

HAVACILIK SEKTÖRÜNDE OPTİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN YERİ VE KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Dr. Evren Yasa, Evren.Yasa@tei.com.tr
Soner Ören, Soner.Oren@tei.com.tr
Ezgi Uğur, Ezgi.Ugur@tei.com.tr
Özgür Poyraz, Ozgur.Poyraz@tei.com.tr
Güray Akbulut, Guray.Akbulut@tei.com.tr
Semih Pilatin, Semih.Pilatin@tei.com.tr

TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.
Esentepe Mah. Çevreyolu Bulvarı 356, Tepebaşı/ESKİŞEHİR
Tel: 0222 211 21 00

ÖZET

Havacılık sektöründe, ürün performansının sürekli iyileşmesini hedefleyen isterler nedeniyle, parça imalatında gerçekleştirilmesi gereken ölçülerin hassasiyetleri de gün geçtikçe zorlaşmaktadır. Bunun direk sonucu olarak, parçaların geometrik unsurlarının mümkün olan en doğru ve en hızlı şekilde ölçülmesi de havacılık sektörü için önemli konulardan biri haline gelmiştir. Günümüzde, havacılık sektöründe geometrik unsurların doğrulanmasında en çok kullanılan yöntem koordinat ölçüm tezgahlarında yapılan dokunmatik ölçümler veya parçaya/unsura göre tasarlanmış özel ölçüm takımlarıdır. Otomotiv sektöründe ise, lazer tarama veya yapısal ışık ile gerçekleştirilen dokunmasız optik ölçüm yöntemleri, hız ve esneklik gibi özelliklerinden dolayı konvansiyonel ölçüm tekniklerinin yerini almak konusunda hızlı bir ilerleme gerçekleştirmişlerdir. Hızla gelişen ve kabiliyetlerini arttıran bu yöntemler, son yıllarda, havacılık sektöründe de sınanmaya, bazı uygulamalar için kendilerine yer bulmaya başlamıştır. Bahsedilen gelişmeler gözönünde bulundurularak, bu çalışmada, farklı optik ölçüm yöntemlerinin tanıtımının ardından, bu konuda havacılık sektöründe yapılan çalışmalar irdelenecektir. Ayrıca, TEİ bünyesinde gerçekleştirilmiş olan lazer tarama ve ışık sistemleri ile ölçüm hakkında, farklı süreç gereksinimleri göz önüne alınarak karşılaştırmalar yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Optik ölçüm yöntemleri, lazer tarama, yapısal ışıkla tarama

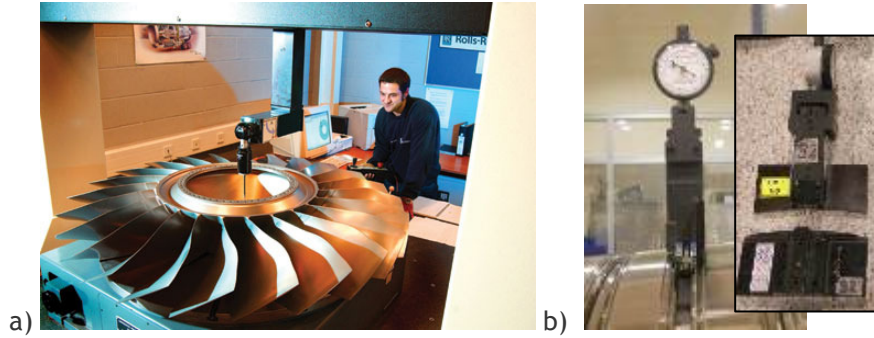
ABSTRACT

Targeting continuous improvement in product performance, part manufacturing tolerances in aerospace/aviation sector are gradually getting tighter and tighter. As a direct output, fast and accurate quality inspection in terms of geometric features has become a major issue in the sector. Currently, the most preferred method in aviation/aerospace is measurement by coordinate measurement machines with touch probes or customized calibrated gages according to part/feature geometry. Differently in automotive sector, non-contact optical measurement methods like laser scanning or structured light has started to replace conventional measurement techniques due to measurement speed and flexibility. These rapidly evolving optical measurement techniques have also been evaluated and found some application areas in aerospace/aviation in the last years. Depending on this fact, after an introduction of various optical measurement techniques, some of case studies in aviation/aerospace sector will be highlighted in this paper. Additionally, comparisons of different optical measurement systems like laser and white light scanning systems will be provided for various selection criteria.

Key Words: Optical measurement methods, laser scanning, structured light scanning

