kullanılmıştır. Bu diyot  $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ve üstüne gelen 135 mA akımla, 658 nm dalga boyunda 90 mW güç verebilmektedir. Lazer diyota gelen sıcaklık ve akım kontrolcüsü olarak Melles Griot marka lazer diyot sürücüsü kullanılmıştır. Kullanılan ekran basit bir beyaz kağıttır, fotoğraf çekmek için Canon EOS 40D marka fotoğraf makinesi ve fotoğraf makinesi ile birlikte gelen bilgisayar yazılımı EOS Utility kullanılmıştır. Alınan resimler MATLAB kullanılarak işlenmiştir.

Başlangıç olarak değinilmesi gerek nokta uzaysal filtre kullanımınıdır. Uzaysal filtre genel olarak lazer ışınının oluşumu sırasında ya da sonradan sistemdeki lens, polarizör vb bileşenlerin kullanımından sonra lazer ışınının istenen şekli alıp (gaussian) üstündeki gürültüden arındırılması amacıyla kullanılır.



Şekil 4.3 Uzaysal Filtre

Uzaysal filtre basit olarak gelen ışını odaklayıp, çok küçük bir delikten geçirme (pinhole) ve daha sonra tekrar kolime etmeye dayanır. Pinhole, bir alçak geçiren filtre gibi davranarak, yüksek frekanstaki gürültüleri süzer ve temiz, gaussian şekilli bir ışın geride kalır.

Uzaysal filtrede pinhole ve lens seçimi önemlidir. Temiz bir ışın formuna ulaşmak için seçilecek pinhole açıklığı şu şekilde formüle edilir.

$$D = 2f\lambda / r \quad (4.1.1)$$

Formülasyonda D seçilecek pinhole açıklığı, f odaklayan lensin odak uzaklığı,  $\lambda$  ışığın dalga boyu ve r gelen ışının çapıdır. Her zaman tam D açıklığında pinhole bulmak zordur fakat alınan pinhole formülasyonda bulunandan biraz büyük olabilir. İdeal pinhole açıklığından daha küçük pinhole kullanılırsa ışığın gücü büyük ölçüde kaybolur. Çok daha büyük pinhole kullanıldığında ise filtreleme işleminin hassaslığı azalır.

Uzaysal filtreleme işleminde ışın filtre eksenine tamamen paralel gelmelidir. Bizim düzeneğimizde kullanılan ayna, altındaki gönyemetre ve dönme tablası bu iş için kullanılmıştır. Lazer diyot sürücüsünden çıkan ışın yere paralel bir doğrultuda gitmediği için aynanın yerle açısını ayarlamak için gönyemetre kullanılmış, ayrıca dönme tablası kullanılarak da x ekseninde uzaysal filtre düzeneğine ışının tamamen düz sokulması amaçlanmıştır.

Gelen lazer ışınının uzaysal filtre düzlemine tamamen dik ve merkezine geldiğinden emin olunduktan sonra yapılacak işlem odaklama lensini kaydırarak pinholedeki deliğe tamamen odaklamaktadır. Pinhole, ışığın mercekten sonraki geldiği yere getirilmek için x ve y eksenlerinden hareket ettirilir. Başlangıçta görünen airy disk, sonuca yaklaştıkça daha karmaşık bir hal alacak ve her şey ideal olarak oluşturulduğunda arka tarafta tamamen yuvarlak bir aydınlanma elde edilecektir. Arka tarafta oluşan aydınlanmada, etrafında haleler bulunmamalıdır. Daha sonra kolime eden lens seçilerek, odak uzaklığına bağlı olarak istenilen büyüklükte lazer ışığı elde edilebilir. Deney düzeneğimizde odaklama lensi ve kolimasyon lensi olarak odak uzaklıkları 11 mm olan iki lens kullanılmış ve pinhole açıklığı 15  $\mu\text{m}$  olarak seçilmiştir.

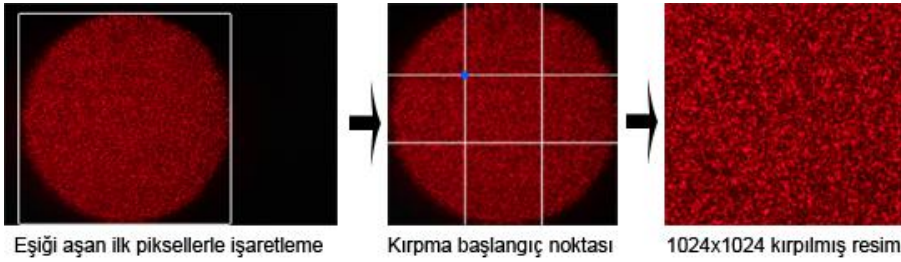


Şekil 4.4 Pürüzlülüğü 0.14 ile 0.45  $\mu\text{m}$  arasında değişen yüzeyler

## 4.2 Görüntü İşleme

Canon EOS 40D, DSLR fotoğraf makinesiyle alınan benek deseni görüntüleri, Canon'un kendi yazılımı olan EOS Utility ile bilgisayar ortamına aktarılmış ve JPG formatında çekilen resimlerde MATLAB programı yardımıyla görüntü işleme yapılmıştır.

Benek desenini algılamak için öncelikle bir resim kırpma fonksiyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Benek deseni fotoğraf makinesinin konumuna göre her zaman aynı yerde elde edilemeyebilir. Bu işi otomatikleştirmek amacıyla x ve y düzlemlerini piksel piksel tarayıp, belli bir eşik seviyesinin üstündeki piksel numaraları bulunmuş, daha sonra x ve y düzlemindeki her iki sınır arası üçe bölünmüş ve şekil 4.4'de gözüken mavi noktalı yerden itibaren kesim işlemine başlanmıştır. Alınan kırpılmış resim 1024x1024 boyutlarına sahiptir. Bu işlemin amacı alınan benek fotoğrafından anlamlı bir alt resim alabilmektir.



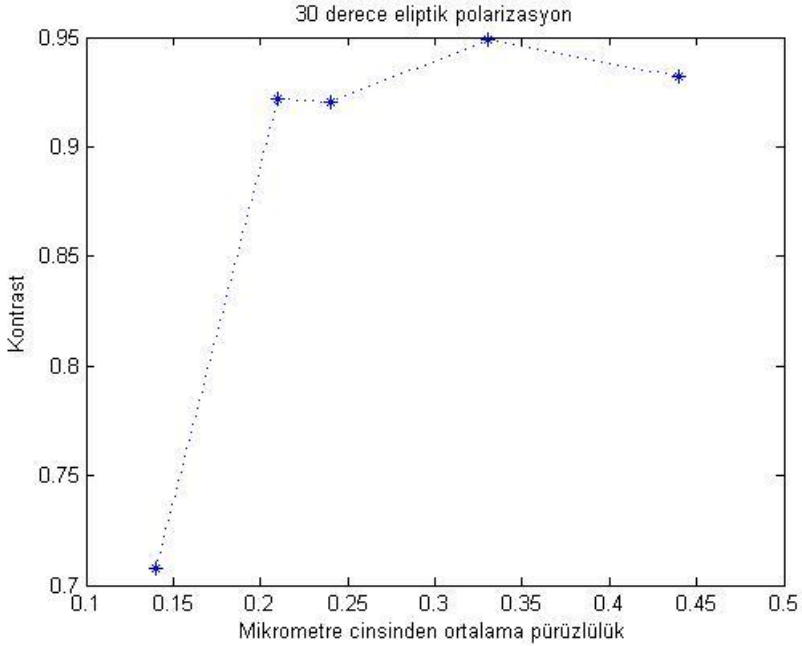
Şekil 4.5 Kırpma işlemi

Kırpılan resimdeki kontrastın belirgin olması amacıyla öncelikle gri skalaya çevrilmiş, daha sonra ise maksimum ve minimum parlaklığın tam ortasındaki nokta eşik değeri alınarak siyah beyaza dönüştürülmüştür. Sonuç olarak elde edilen siyah beyaz benek deseninde std2 ve mean fonksiyonları kullanılarak ışık şiddetinin standart sapması ve ortalama ışık şiddeti elde edilerek oranlanmıştır.

## 4.3 Deney

Deneyde farklı polarizasyonlar ve farklı geliş açıları için ölçümler yapılmıştır. Doğrusal polarizasyon için lazer diyotlardan çıkan lazer ışını, ışın yönüne dik ve doğrusal polarize olduğu için, ayrıca bir polarizör kullanılmamıştır. Maksimum verimliliği sağlamak için zımparalanmış örneklerde zımpara yönü, polarizasyon yönüne dik olarak konumlandırılmıştır. Eliptik polarizasyona sahip lazer ışığı için  $\lambda/4$  dalga geciktirici kullanılmış ve olası bozulmaları süzebilmek için bu bileşen uzaysal filtreden önce konumlandırılmıştır.