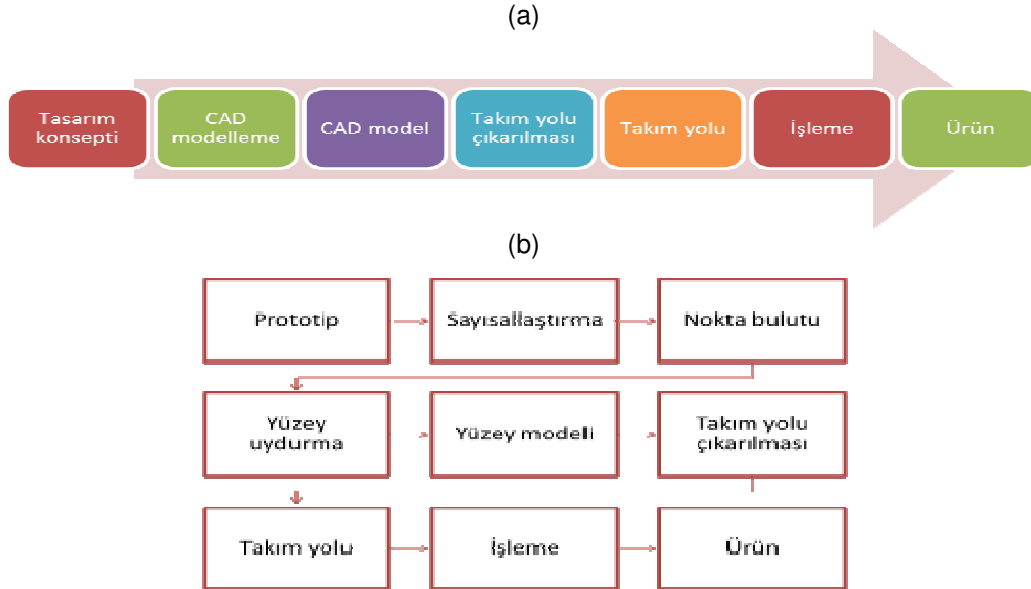
1. GİRİŞ

Havacılık sektöründe, her geçen gün toleranslar daralmakta, yüksek hassasiyette ölçüm yapabilen araçların geliştirilmesi de dolayısıyla önem kazanmaktadır. Günümüzde, yüksek teknoloji ile imal edilen havacılık motorları, montaj öncesi kontrol edilmesi gereken yüzlerce komponentten oluşmaktadır. Havacılık motorlarında en çok tercih edilen ölçüm teknolojileri dokunmatik problu koordinat ölçüm tezgahları (*ing. coordinate measuring machine - CMM*) ile parçaya/unsura göre tasarlanmış özel ölçüm takımlarıdır (bkz. Şekil 1). Dokunmatik problu CMM'ler, ölçüm hızları, mobilite sorunu, ölçülen nokta sayısının limitli olması, tecrübeli operatör ihtiyacı, veri işlenmesi, karşılaştırması, ölçüm ve rapor hazırlanması için farklı yazılım ihtiyacı gibi kısıtlara sahip olsa da, yüksek doğruluk ve tekrar edilebilirlikleri sayesinde kullanımları oldukça yaygındır. Bunun yanı sıra, ölçülmesi gereken unsurlara erişebilirlik veya takım tezgahı üstünde ölçüm alma zorunluluğu gibi sebeplerden ötürü parçaya ve unsura özel tasarlanmış özel ölçüm takımlara olan ihtiyaç da yadsınamaz.



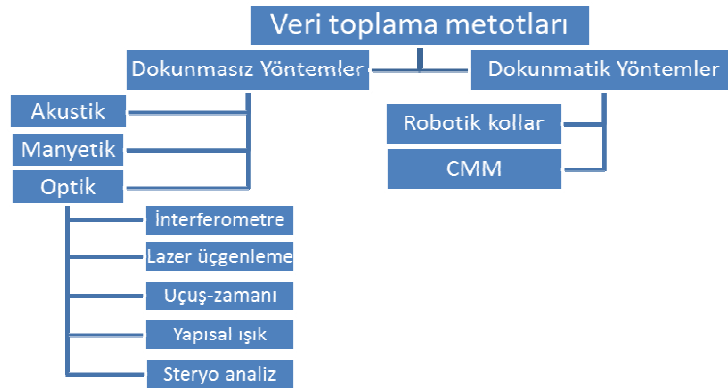
Şekil 1. a) Blisk ölçümü esnasında bir CMM [1] b) Parça/unsura özel tasarlanmış ölçüm takımlarına örnek.

Son yıllarda, lazer tarama ve yapısal ışık (*ing. structured light*) sistemleri hızlı gelişimleri sonucunda, öncelikle otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Özellikle tersine mühendislik uygulamaları açısından, optik ölçüm sistemleri hızlı bir şekilde eldeki prototip üzerinden nokta bulutu çıkarabilme kabiliyetleriyle, bir çok uygulama alanına girmiştir. Tersine mühendislik, ileri mühendislikten farklı olarak, tasarım aşaması yerine, elde varolan bir ürün üzerinden tersine giderek, tasarım geometrisinin tespitini sağlar. İleri ve tersine mühendislik uygulamalarının ana aşamaları Şekil 2'de gösterilmiştir [2]. Optik ölçüm sistemleri, tersine mühendisliğin yanı sıra, hızlı prototipleme ve parça kalite kontrol alanları için de yenilikler sunmaktadır.



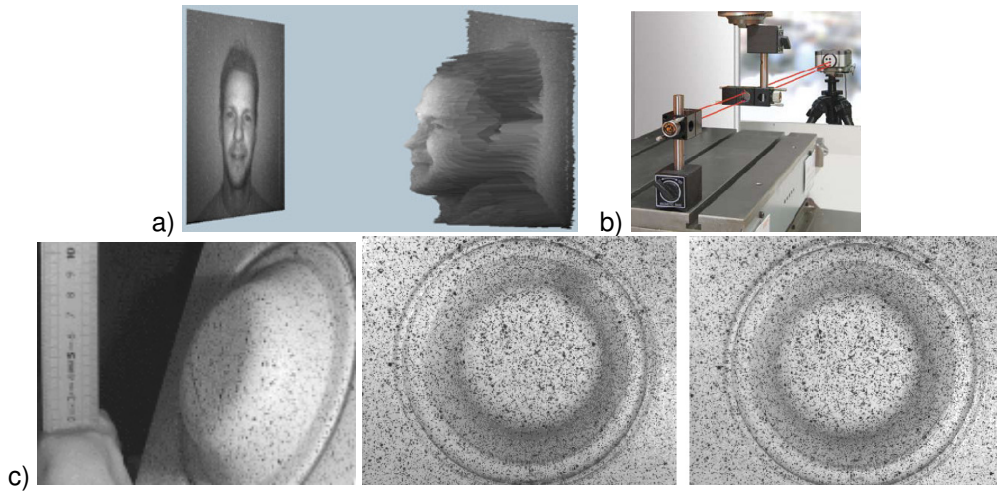
Şekil 2. a) İleri mühendislik ve b) Tersine mühendislik aşamaları [2].

Optik ölçüm yöntemlerinin yanısıra, farklı dokunmasız yöntemler de söz konusudur. Şekil 3'te gösterildiği üzere, dokunmadan ölçüm yapan sistemler arasında akustik ve manyetik ölçüm yöntemleri de mevcuttur. Bu çalışmada, lazer üçgenleme ve yapısal analiz esas olarak ele alınmış olsa da, bunlar dışında interferometre, uçuş-zamanı ve steryo analiz olarak bilinen farklı optik ölçüm yöntemleri de kullanılmaktadır. Uçuş zamanı (*ing. time of flight ToF*) ölçüm metodu, farklı amaçlarla, bir objenin, ışığın, akustik veya elektromanyetik bir dalganın belirli bir medya içindeki geçiş zamanını baz alarak ölçüm yapan farklı teknolojileri içermektedir. Uçuş zamanı, kütle spektroskopu, yakın kızılötesi spektroskopu, ultrasonik akış ölçer, düzlemsel Doppler hız ölçer gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır (bkz. Şekil 4a). Diğer taraftan interferometre ise dalgaların üstüste binmesinden veri çıkaran, astronomi, fiber optik, metroloji, sismoloji, plazma fiziği ve uzaktan hissetme gibi birçok farklı alanda uygulanan bir yöntemdir. Takım tezgahları metrolojisinde, takım tezgahlarının lineer ve açısal volümetrik hatalarının ölçülmesinde kullanılan yöntem, lazer interferometre, buna örnek gösterilebilir (bkz. Şekil 4b). Steryo analiz ise, bir objenin üç boyutlu verisinin elde edilebilmesi için, iki farklı noktadan alınmış dijital görüntülerin işlenmesine verilen addır. Bu şekilde alınmış görüntü örneği Şekil 4c'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Veri toplama yöntemlerinin sınıflandırılması [3].

Bu yöntemler farklı alanlarda uygulama alanı bulmuş olsa da, genel anlamda parça kalite kontrol veya tersine mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen yöntemler lazer ve yapısal ışık ile tarama yapan sistemlerdir. Bu sistemlerle ilgili detaylı bilgi, takip eden bölümde verilmiştir.



Şekil 4. a) ToF kamera ile alınan insan yüzü [4] b) Lazer interferometrenin takım tezgahları metrolojisinde doğrusal hataların ölçümünde kullanımı [5] c) Steryo görme ile resmi alınan preslenmiş sac malzeme ile sağ ve soldan alınan steryo resimler [6].

2. ÜÇ BOYUTLU OPTİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Önceki bölümde anlatılan yöntemler dışında, kalite kontrol ve tersine mühendislik uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmuş olan tarama yöntemleri yapısal ışık veya lazerle yapılan taramalardır. Bu bölümde bu tarama yöntemlerinin temel özellikleri, avantajları ve kısıtları üstünde durulacaktır.

2.1 Yapısal Işıklı tarama

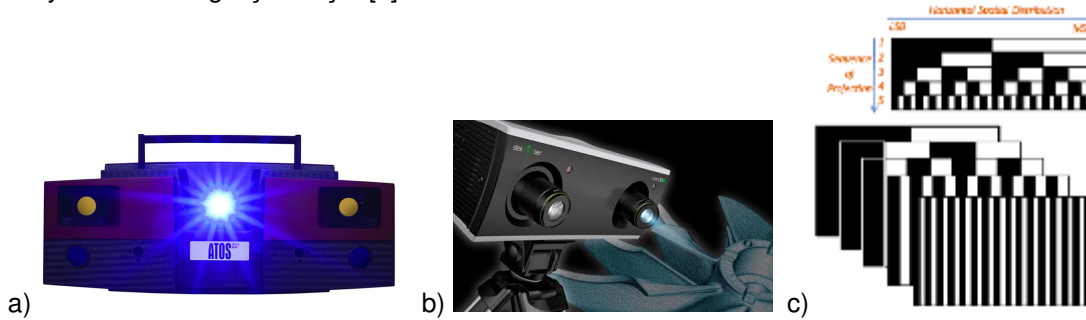
İlk olarak beyaz ışıkla tarama yöntemi adıyla ortaya çıkan, 3 boyutlu sayısallaştırma ve kalite kontrol amaçları ile kullanılan yapısal ışık tarama yöntemi başta otomotiv olmak üzere, havacılık, arkeoloji, doğa bilimleri ve medikal uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu yöntemde, incelenmesi planlanan obje üstüne, projeksiyon vasıtasıyla belirli şablonlar yansıtılır (bkz. Şekil 5). Projeksiyon esnasında bir ya da iki kamera objeyi farklı açılardan izler. Objenin şekline göre, farklı izleme açılarından alınan görüntüler değişir. Bilgisayar aracılığı ile görüntüler alınır, işlenir ve saklanır.



Şekil 5. Yapısal ışıkla tarama

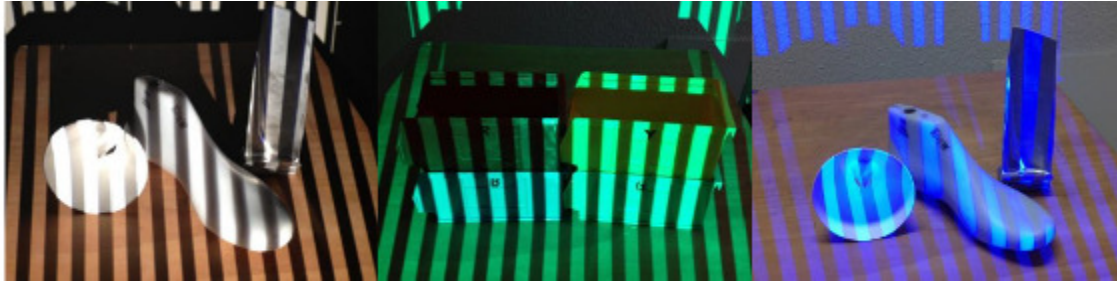
Projeksiyon ünitesi mekanik veya dijital bir projektör olabilir (bkz. Şekil 6). Projeksiyon ünitesinin yanında, bilgisayara Firewire, Gigabit Ethernet veya USB ile bağlı olan yüksek kaliteli siyah beyaz veya renkli kameralar yer almaktadır. Veri toplama süresi, saniyeler ve alt birimleri mertebesinde sürmektedir. Bu süre zarfında, kamera, projeksiyon ünitesi ve taranan objenin birbirlerine göre stabil kalması önemlidir. Kamera çözünürlüğüne bağlı olarak, tarayıcı, tarama başına yüzbinlerce nokta ile milyonlarca nokta aralığında belirli bir yoğunlukta nokta bulutu yaratmaktadır. Bu tür sistemlerden alınan verinin doğruluğu ise üçgenleme açısı, kamera çözünürlüğü, gürültü ve objektiflerin kalitesi gibi parametrelere bağlıdır. İki kameralı sistemlerde, üçgenleme açısı iki kamera arasındaki açıdır. Doğruluk açısından en önemli olan bu parametre büyüdükçe doğruluk artmaktadır. Ancak bunu limitleyen diğer bir parametre ise gölge etkisidir. Gölge etkisi, derin delik ve ceplerin sistem tarafından görülemiyor olmasıdır. Genel olarak tarayıcı sistemlerde üçgenleme açısı 30 derece civarındadır. Kamera çözünürlüğü ise her geçen gün meydana gelen teknolojik gelişmelerle artan bir parametredir. Mevcut sistemlerde üst limit 12 MP'dir. Bir taramada alınabilecek toplam nokta sayısı, tamamen kamera çözünürlüğü ile alakalı bir konudur. Bunu kısıtlayan faktör ise, çözünürlüğün artması ile piksel boyutunun küçülmesi ve dolayısıyla gürültü seviyesinin artmasıdır. Objektiflerin kalitesi ise özellikle kalibrasyon sürecinin kalitesini belirlemektedir. Artan objektif kalitesi ile, alınan görüntüdeki distorsiyonlar azalmaktadır. Ancak günümüzde, bunları bertaraf edebilecek özel olarak tasarlanmış kalibrasyon metotları geliştirilmiştir [7].