### 4.3.1 Eliptik polarizasyon, 30° geliş açısı

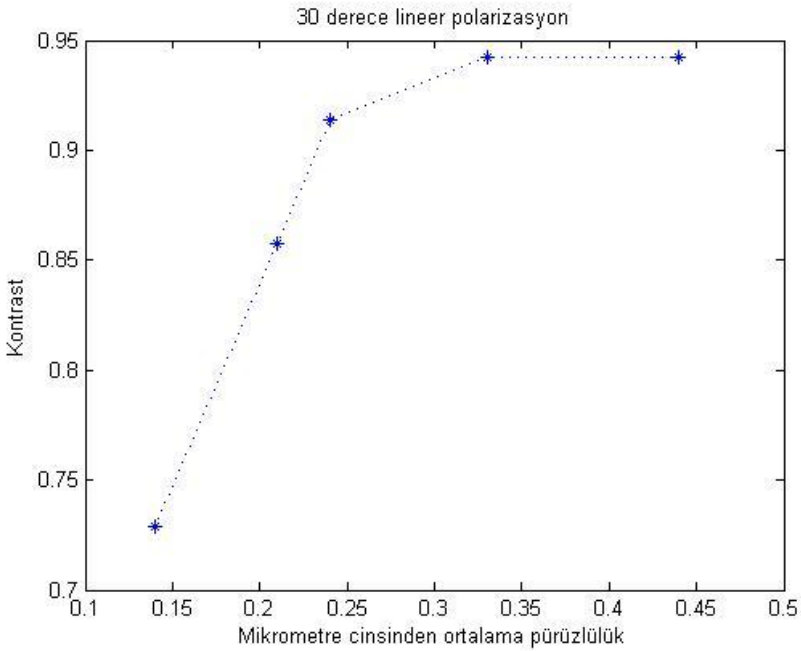


Şekil 4.6 30°'de eliptik polarize lazer ışığı kontrast ölçümleri

Şekil 4.6'de görüldüğü gibi 30°'lik düşük bir geliş açısıyla sadece 0.14  $\mu\text{m}$  ortalama pürüzlülüğe sahip örnek ölçülebilmektedir. Elimizde bulunan bir kademe yüksek olan 0.21  $\mu\text{m}$ 'lik örnek

kontrastı oldukça yüksek çıkmıştır. Ölçümlerimizde saturasyon noktası deneysel olarak 0.92 dolaylarında çıkmıştır. Kontrast değeri 0.92'den yüksek her parça ölçümü, ölçülememiş kabul edilir. Değerin kontrast değeri 1 civarlarında dolaşması benek deseninin artık rastlantısal olarak oluştuğunu anlatır.

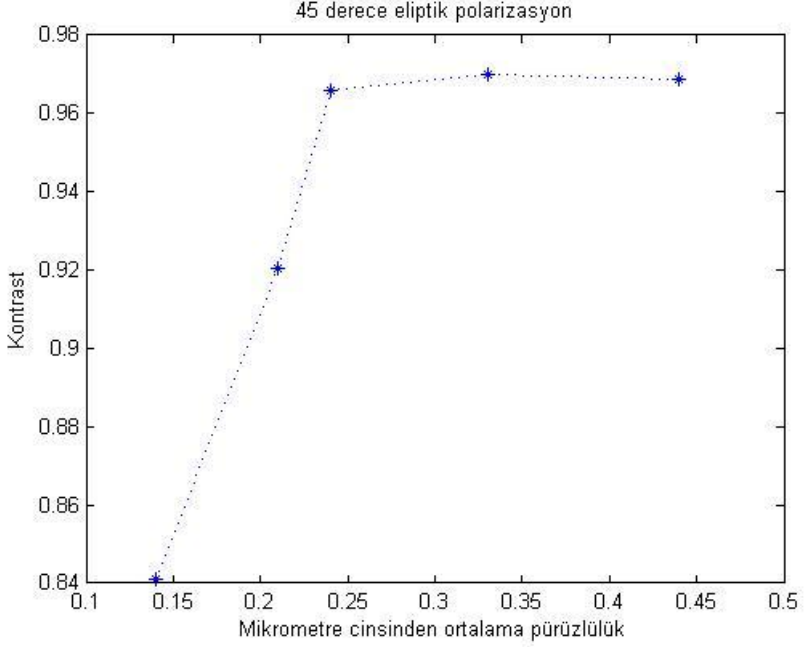
### 4.3.2 Doğrusal polarizasyon, 30° geliş açısı



Şekil 4.7 30°'de doğrusal polarize lazer ışığı kontrast ölçümleri

Şekil 4.7'da 30°'lik açıyla gelen doğrusal polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri gözükmemektedir. Bölüm 4.3.1'den farklı olarak, ışığın polarizasyonu değiştiğinde ölçüm limiti de artmıştır. 0.24  $\mu\text{m}$ 'lik örnek ölçüm limiti olarak alınabilir. Her ne kadar saturasyon değerine yakın da olsa bir önceki örneğin kontrast değeri ve aradaki doğrusallık bize 0.24  $\mu\text{m}$ 'nin de ölçülebildiğini göstermektedir.

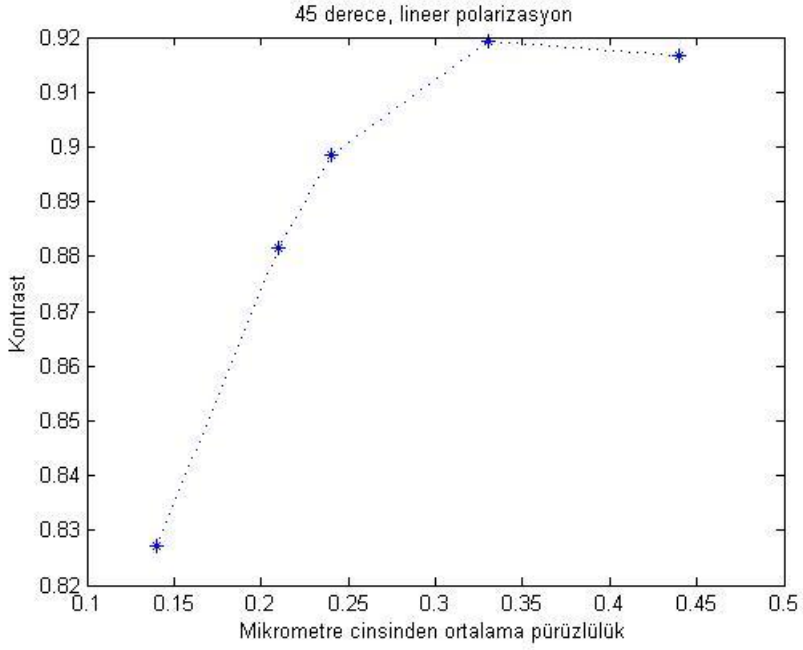
### 4.3.3 Eliptik polarizasyon, 45° geliş açısı



Şekil 4.8 45°’de eliptik polarize lazer ışığı kontrast ölçümleri

Geliş açısını artırıp polarizasyonu tekrar eksi haline getirdiğimizde saturasyon noktasını 0.21  $\mu\text{m}$ ’den büyük olarak alabiliriz. Şekil 4.8’den de anlayabileceğimiz gibi 0.24  $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip örnek artık limit noktasını aşmıştır. Geliş açısını artırarak bölüm 4.3.1’e nazaran iyileştirme yaptığımız ortadadır.

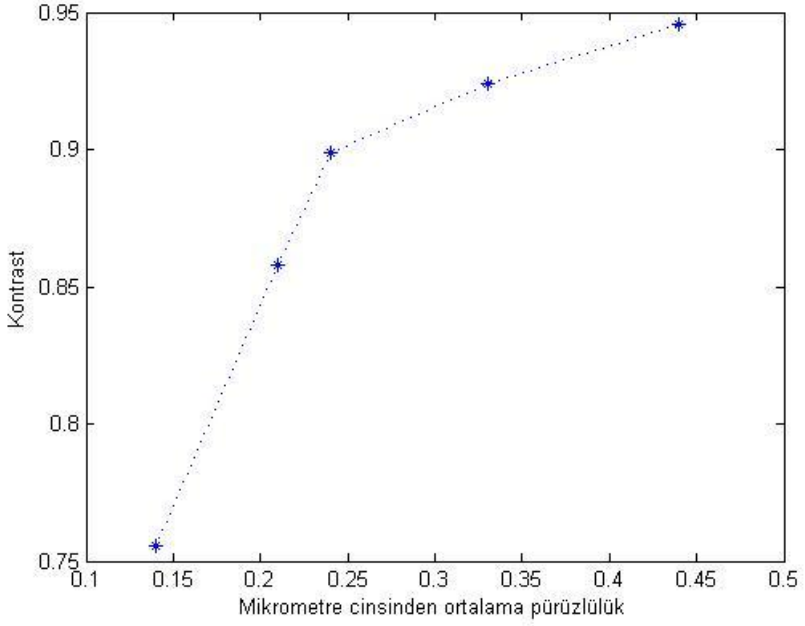
#### 4.3.4 Lineer polarizasyon, 45° geliş açısı



Şekil 4.9 45°’de lineer polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri

45° geliş açısıyla gelen lazer ışığının polarizasyonunu lineer polarize olarak aldığımızda şekil 4.9’da görüldüğü gibi limit noktamız ileriye taşınmıştır. Gördüğümüz gibi 0.24  $\mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip örnek ölçülmüş olduğu gibi, limit noktamız 0.24  $\mu\text{m}$ ’nin biraz üzerindedir.

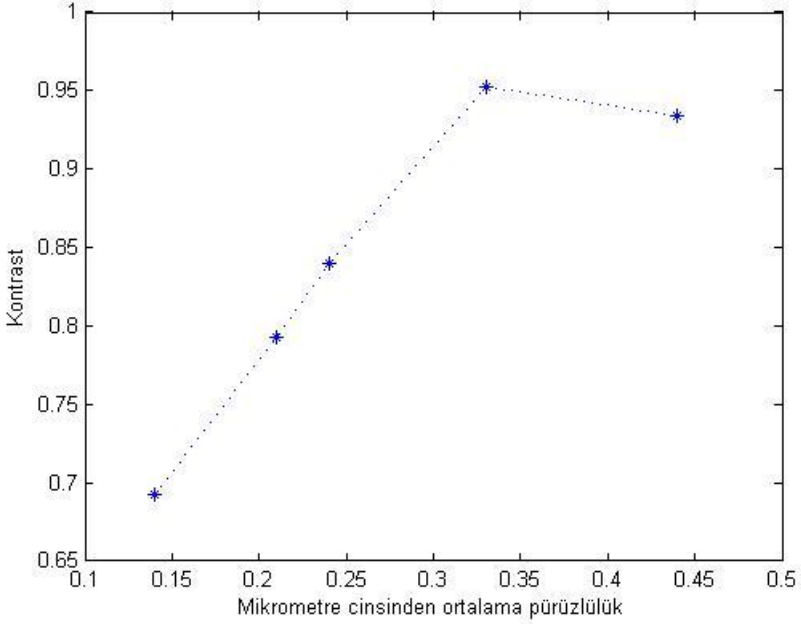
### 4.3.5 Eliptik polarizasyon, 70° geliş açısı



Şekil 4.10 70°’de eliptik polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi geliş açısını arttırıp polarizasyonu eliptik hale getirmek, 45°’de lineer polarize gelen ışıkla benzer sonucu vermiştir. Eğer kontrast limiti 0.92 olarak alınırsa ölçüm limitimiz 0.24  $\mu\text{m}$ ’den biraz büyüktür.

### 4.3.6 Doğrusal polarizasyon, 70° geliş açısı



Şekil 4.11 70°’de doğrusal polarize lazer ışığının kontrast ölçümleri

Geniş gelme açısı ve doğrusal polarize lazer ışığı ile yaptığımız bu konfigürasyon benek deseninin birinci dereceden istatistiği ile yaptığımız ölçümlerde en iyi sonucu vermiştir. Ölçüm limiti yaklaşık 0.32  $\mu\text{m}$  olarak görünmektedir. 0.33  $\mu\text{m}$  ortalama yüzey pürüzlülüğüne sahip örnek kontrast limiti dolaylarındadır fakat birleştirme doğrusunun eğiminden ölçüm limiti 0.32 alınmıştır.

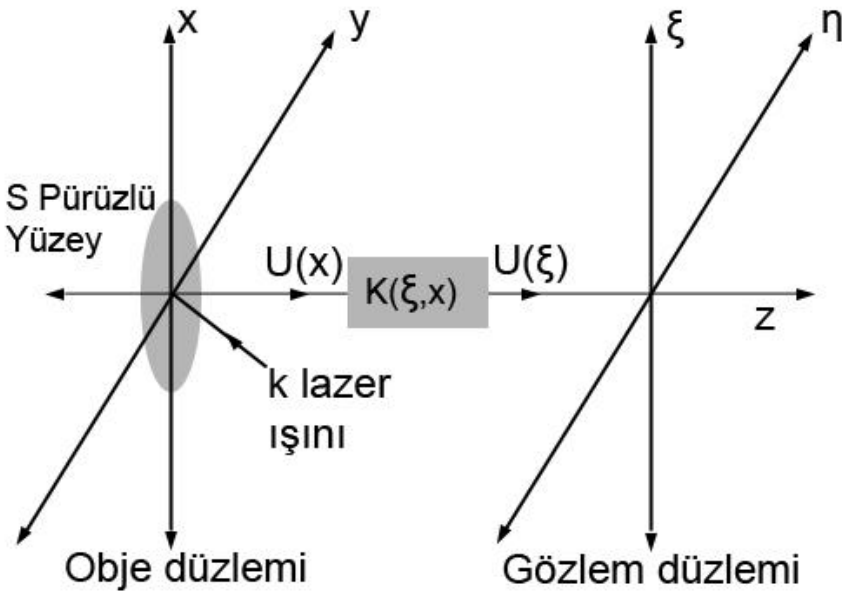
Yaptığımız benek kontrast yöntemi çalışmalarında subjektif benek deseni üzerinden işlemler yapılmıştır. Deneylede görülmüştür ki, objektif ve fotoğraf makinesinde yapılan manipülasyonlar ölçüm

sisteminde farklı değişikliklere yol açmamıştır. Temel olarak tüm ölçümlerde benek deseninin CCD'yi tam olarak kaplayacak şekilde fotoğraf makinesinden odak uzaklığı seçilmiş, enstantane ya da diyafram gibi ışık azaltıcı ya da arttırıcı ayarların değiştirilmesi, sonuçlarda gözle görülür bir fark yaratmamıştır.

## 5. BENEK KORELASYON ANALİZİ

Benek korelasyon analizi, benek deseninin ikinci dereceden istatistiğine dayanmaktadır. Basit olarak ölçülmek istenilen yüzeyin farklı şekillerde alınan (farklı açılarda ya da gönderilen ışığın farklı dalga boylarında) iki benek deseni arasında oluşan korelasyona dayanmaktadır.

### 5.1 Teori



Şekil 5.1 Genel sistem düzeneği

Benek deseni oluşumunu, gelen  $U(x)$  sinyalini  $U(\xi)$ 'ya çeviren bir lineer transform olarak modelleyebiliriz. Buradaki  $U(x)$  sisteme gelen elektromanyetik alan ve  $U(\xi)$  pürüzlü yüzeye çarptıktan sonraki elektromanyetik alan olsun. Her ne kadar  $x$  ve  $\xi$  olarak tek boyuta bağlı fonksiyonlar olarak göstersek de aslında iki boyutlu

vektörlerdir.  $x=(x,y)$  ve  $\zeta=(\zeta,\eta)$  eksenlerinde tanımlı olmak üzere ve  $K(\zeta,x)$  optik sistemin dürtü tepkisi olarak alındığında;

$$U(\zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x)K(\zeta,x)dx \quad (5.1.1)$$

Olarak yazılabilir. Aynı zamanda oluşan benek deseninin ışık şiddeti genişliğinin, kompleks konjügesiyle çarpılarak bulunabilir.

$$I(\zeta) = U(\zeta) \cdot U^*(\zeta) \quad (5.1.2)$$

Yüzey pürüzlülüğü rastlantısal bir fonksiyon olduğundan  $I(\zeta)$  ve  $U(\zeta)$ 'da rastlantısal birer fonksiyondur. Eğer  $I_1$  ve  $I_2$  iki farklı benek deseni ışık şiddeti olmak üzere iki rastlantısal fonksiyon arasındaki korelasyon katsayısı şu şekilde verilebilir:

$$\gamma_{12} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\left[ \langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2 \right]^{1/2} \left[ \langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2 \right]^{1/2}} \quad (5.1.3)$$

Aynı zamanda benek deseni ışık şiddetlerinin rms farkı şu şekilde verilebilir.

$$D_{12} = \left\langle \left( \frac{I_1}{\langle I_1 \rangle} - \frac{I_2}{\langle I_2 \rangle} \right)^2 \right\rangle^{1/2} \quad (5.1.4)$$

Yüzey pürüzlülüğünü, kullandığımız ışığın dalga boyundan büyük kabul ettiğimizde oluşan benek deseni gaussian dağılımı istatistiğine uyacaktır.  $I_1, I_2$  çarpımının grup ortalamasını (ensemble average) şu şekilde yazabiliriz.

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle + \left| \langle U_1 U_2^* \rangle \right| \quad (5.1.5)$$

Bu durumda 5.1.3 ve 5.1.4 denklemleri şu hale gelirler:

$$\gamma_{12} = \frac{\left| \langle U_1 U_2^* \rangle \right|^2}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle} \quad (5.1.6)$$

$$D_{12} = \left[ 2 \left( 1 - \frac{|\langle U_1 U_2^* \rangle|^2}{\langle I_1 I_2 \rangle} \right) \right]^{1/2} = [2(1 - \gamma_{12})]^{1/2} \quad (5.1.7)$$

$k=2\pi/\lambda$  dalga numarası ile gelen lineer polarize, kolime edilmiş iki farklı ışın,  $(x,z)$  düzleminde  $\alpha_1$  ve  $\alpha_2$  açılarıyla pürüzlü yüzeye çarptığında, yüzeyi tamamen iletken kabul edip gölge ve çoklu saçılım etkilerini yok sayarsak oluşacak alan genişliği şu şekilde verilebilir:

$$U_1(x) = A_1(x) \exp\{-j[\varphi_1 x + \phi_1 h(x)]\} \quad (5.1.8)$$

$$U_2(x) = A_2(x) \exp\{-j[\varphi_2 x + \phi_2 h(x)]\} \quad (5.1.9)$$

5.1.8 ve 5.1.9 numaralı denklemlerde  $\varphi$ ,  $k_1 - k_2$  vektörünün  $x$  bileşeni,  $\phi$ ,  $k_1 - k_2$  vektörünün  $z$  bileşenidir. Bu durumda;

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{\lambda}(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \quad \phi_n = \frac{2\pi}{\lambda}(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (5.1.10)$$