Şekil 6. Yapısal ışıkla tarama sistemlerinde projeksiyon ünitesi a) ATOS GOM [8] b) Steinbichler [9] c) Farklı projeksiyon şablonları [10]

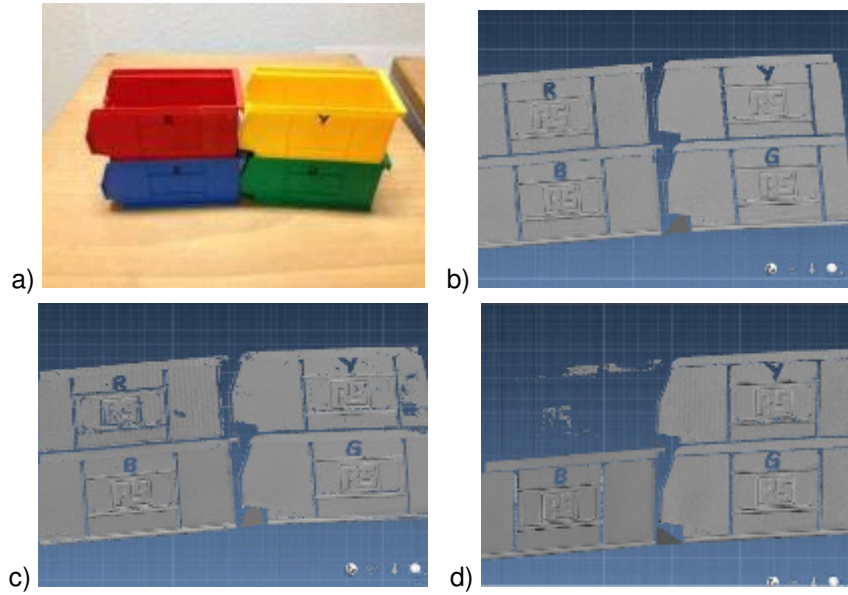
Diğer taraftan, bu tür sistemlerin incelenen objenin yüzeyine ait optik özelliklerinden dolayı belirli kısıtları mevcuttur. Optik bir yöntem olmasından dolayı çevredeki ışık seviyesi, görüş açısı, şeffaflık, parlaklık, yarı saydamlık gibi özellikler birer kısıt olarak belirlemektedir. Tarayıcı ölçüm alabilmek için belirli bir ışık yayarak çalışmasından dolayı, gün ışığı bile bazı durumlarda kısıtlayıcı olabilir. Diğer

tarafından, incelenmesi istenen parça unsurlarının hem projeksiyon hem de kamera açısından görülebilir olması çok önemlidir. Ayrıca, sistemin çalışma prensibinin temelinde, en azından gelen ışığın bir kısmının yansması yattığı için, bunun dışındaki durumlar ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Saydam cisimlerin optik olarak ölçülmesi için geliştirilen ısıya ve termal kameralara bağlı özel sistemler bulunmaktadır [11]. Bunların dışında, ölçülmesi planlanan objenin konkav olmasından dolayı projeksiyon çizgilerinin yansımaları ölçümlerde ciddi sıkıntılara neden olmaktadır. Aynı projeksiyon çizgisi parçanın bir bölümünden diğerine aktarıldığı için, orjinal çizgilerle, yansıyan çizgileri birbirinden ayırmak sistem için kısıtlama yaratmaktadır. Bunun yanı sıra, beyaz ışığın kullanımında problem olmayan ancak farklı renklerde (bkz. Şekil 7) projeksiyon yapan sistemlerde objenin rengi de önem kazanmaktadır. Örneğin, Şekil 8'de gösterildiği üzere, karanlık ortamda beyaz ışıkla yapılan ölçüm sonuçlarında her renk obje aynı kalitede taranmış olmasına rağmen, mavi ve yeşil ışıkla alınan ölçümlerde özellikle kırmızı kutu ile ilgili bir sorun yaşanmaktadır. Sorun özellikle mavi ışıkta daha belirgindir. Yeşil ışıkla alınan tarama sonuçlarında yeşil renk en iyi kaliteyi verirken, sarı ve mavi renkte bunu takip eden ama daha düşük kalitede tarama sonuçları gözlenmektedir. Aynı şekilde mavi ışıkla alınan ölçümlerde de mavi renk en iyi kaliteyi vermiştir. Aynı çalışmada, farklı renkte ışık kullanmanın, geleneksel olarak beyaz ışıkla yapılması zor olan ölçümlerde (yarı saydam, parlak, yansımalar) herhangi bir avantaj getirmediği de görülmüştür. Bu durum, belirli bir renkte obje taramak isteyenler için avantajken, farklı amaçlarla tek bir sistem kullananlar için dezavantaj oluşturabilir.

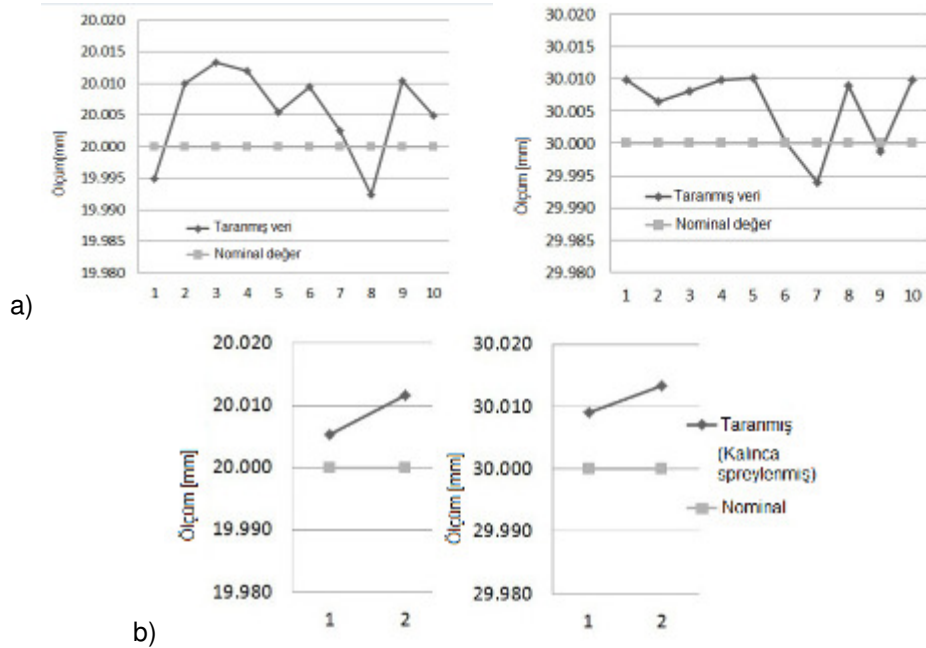


Şekil 7. Farklı renklerle yapılan ışıkla tarama [7]

Bu yöntemin kısıtlarından bir diğeri de parlak veya saydam cisimler için beyaz ince bir tabaka titanyum oksit tabanlı bir solüsyon ile spreyleme ihtiyacıdır. Örneğin, kalibreli taşlanmış masterları yapısal ışık taramaları için oldukça parlaktır. O nedenle, spreylemeden güvenilir bir ölçüm almak, farklı sistemlerle dahi pek mümkün değildir. Spreylemenin dezavantajı ise, işi yapan kişinin tecrübesine bağlı bir proses olmasından dolayı ölçüm belirsizliği üstüne önemli bir etkisi olabilmesidir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada, spreyl üreticisi tarafından, doğru uygulanması halinde bu tabakanın kalınlığının 1 μm 'den küçük olduğu belirtildiği vurgulanmıştır. Ancak, doğru uygulanma çok öznel bir tanımlamadır ve bu durumda anlamı sadece gerekli yerlerde minimum miktarda uygulamadır. 20 mm ve 30 mm'lik kalibreli masterlarla yapılan ölçüm sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Ölçümler önce uygun incelikte spreyleme yapılan yüzey üzerinden alınmış, sonrasında spreyleme abartılarak uygulanmıştır. Sonuçlardan da gözlemlendiği üzere, belirsizlik değerlerindeki artış çok önemli değildir.

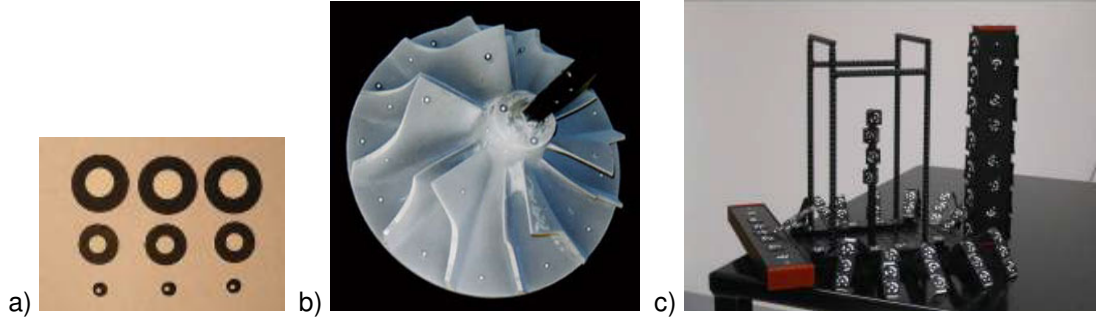


Şekil 8. Farklı renklerle alınan ölçüm sonuçları a) ölçülen objeler b) beyaz ışık sonuçları c) yeşil ışık sonuçları d) mavi ışık sonuçları [7]



Şekil 9. Spreylemenin sonuçları üzerindeki etkisi a) uygun spreyleme sonucu alınan veriler b) aşırı spreyleme sonucu alınan veriler; x eksenini alınan ölçüm sayısını göstermektedir [12].

Diğer önemli bir nokta ise, yapısal ışıkla ölçüm yapan her sistem için geçerli olmasa da, bazı sistemlerin kullandığı markalama işlemidir. Birden fazla tarama işinin sonuçlarını birleştirebilmek için, minimum 3 adet referans kullanma gerekliliği bulunmaktadır. Özellikle büyük parçalar ve farklı yerleşimlerle ölçüm alınması gereken durumlarda, markalama zaruri hale gelebilir. Genelde bu referans noktalar siyah çerçeveli, değişken çapta yapışkanlı kağıtlardan oluşmaktadır (bkz. Şekil 10). Bu tür bir markalama işleminin başlıca dezavantajları, ön hazırlık sürecinin oluşması, parça üstünde yapışkan etkisinin kalabilmesi, ve referans noktanın yerleştirildiği bölgeden ölçüm alınamamasıdır (bkz. Şekil 11). Parça üstüne referans nokta yapıştırmak yerine, uygulanabilecek bir çözüm parça için geliştirilen fişüstü üstüne üç boyutta bu noktaların yapıştırılmasıdır. Aynı tür parçaların ölçüldüğü durumlar için uygun olan bu çözüm, parça çeşitliliğinin çok olduğu durumlar için zorluk yaratabilir.