Eğer gözlem noktamızı normale yakın aldığımızı hesaba katarsak;

$$\varphi_n = k \sin \alpha_n \quad \phi_n = k(1 + \cos \alpha_n) \quad (5.1.11)$$

şeklinde yazabiliriz. Ayrıca  $A(x)$  lazerimizden çıkan gaussian ışındır ve  $L$  yarı genişliği olmak üzere şu şekilde verilebilir:

$$A_n(x) = \exp[-(x^2 \cos^2 \alpha_n + y^2)/L^2] \quad (5.1.12)$$

$A(x)$ , açısal benek korelasyonu kullandığımızdan daima aynı olacaktır. Bu yüzden  $A_1(x) = A_2(x) = A(x)$  olarak yazabiliriz. Farklı iki ışık şiddeti olan  $I_1$  ve  $I_2$ 'nin korelasyon katsayısını bulmak, yani 5.1.6 denklemini kullanabilmek için  $|\langle U_1 U_2^* \rangle|$  değerini hesaplamamız gerekmektedir.

$$\begin{aligned} \langle U_1 \mathbf{e}_1 \bar{U}_2^* \mathbf{e}_2 \rangle &= \int \int_{-\infty}^{\infty} A(x_1) A(x_2) \exp[-j(\varphi_1 x_1 - \varphi_2 x_2)] \quad (5.1.13) \\ &\times \langle \exp\{-j[\phi_1 h \mathbf{e}_1 \bar{\phi}_2 h \mathbf{e}_2]\} \times K_1 \mathbf{e}_1, x_1 \bar{K}_2^* \mathbf{e}_2, x_2 \bar{d}x_1 dx_2 \end{aligned}$$

5.1.12 denklemini çözebilmek için rastlantısal olan yükseklik fonksiyonu  $h(x)$ 'in dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Pürüzlü olan yüzey genel olarak 0 ortalamalı gaussian rastlantısal işlevi olarak modellendiğinden, bu şekilde aldığımızda;

$$\langle \exp\{-j[\phi_1 h(x_1) - \phi_2 h(x_2)]\} \rangle = \exp[-\sigma_h^2 (\phi_1 - \phi_2)^2 / 2] \quad (5.1.14)$$

$$\times \exp\{-\sigma_h^2 \phi_1 \phi_2 [1 - \rho(x_1 - x_2)]\}$$

olarak ortak karakteristik fonksiyonu yazabiliriz. Burada  $\sigma_h^2$  yüzey yükseklik yoğunluğunun varyansıdır.  $\rho(x_1 - x_2)$  ise  $h(x)$ 'in normalize edilmiş otokorelasyonudur. İzotropik yüzeyler için normalize otokorelasyon fonksiyonu gaussian kabul edilir. Yüzeyin korelasyon uzunluğu  $r$  olmak üzere;

$$\rho(x_1 - x_2) = \exp\left(\frac{-|x_1 - x_2|^2}{r^2}\right) \quad (5.1.15)$$

şeklinde verilebilir. Daha önce söylediğimiz gibi yüzey pürüzlülüğünü, kullandığımız ışığın dalga boyundan daha büyük kabul etmiştik. Bu durumda  $\sigma_h^2 \phi_1 \phi_2 \gg 1$  olur. Böylece denklem 5.1.13'deki integralin 0'a gitmemesi için  $|x_1 - x_2|$  farkının çok küçük olduğu durumlar gereklidir. Bu fark küçük ise Taylor serileri açılımından

$$\rho(x_1 - x_2) = \exp\left(\frac{-|x_1 - x_2|^2}{r^2}\right) \quad (5.1.16)$$

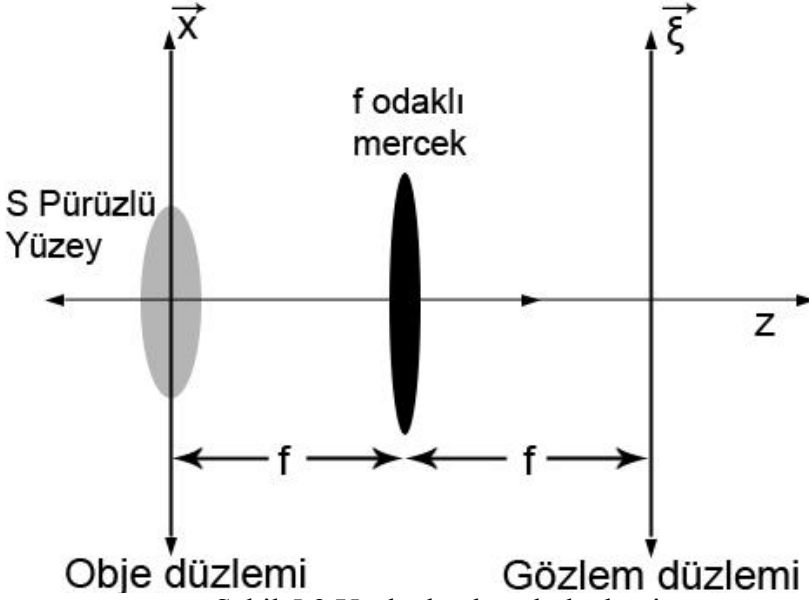
Olarak bulunabilir. Yaptıklarımızı 5.1.13'de yerine yazarsak;

$$\langle U_1(x_1) U_2^*(x_2) \rangle = \exp(-\sigma_h^2 (\phi_1 - \phi_2)^2 / 2) \int_{-\infty}^{\infty} A(x_1) A(x_2)$$

$$\times \exp[-j(\phi_1 x_1 - \phi_2 x_2)] \times \exp\left(\beta_{12} |x_1 - x_2|^2\right) \quad (5.1.17)$$

$$\times K_1(x_1, x_1) K_2^*(x_2, x_2) dx_1 dx_2$$

$$\beta_{12} = \sigma_h^2 \phi_1 \phi_2 / r^2 \quad (5.1.18)$$



Şekil 5.2 Uzak alan benek düzlemi

Eğer düzenek şekil 5.2'ye benzer bir düzende yerleştirilirse optik sistemin dürtü tepkisini şu şekilde yazabiliriz ve görüldüğü gibi uzak alandaki elektromanyetik alan, obje düzlemindeki Fourier transformudur.

$$K(\xi, x) = \exp \left[ -j \left( \frac{\xi}{f} \right) \cdot x \right] \quad (5.1.19)$$

Denklem 5.1.17'yi, denklem 5.1.19'u kullanarak yeniden yazacak olursak:

$$\begin{aligned} \langle U_1(\xi_1) U_2^*(\xi_2) \rangle &= \exp(-\sigma_h^2 (\phi_1 - \phi_2)^2 / 2) \int \int_{-\infty}^{\infty} A(x_1) A(x_2) \\ &\times \exp[-j(\phi_1 x_1 - \phi_2 x_2)] \times \exp \left( -\beta_{12} |x_1 - x_2|^2 \right) \\ &\times \exp \left[ -j \left( \frac{\xi_1}{f} \right) \cdot x_1 + \left( \frac{\xi_2}{f} \right) \cdot x_2 \right] dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (5.1.20)$$

$$\begin{aligned}\zeta_1' &= \frac{\phi_1 + k\zeta_1/f}{2} & \eta_1' &= k\eta_1/2f \\ \zeta_2' &= \frac{\phi_2 + k\zeta_2/f}{2} & \eta_2' &= k\eta_2/2f\end{aligned}\quad (5.1.21)$$

5.1.21'deki değiştirmeler yazılıp aynı zamanda denklem 5.1.12, 5.1.20'de yerine koyulursa

$$\begin{aligned}\langle U_1 \zeta_1 \bar{U}_2^* \zeta_2 \rangle &= \exp(-\sigma_h^2 (\phi_1 - \phi_2)^2 / 2) \\ &\times \exp \left[ -\frac{k^2}{2} \cos^2 \alpha_1 (\zeta_1' - \zeta_2')^2 \right] \\ &\times \exp \left[ -\frac{k^2}{2} (\eta_1' - \eta_2')^2 \right] \\ &\times \exp \left[ -\frac{\zeta_1'^2 + \zeta_2'^2}{2\beta_{12}} \right] \exp \left[ -\frac{\eta_1'^2 + \eta_2'^2}{2\beta_{12}} \right]\end{aligned}\quad (5.1.22)$$

Buradan benek deseni ışık şiddetinin ortalama değerini,  $\zeta_1 = \zeta_2$  olarak şu şekilde yazabiliriz:

$$\langle I_n \zeta \rangle = \exp \left[ -\frac{\zeta'^2 + \eta'^2}{\beta_{11}} \right] \quad (5.1.23)$$

Sonuç olarak korelasyon derecesini yazmak için denklem 5.1.6, denklem 5.1.22 ve denklem 5.1.23'ü kullanırsak;

$$\begin{aligned}\gamma_{12}(\zeta_1, \zeta_2) &= \exp \left[ -\sigma_h^2 \sin^2 \alpha_1 k^2 \delta \alpha^2 \right] \\ &\times \exp \left[ -\frac{k}{2f} \cos \alpha_1 (\zeta_1 - \zeta_2 - f \cos \alpha_1 \delta \alpha)^2 \right] \\ &\times \exp \left[ -\frac{k}{2f} (\eta_1 - \eta_2)^2 \right]\end{aligned}\quad (5.1.24)$$