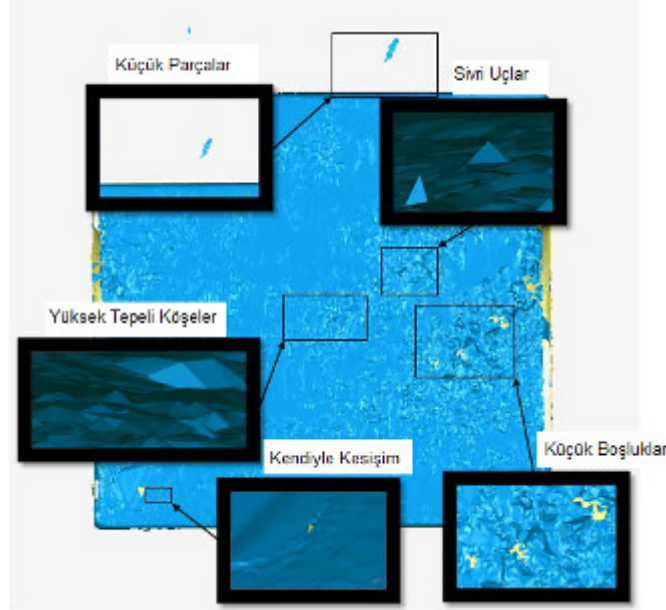


Şekil 10. a) Referans noktalar [13] b) markalanmış bir pervane [14] c) referans fiyestürlere örnek [15]



Şekil 11. Referans noktalama ile alınan bir nokta bulutu [13]

Yapısal ışıla nokta bulutu alındıktan sonra, yapılacak işlem alınan verinin işlenmesi aşamasıdır. Bu aşamada, veri üstünde bazı düzeltmeler yapılmaktadır. Şekil 12’de rastlanan hatalara örnekler verilmiştir. Ölçümü yapılan parça dışında ölçüm alanları, gereksiz çıkıntılar, yüksek tepeli kenarlar, üstüste çakışmalar, yüzey üstünde olmayan küçük delikler bunlara örnek verilebilir.

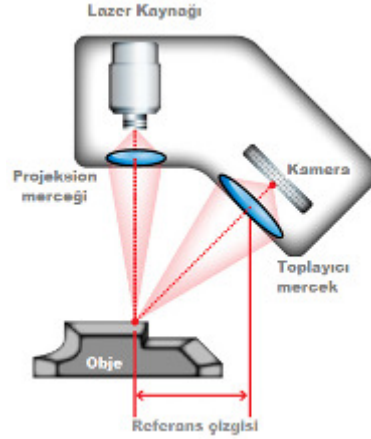


Şekil 12. Alınan nokta bulutunda örme işlemi sonrasında rastlanabilecek hatalar [13]

2.2 Lazerle tarama

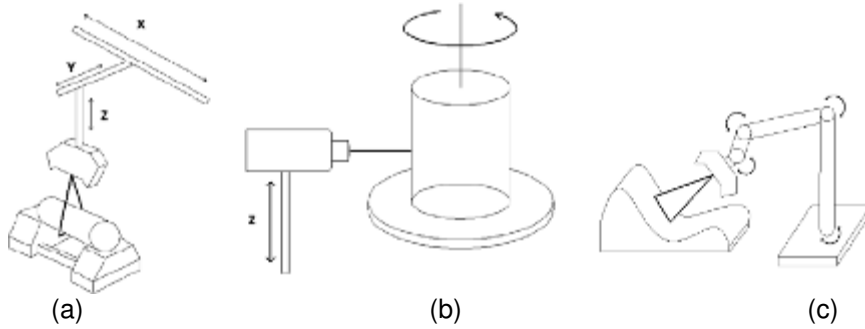
Yaygın kullanılan diğer bir optik ölçüm yöntemi, lazer taramadır. Bu sayede, CMM’lerde dokunmatik problemlerle yapılan ölçümlere kıyasla, bir seferde alınan toplam nokta sayısı, ölçüm hızı ve otomasyona yatkınlık gibi avantajlar kazanılmaktadır. Lazerle tarama, üç boyutlu tarama işlemleri içinde dokunmasız aktif yöntemlerden biridir. Aktif olarak tanımlanan metotlarda, taranması istenen yüzeye bir tür ışıma veya ışık gönderilip, geri yansımaları ölçülmektedir. Lazerle tarama işleminde üçgenleme metodu kullanılır. Bu yöntemde ölçülmesi istenen yüzey üzerine lazer ışını düşürülür. Yüzeyden

yansıyan ışımaya, bir sensör yardımıyla yakalanır (bkz. Şekil 13). Buradaki önemli nokta sensörün algılama yüzeyi ile lazer doğrultusu arasındaki açıdır. Bu açı sayesinde sistemden farklı uzaklıklarda bulunan cisimler üzerinden yansıyan ışınlar sensör algılama yüzeyi üzerinde farklı noktalara düşerler. Lazer ile sensör arasındaki mesafe, algılayıcı üzerine düşen noktanın koordinatları ile trigonometrik fonksiyonlar kullanılarak cismin tarama cihazına olan uzaklığı hesaplanır. Lazer tarama işlemi analog foto sensörler ile gerçekleştirilebildiğinden oldukça yüksek hızlarda veri alımı mümkündür.

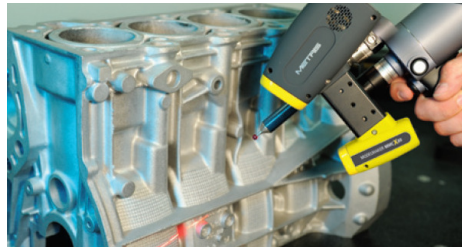


Şekil 13. Lazer üçgenleme metodunda lazer kaynağı, kamera ve ölçümü yapılan obje bir üçgen oluşturmaktadır [16].