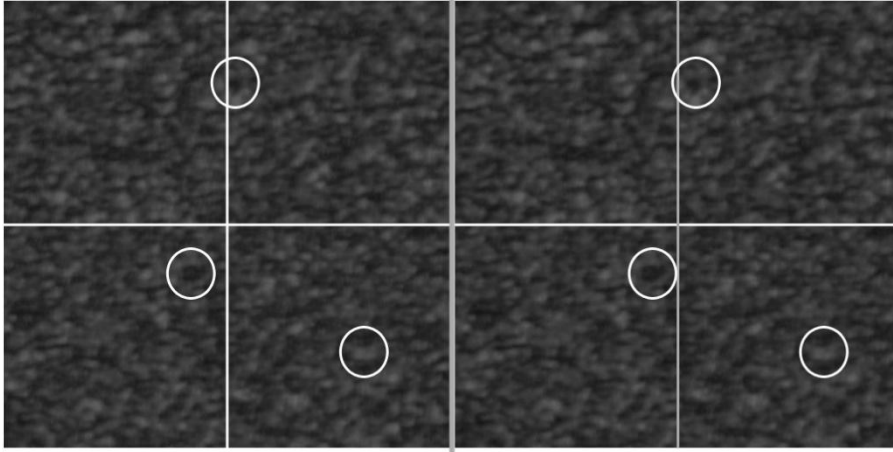
Gelme açısı  $\delta\alpha$  kadar değiştirildiğinde, benek deseni de şekil 5.2'ye göre  $f \cos \alpha_1 \delta\alpha$  kadar değişecektir. Aynı zamanda eşit  $\eta$  koordinatları da seçilirse, korelasyon derecesi, pürüzlülük, geliş açısı, dalga numarası ve açı değişimi cinsinden eksponansiyel bir fonksiyon haline gelir.

$$\gamma_{12} = \exp \left[ -\sigma_h^2 \sin^2 \alpha_1 k^2 \delta \alpha^2 \right] \quad (5.1.25)$$

Bulunan bu sonuç Leger'in (1975) bulduğu ve farklı pozların aynı film üzerine alınıp oluşan Young ızgaralarının görünürlüğüne (visibility) dayanan sonuç ile aynıdır. (Ruffing, 1986)

## 5.2 Benek Yer Değiştirmesi

Bölüm 5.1’de teorisine yer verilen benek korelasyon ile yüzey pürüzlülüğü ölçümü, daha önce bahsedildiği gibi yüzeye farklı açılarda gelen lazer ışığının çekilen fotoğraflarının arasındaki korelasyona dayanmaktadır. Burada geliş açısı küçük olduğundan (örneklerimizde yaklaşık  $0.1^\circ$  gibi açılar ele alınmıştır), bu proses gerek el ile ayarlanabilen bir döndürme işlemi, gerekse de bazı aletlerden yararlanarak kullanılabilen otomatik döndürme işlemleri hassas olmayabilir. Her seferinde açı değişimini başka bir kontrol bloğu tarafından izlemek ise zahmetli bir işlem olacaktır. Fakat bu işlem zaten gözlemekte olduğumuz iki resim arasındaki çapraz korelasyon matrisinden çıkarılabilir.



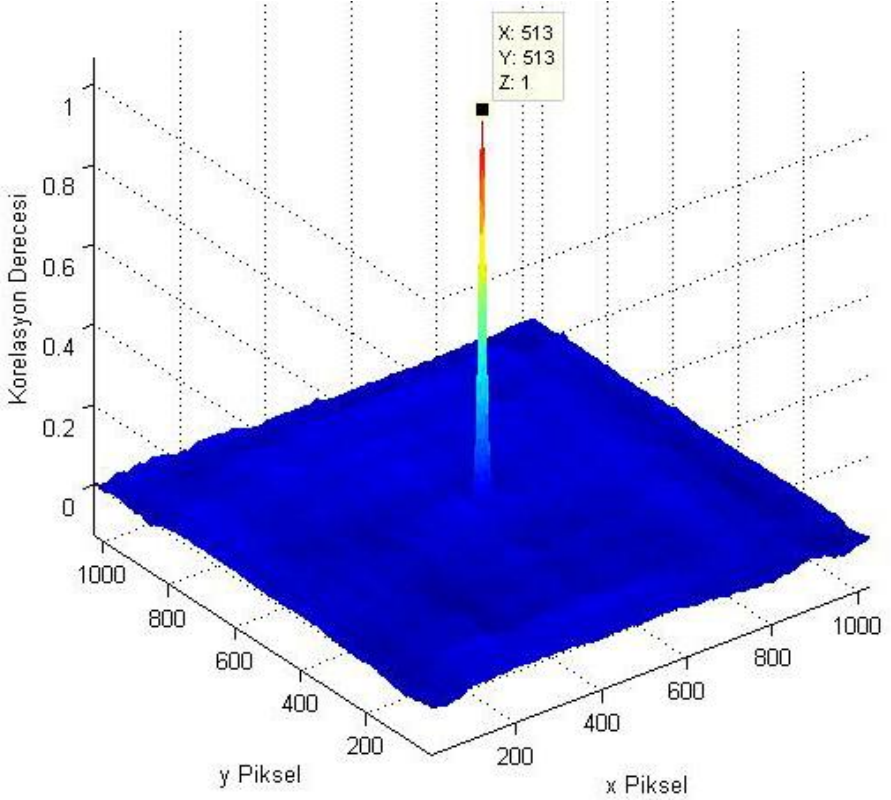
Resim 1 Geliş Açısı 45

Resim 2 Geliş Açısı 45.02

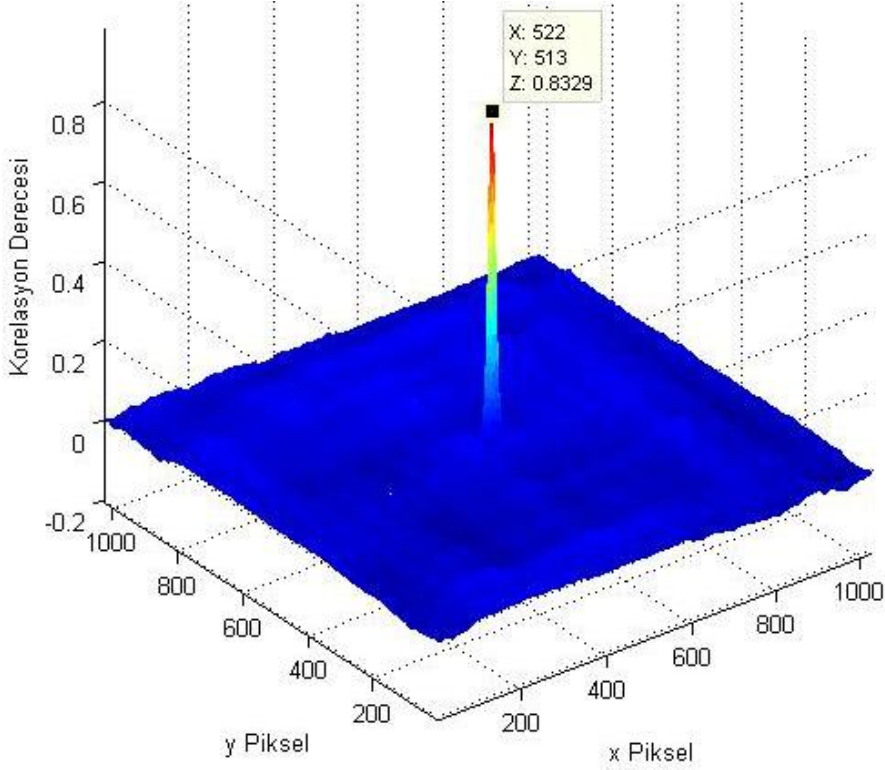
Şekil 5.3 Benek yer değiştirme örneği

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi gelme açısında  $0.2^\circ$ ’lik bir değişim benek deseninde açı değişimi yönünde kaymalar meydana getirmiştir. Beyaz daire ile işaretlenmiş bölgelerin eksen çizgilerine uzaklığının değişimi belli olmaktadır.

Eğer iki sinyalin arasında sadece  $T$  kadar bir kayma varsa en yüksek korelasyon derecesinin  $T$  noktasında olacağı açıktır. Şekil 5.3’de verilen birinci resmin otokorelasyon fonksiyonunu ve ikinci resimle yaptığı çapraz korelasyonunu şekil 5.4 ve şekil 5.5’ de incelersek korelasyon matrisinin tepe noktasının yaptığı kaymayı görebiliriz.