Lazer tarama sistemleri farklı kriterlere göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilir. Bu kriterlerden biri birlikte kullanıldığı sistemdir. Lazerle tarama, lazer ölçüm sisteminin CMM üstüne veya robot koluna adaptasyonu ile döner tabla ile birlikte gerçekleştirilebilmektedir (bkz. Şekil 14). Bu sistemlerin seçimi, taraması yapılacak olan cismin şekline ve istenilen hassasiyet seviyesine göre belirlenir. Bunların yanı sıra, elle uygulanan lazer tarama sistemleri de mevcuttur (bkz. Şekil 15).



Şekil 14. Lazer üçgenleme sensörleri ile 3 boyutlu tarama için kullanılan sistemler a) CMM ile, b) döner tabla ile, c) robot kolu üzerinde [2]



Şekil 15. Elde tutulan lazer tarama cihazı – ModelMaker MMDx [17]

Lazer tarayıcılar kullanılan lazerin şekline göre ise çizgisel lazer ve noktasal lazer olmak üzere ikiye ayrılabilir. Çizgisel lazer ile yapılan ölçümlerde tek seferde daha çok nokta ölçüldüğünden ölçüm süresi noktasal lazere kıyasla daha kısadır. Bir parçanın lazerle taraması sırasında çeşitli açılardan birden fazla tarama yapılması gerekmektedir. Taramalar yüzey ile algılayıcı arasındaki uzaklığı vermesinden dolayı, birden çok tarama yapıldığında verileri ilişkilendirebilmek için taramalar arasında

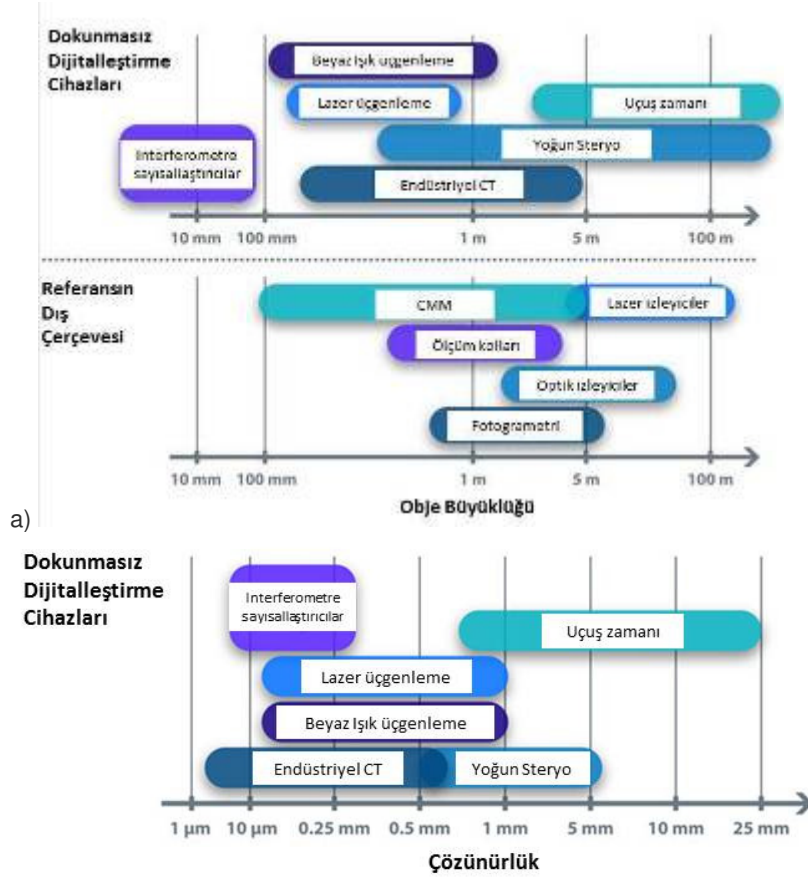
cisim ve sensör konumlarındaki değişimlerin bilinmesi gerekir. Bu nedenle lazer tarayıcılar, Şekil 14'te gösterildiği üzere yüzey taraması işleminde belirli sistemler ile birlikte kullanılırlar.

Lazer tarayıcılar yüksek hızlarda yüksek doğruluk seviyelerine ulaşabilmelerine karşın bu doğruluk seviyeleri çevresel ışık, sıcaklık, yüzey parlaklığı ve gölge etkisi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Lazer taramanın temelinde taranacak yüzey üzerinden yansıyan ışımının algılanması olmasından dolayı, yüksek parlaklıktaki çevresel bir ışık, lazerin algılayıcı tarafından algılanmasını zorlaştırmakta ve hatalı ölçümlere sebep olabilmektedir. Bunu önlemek için algılayıcının önüne yalnızca kullanılan lazerin dalga boyundaki ışığı geçirecek şekilde bir filtre konulabilir. Ancak gün ışığı gibi doğal ışıklar değişik dalga boylarını içermelerinden dolayı, bu filtreler her zaman gerekli korumayı sağlayamamaktadır. Bunun dışında tarayıcılar, ölçtükleri verileri değerlendirirken algılanan ışık parlaklıkları arasından en yüksek olanı seçer ve böylece çevresel etmenlerden kaynaklı gürültülerin engellenmesi amaçlanır. Bu yöntem ise parça yüzeyinde oluşabilecek yansıtıcılık farklılıklarından dolayı bazı bölgelerde hatalar oluşmasına sebep olabilir. Bu sorun, gerekli durumlarda, ölçüm yapılacak yüzey üzerine yapılacak spreyleme ile düzeltilebilmektedir. Bazı durumlarda ise ölçüm yapılacak olan parça geometrisinden ötürü algılayıcılar yüzeyden yansıyan lazeri göremezler. Bu durumda bu noktadaki ölçüm işlemi başarısız olur. Yine geometriden kaynaklı bir başka sorun ise ikincil yansımalar. İkincil yansımalar parça yüzeyinden yansıyan lazerin parçanın başka bir noktasından ikinci kez yansıyarak algılayıcı üstüne gelmesidir. Bu gibi durumlarda yanlış ölçümler alınır. Bu sorunlar tarama yolunun dikkatli bir şekilde planlanması ile çözülebilmektedir. Özetle, tarayıcı performansını etkileyen faktörler operatör tecrübesi, lazer gücü, objeye olan uzaklık, yüzey kalitesi, çevresel ışık ve diğer çevresel faktörlerdir.