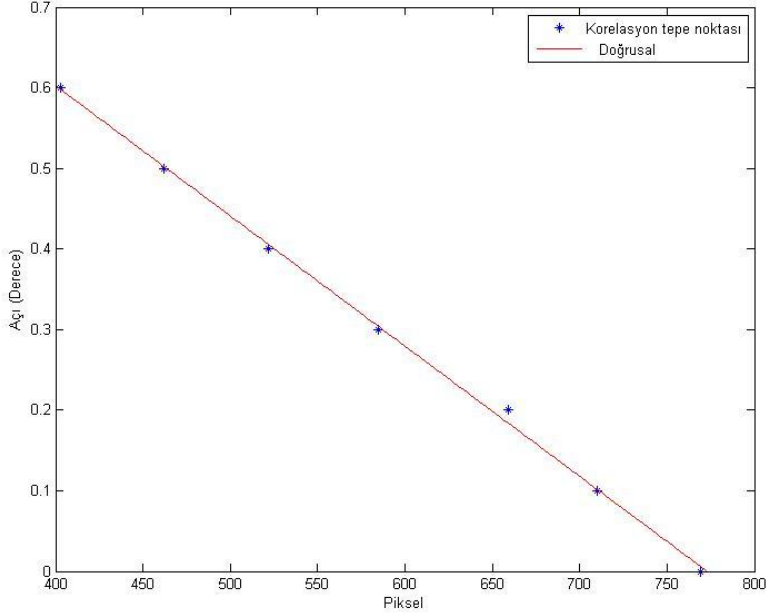


Şekil 5.4 Birinci resmin otokorelasyon matrisi



Şekil 5.5 Birinci resmin ikinci resimle çapraz korelasyon matrisi

Birinci resim ve ikinci resim 512x512 boyutlarında oldukları için korelasyon matrisinin boyutları 1024x1024 oluşmuştur. Birinci resmin otokorelasyonu, sıfır noktası olan (513,513) noktasında oluşmuştur. Şekil 5.5’de görüldüğü üzere maksimum korelasyon noktası 9 piksel civarında kaymıştır. Arttırdığımız 0.02°’lik açıya karşılık benek 9 piksel yer değiştirmiştir. Bulduğumuz bu 9 piksellik yer değiştirme şekil 5.3’de görülebilmektedir. İşaretlediğimiz noktaların bir önceki poza göre durumları tam olarak 9 piksel yer değiştirmiştir. Buna dayanarak belirlenen bir açıda kaç pikselin yer değiştirdiğine bakılıp  $\delta\alpha$  açı değişimi, korelasyon matrisindeki tepe noktasının kaymasıyla rahatça bulunabilir.



Şekil 5.6 Açık değişimi ve korelasyon matrisi maksimumu ilişkisi

Şekil 5.6'da hesapladığımız korelasyon tepesi noktası ve açık değişimi ilişkisi verilmiştir. Resimlerden biri 256x256 olsa da diğer resim benek kaymasının alt resimden kayarak çıkması sonucu oluşan bilgi kaybından dolayı diğer resim 768x256 alınmıştır. Bunun sonucunda oluşan korelasyon matrisi 1537x256 olmuştur. Bu durumda otokorelasyon matrisinin tepesi noktası 769,257 noktasında oluşur.

### 5.3 Görüntü İşleme

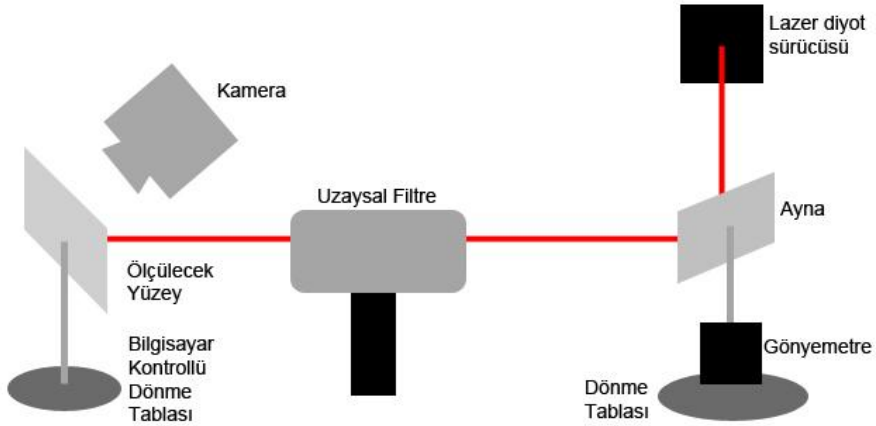
Fotoğraf makinesinden alınan benek görüntüsünün kırılması amacıyla bölüm 4.2'de anlatılan yöntemden yararlanılmıştır. Yalnız bu kez oluşan benek deseninin sınırlarının değişmemesi önemlidir. Aksi takdirde iki farklı resim arasındaki korelasyon ve benek yer

değiştirmesi doğru olarak bulunamaz. Bunun için benek sınırları ve kırpma koordinatları yalnızca ilk fotoğraf için alınmış, diğer fotoğraflar, bu kırpma koordinatlarına göre kırpılmışlardır. İşlemlerin hızlandırılması amacıyla 256x256'lık bir alanda işlem yapılmıştır.

Çapraz korelasyon için MATLAB'ın kendi iki boyutlu korelasyonların hesaplandığı fonksiyonu olan normxcorr2 fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonla tüm korelasyon matrisi alınmış ve maksimum noktası bulunarak oluşan benek yer değiştirmesi hesaplanmıştır.

Çapraz korelasyon yaparken dikkat edilmesi gereken nokta, resimlerden birinin 256x256 boyutlarından daha büyük alınmasıdır. Aksi takdirde, benek yer değiştirmesi sonucu oluşan ikinci resimde ilk resimdeki bilgilerin bir kısmı bulunmayıp, ilk resimde olmayan bölgeler olacaktır. Bu da korelasyon değerini etkileyecektir.

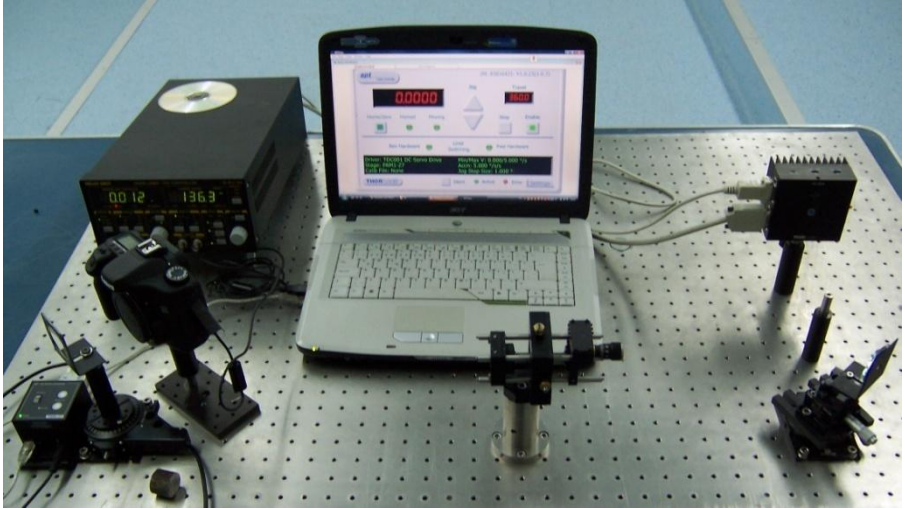
#### 5.4 Deney



Şekil 5.7 Benek korelasyon analizi deney düzeneği (şematik)

Benek korelasyon yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü analizi için, benek kontrast yönteminde kullandığımız düzeneğe benzer bir düzenek kullanılmıştır. Ölçümler lineer polarizasyona sahip lazer ışığında yapılacağından herhangi bir polarizör kullanılmamış, ölçüm

yapılacak yüzeyin altındaki dönme tablası, DC Servo motorlu, bilgisayar kontrollü dönme tablasıyla değiştirilmiştir. Bu işlemin amacı küçük açı değişimlerini, bir mikrometre yardımıyla değil bilgisayardan hassas bir şekilde yapabilmektir. Deney düzeneğindeki en önemli değişiklik kameranın artık yüzeyle herhangi bir açı yapacak şekilde konumlandırılmamasıdır. Teorik çıkarımda gösterildiği gibi kameranın ölçülecek yüzeyin normalinde bulunması gerekmektedir.



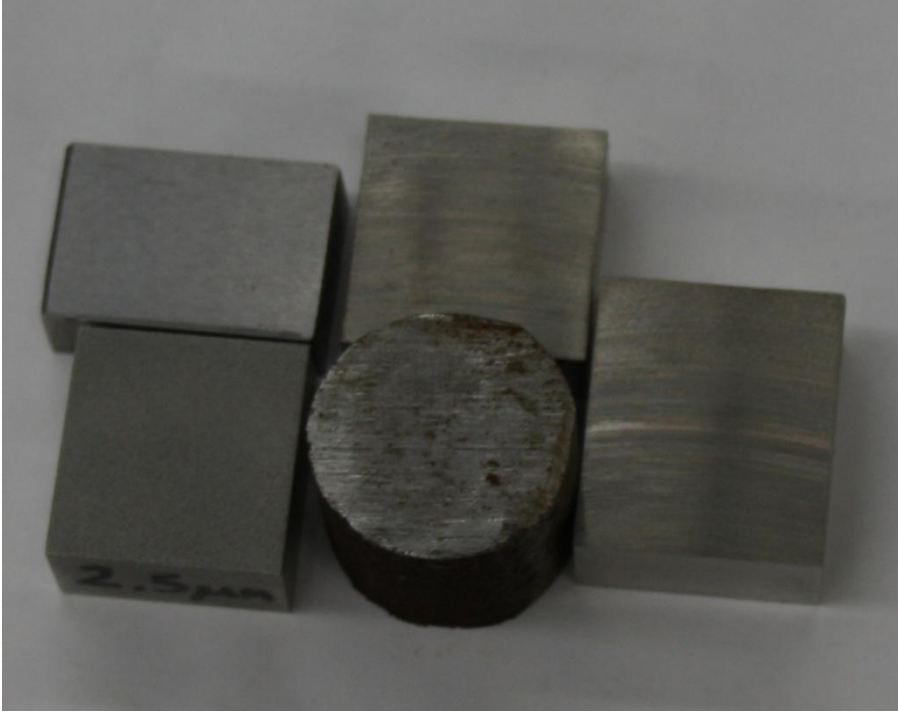
Şekil 5.8 Benek korelasyon analizi deney düzeneği

### 5.4.1 Korelasyon Yöntemi

Bu yöntemde hesaplamalar açı değişimden sonra farklı alınan iki fotoğrafın normalize korelasyonundan yola çıkılarak yapılacaktır. Canon EOS Utility yardımıyla alınan fotoğraflar bilgisayara aktarılarak MATLAB’da işlenmiştir.

Korelasyon yöntemi basit olarak, pürüzlü yüzeyden alınan iki farklı benek deseninin korelasyon eğrisine dayanır. Denklem 5.1.25 ele alınır, görüleceği gibi aynı gelme açısında, iki poz arası açı değişimi aynı olan ve aynı dalga numarasına sahip ışıkla aydınlatılmış

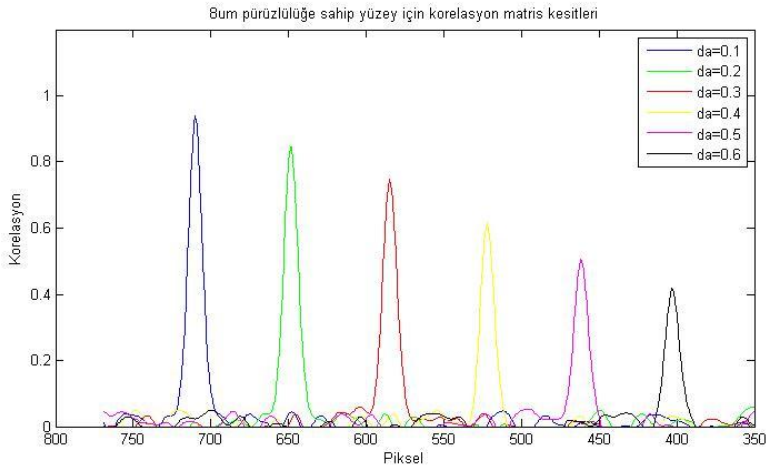
yüzeylerin pürüzlülüğü arttıkça korelasyon katsayısı azalacaktır. Amacımız farklı pürüzlülüğe sahip yüzeyleri ölçüp bir karakterizasyon eğrisi çıkarmaktır.



Şekil 5.9 Pürüzlülüğü belli malzemeler

Daha önce şekil 5.4 ve şekil 5.5’de iki örnek korelasyon matrisi verilmiştir. Normalize edilmiş otokorelasyon matrisinde tepe noktası daima 1 olacaktır ve bu maksimum nokta tam ortada sağlanacaktır. Ölçümlerin hızlı ve aynı zamanda sağlıklı olması için deneyimizde 256x256 boyutlarında alt resimler kullanıldığından oluşan korelasyon matrisi 512x512 boyutlarındadır ve tepe noktası otokorelasyon matrisi için (257,257) pozisyonunda çıkar. Daha önce bahsettiğimiz gibi açı değişiminde tepe noktası yeri değişecek ve iki benek deseni birbiriyle tam olarak örtüşmediğinden, maksimum değer pürüzlülüğe bağlı olarak azalacaktır.

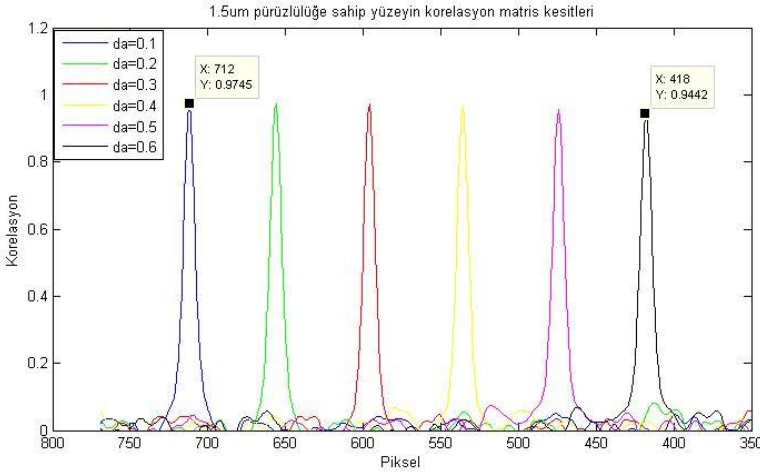
Şekil 5.10'da 8 µm yüzey pürüzlülüğüne sahip örnekten alınan 0.1°'lik basamaklarla gelme açısı değiştirilmiş 6 farklı fotoğrafın korelasyon matrisinin kesiti görülmektedir. Görüldüğü gibi gelme açısı 0.1°'lik basamaklarla arttırıldıkça ilk resimle olan korelasyonları azalmaktadır.



Şekil 5.10 6µm pürüzlülüğe sahip yüzeyin farklı gelme açıları için korelasyon matrisi kesiti

Şekil 5.10'da 1.5 µm pürüzlülüğüne sahip yüzeyin korelasyon matrisleri kesiti bulunmaktadır. Şekil 5.11 ile karşılaştırıldığında korelasyon eğrisi değerleri daha yüksektir. Her iki şekil karşılaştırıldığında, görüldüğü gibi sabit tutulan açı değişimleri için alınan korelasyon eğrisi tepe noktaları pürüzlülük arttırıldıkça, azalmaktadır. Bölüm 5.2'de benek deseni yer değiştirmesini korelasyon tepe noktası kaymasıyla ilişkilendirmiştik. MATLAB'da kullanılan normxcorr2 komutu denklem 5.4.1'de görüldüğü gibi oluşan matrisin her noktası için korelasyon çarpanını verir. Eğer sadece benek deseni kayması olan yerinin değerini almak istiyorsak tepe noktasını almamız yeterlidir.

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [f(x-u, y-v) - \bar{g}_{u,v}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2} \sqrt{\sum_{x,y} [f(x-u, y-v) - \bar{g}_{u,v}]^2}} \quad (5.4.1)$$



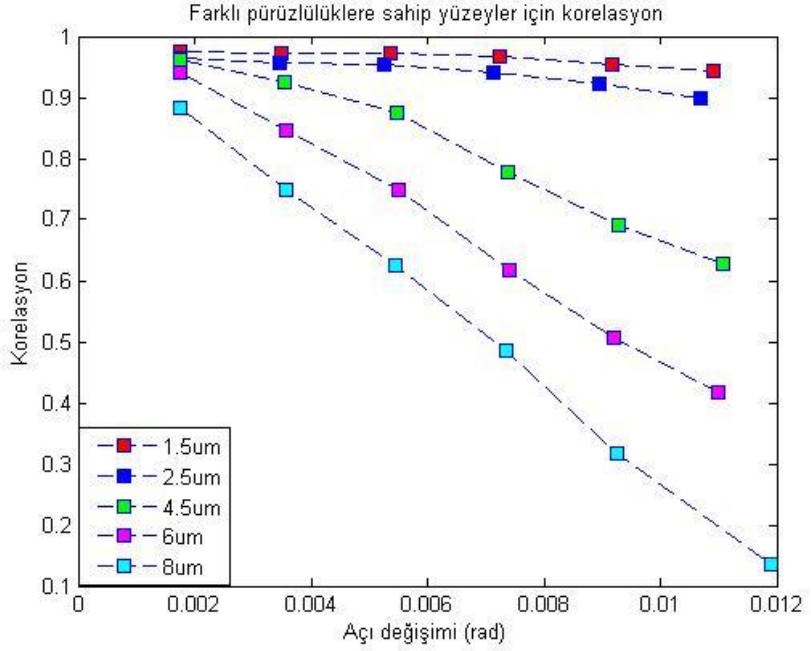
Şekil 5.11 1.5 µm pürüzlülüğe sahip yüzeyin farklı gelme açıları değişimi için korelasyon matrisi kesiti

Deneyimizde pürüzlülükleri 1.5 µm'den 8 µm'ye kadar değişen örnekler kullanılmıştır. Alınan ölçümler şekil 5.12'de gösterilmiştir. Benek deseni kaymasına göre bulunan korelasyon çarpanları görüldüğü gibi pürüzlülük azaldıkça azalmaktadır. Ölçüm sonuçlarını ele alarak yapılan Gaussian fit eğrileri şekil 5.13'de gösterilmiştir. Fit edilen eğrilerden yapılan 0.007 radyanlık açı değişimiyle oluşan benek kayması için korelasyon katsayısının pürüzlülüğe ilişkisi incelenmektedir. Gaussian fit edilen eğrilerde hata oranının düşük olduğu gösterilmiştir. Eğrinin denklemi:

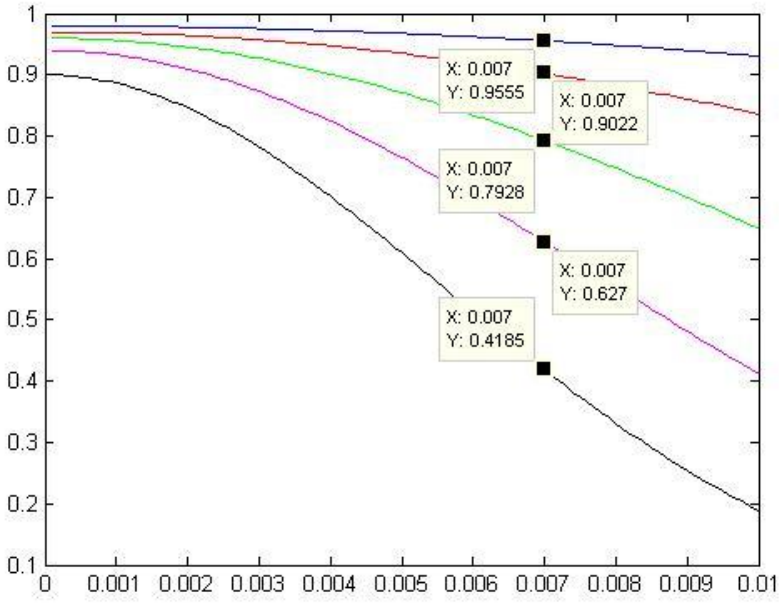
$$y = \exp(-(\sigma_h / 7.6 \times 10^{-6})^2) \quad (5.4.2)$$

Olarak bulunmuştur. Bulunan deneysel sonuç ışığın dalga boyuyla, geliş açısıyla, ışığın formuyla ve kullanılan optik elemanlar

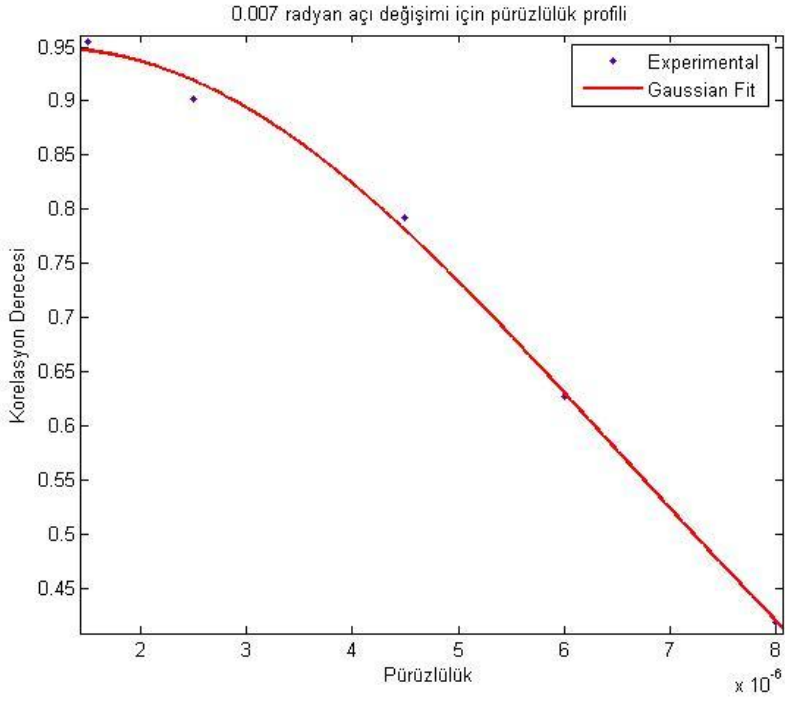
ile ilişkilidir. Örnek olarak yaptığımız deneylerde gördüğümüz üzere, pürüzlülük değerinin katsayısı, yüzeyden sonra kullanılan ince kenarlı lensin odak uzaklığıyla doğru orantılıdır.



Şekil 5.12 Farklı pürüzlülüklere sahip yüzeyler için korelasyon eğrileri



Şekil 5.13 Şekil 5.12'ye Gaussian fit uygulanmış hali



şekil 5.14 0.007 radyan benek kayması için pürüzlülük korelasyon ilişkisi

## 6. SONUÇLAR

Benek kontrast yönteminde güçlü lazer kullanılması ve uzaysal filtreleme yöntemleriyle pürüzlü yüzey ölçümü, lineer ve eliptik polarizasyonlarda farklı geliş açılarıyla incelenmiş ve en yüksek limit dalga boyunun yaklaşık 0.5 katı olarak ölçülebilmektedir. Ölçümlerimizde 658nm.'lik lazer kullanıldığından ölçüm limiti yaklaşık olarak 320nm. hesaplanmıştır. Pürüzlülük arttıkça hesaplanan kontrast değerinin arttığı ve kontrast değeri 1 civarlarında saturasyona uğradığı gözlenmiştir.

Benek korelasyon yönteminin benek yer değiştirmesi ile uygulanması ölçümde büyük bir kolaylık sağlamıştır. Her farklı fotoğraf için açı ölçümü yapılmasına gerek kalmamış, bunun yerine zaten ölçülecek olan korelasyon matrisinden faydalanılarak ilgili açı değişimi hesaplanabilmektedir. Ortalama pürüzlülüğü 1.5  $\mu\text{m}$  ile 8  $\mu\text{m}$  arası olan yüzeyler ölçülmüştür. Literatürde her ne kadar daha pürüzlü yüzeyler ölçülmüşse de, daha fazla pürüzlü yüzeyleri ölçmeye genellikle ihtiyaç duyulmamaktadır.

Hassas cihazlar, masaüstü bilgisayar programları ve MATLAB fonksiyonları yardımıyla yapılan ölçümler literatürdeki diğer sonuçlara uygundur.

Yapılan bu çalışma, daha sonra yapılabilecek benek kontrast yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü ölçümünde alt limit belirlenmesi, enterferometrik yöntemlerle yüzey pürüzlülüğü ölçümü, ultrasonik yöntemlerle yüzey pürüzlülüğü ölçümü, benek korelasyon yönteminde dalga boyu değişimiyle yapılan ölçümler (uzaysal benek korelasyon - SSC), uzaysal benek korelasyonunda oluşabilecek korelasyon matrisi tepe noktası değişimi incelenmesi, yüzey pürüzlülüğünün, yansıma sonrasında dalga cephesine etkisi gibi çalışmalara zemin hazırlamıştır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

**Asmad M., Baldwin G., Maczeyzik C., Mendoza F., Lopez C.P.,** 2004, Study of the surface roughness in metals with different surface finishing by two-dimensional correlation of laser speckle pattern, Proc. of SPIE, 5622: 1495-1500

**Begemann T.F., Hinsch K. D.,** 2004, Measurement of random processes at rough surfaces with digital speckle correlation, Journal of Optical Society of America A, 21:252-262

**Dainty J.C.,** 1975, Laser Speckle and Related Phenomena, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 12-74

**Dhanasekar B., Krishna Mohan N., Bhaduri B., Ramamoorthy B.,** 2008, Evaluation of surface roughness based on monochromatic speckle correlation using image processing, Precision Engineering, 32:196-206

**Fujii H., Asakura T.,** 1974, Effect of Surface Roughness on the Statistical Distribution of Image Speckle Intensity, Optics Communications, 11: 35-38

**Goodman J.W.,** 2006, Speckle Phenomena in Optics, Roberts and Company Publishers

**Hamed A.M., El-Ghandoor H., El-Diasty F., Saady M.,** 2004, Analysis of Speckle Images to Assess Surface Roughness, Optics & Laser Technology, 36: 249 –253

**Leonard L. C., Toal V.,** 1998, Roughness Measurement of Metallic Surfaces Based on the Laser Speckle Contrast Method, Optics and Lasers in Engineering ,30: 433-440

**Leger D., Mathieu E., Perrin J.C.,** 1975, Optical surface roughness determination using speckle correlation technique, Applied Optics, 14(4):872-877

**Lehmann P.,** 1999, Surface-roughness measurement based on the intensity correlation function of scattered light under speckle-pattern illumination, Applied Optics, 38(7):1144-1152

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

**Persson U.**, 2006, Surface Roughness Measurement on Machined Surfaces Using Angular Speckle Correlation, *Journal of Materials Processing Technology*, 180: 233–238

**Ruffing B.**, 1986, Application of speckle-correlation methods to surface roughness measurement: a theoretical study, *Journal of Optical Society of America A*, 3(8):1297-1304

**Sirohi R.S.**, 1993, *Speckle Metrology*, CRC Press

**Tian G. Y., Lu R. S., Gledhill D.**, 2006, Surface measurement using active vision and light scattering, *Optics and Lasers in Engineering*, 45:131-139

**Toh S.L., Quan C., Woo K.C., Tay J.C., Shang H.M.**, 2001, Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique, *Optics & Laser Technology*, 33:427-434

**Zhou L., Xuezheng Z.**, 2005, Real-time measurement of surface roughness based on dynamic speckles, *Proc. of SPIE*, 5638:395-403



## **ÖZGEÇMİŞ**

Burak EREN, Türkiye Cumhuriyeti vatandaşı olup 27 Mayıs 1983 tarihinde İzmir’de doğmuştur. Lise eğitimini 2001 yılında İzmir Atatürk Lisesi’nden mezun olup bitirmiş, aynı yıl Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği bölümüne başlayarak öğrenim hayatını devam ettirmiştir. Lisans öğrenimini 2006 yılında tamamlayıp, aynı yıl Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Anabilim Dalı’nda yüksek lisans çalışmasına başlamıştır.

İlgi alanları arasında bilgisayar sistemleri, bilgisayar ağları ve işletim sistemleri bulunmaktadır.