Lazer üçgenleme yöntemi ile çalışan tarayıcıların çözünürlüğünü algılayıcı ile lazer arasındaki üçgenleme açısı belirlemektedir. Düşük açılarda çözünürlük düşerken ölçüm alınabilen uzaklık artmaktadır. Büyük açılarda ise yüksek çözünürlükte ölçümler alınırken çalışma uzaklığı kısalmaktadır. Yakın mesafelerde lazer üçgenleme yöntemi mikrometre alt mertebelerinde doğruluklara ulaşabilmektedir [18]. Lazer tarayıcılar ve yapısal ışıkla yapılan ölçümler, elde edilen doğruluk (bkz. Şekil 16), ölçüm hacmi (bkz. Şekil 17a) ve çözünürlük (bkz. Şekil 17b) gibi faktörler ele alındığında, diğer dokunmasız yöntemlere göre birbirine yakın sonuçlar vermektedir. Taşınabilirlik açısından, lazer tarayıcılar birlikte kullanıldıkları dış referansa bağımlıdır. CMM'e bağlı olan bir lazer tarayıcının taşınabilirliği hemen hemen yokken, elle yapılan lazer taramalar açısından taşınabilirlik, hassasiyet kaybına rağmen en yüksek seviyededir. Yapısal ışıkla tarama yapılan sistemler taşınabilirlik açısından daha iyi çözümler sunmaktadır.



Şekil 16. Farklı dokunmasız yöntemlerin doğruluk açısından kıyaslanması [16]



Şekil 17. Farklı dokunmasız yöntemlerin ölçüm alanı içindeki obje büyüklüğü (a) ve çözünürlük (b) açılarından kıyaslanması [16]

Şekil 18'de ise, farklı yöntemlerin, parça yansıtıcılığına karşı etkinliği gösterilmiştir. Buradan da anlaşıldığı üzere, yapısal ışıkla yapılan ölçümler parçanın yansıtma özelliğinden daha çok etkilenirken, lazer üçgenleme daha iyi sonuçlar vermektedir. Dokunmasız yöntemlerden biri olan endüstriyel bilgisayarlı tomografi gibi yöntemler ise, X-ray ışıması kullanmalarından dolayı, parça yansıtıcılığından neredeyse etkilenmemektedirler.

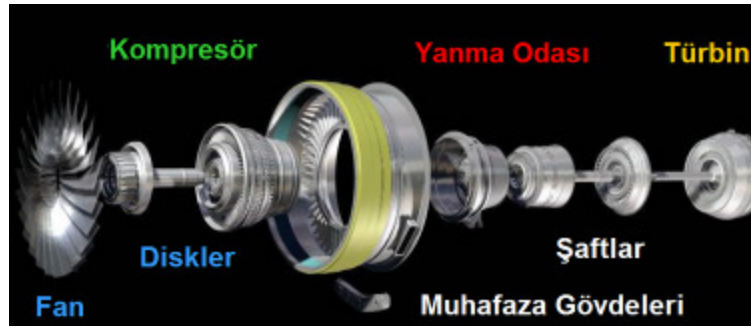


Şekil 18. Farklı dokunmasız yöntemlerin dinamik aralık/parça yansıtma özelliği açısından karşılaştırılması [16]

3. HAVACILIK SEKTÖRÜNDEN ÖRNEKLER

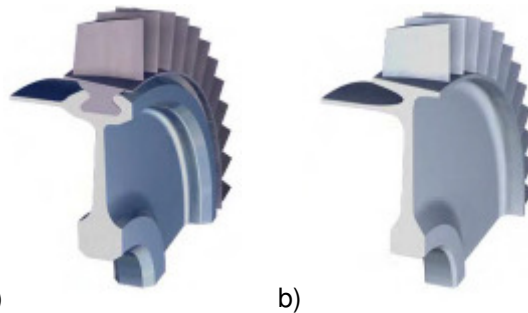
Dokunmasız optik ölçüm yöntemlerinin dokunmatik CMM'lere kıyasla en önemli avantajları fiziksel bir kontakın olmaması, büyük hacimlerin kısa sürede sayısallaştırılabilmesi, yaygın uygulamalar için yeterli doğruluk ve tekrar edilebilirlik, farklı renkleri farkedebilme, probun giremeyeceği çok ayrıntılı yüzey unsurlarının alınabilmesi olarak sayılabilir.

Havacılık sektöründe, özellikle motor komponentleri kalite kontrolünde son yıllarda optik ölçüm yöntemleri kullanılmaya başlanılmıştır. Genel olarak uçak motor modüllerine bakılacak olursa, başlıca fan, kompresör, yanma odası ve türbin modülleri öne çıkan komponentlerdir (bkz. Şekil 19). Her biri yüzlerce parçadan oluşan bu modüllerde, genel olarak hem imalat hem kalite gereksinimleri açısından en zor parçalar, kanatçıklar veya bunların diske entegre edilmesiyle üretilen bliskler denilebilir (blisk geometrisi için bkz. Şekil 20). Özel bir geometriye haiz olan kanatçıklar kırlangıç kuyruğu bağlantısıyla diske bağlanabilir veya tek bir hammalzemedan işlenerek diske entegre olarak herhangi bir bağlantı elemanı kullanılmadan üretilerler. Havacılık motorlarında, kalite kontrol gereksinimleri açısından blisk türü geometriler farklı sebeplerden dolayı zorluklar içermektedirler. Bunlara örnek olarak dar ölçüm tolerans aralığı, hücum (*ing. leading*) ve firar (*ing. trailing*) kenarının çok küçük bir radyus geometrisine ve dar hücum kenarı profil toleranslarına sahip olması, sıcak bölgeler için yüzeysel soğutma deliklerinin bulunması, blisk parçalarında karşılaşılabilen geometriye erişim zorluğu gibi nedenler verilebilir.

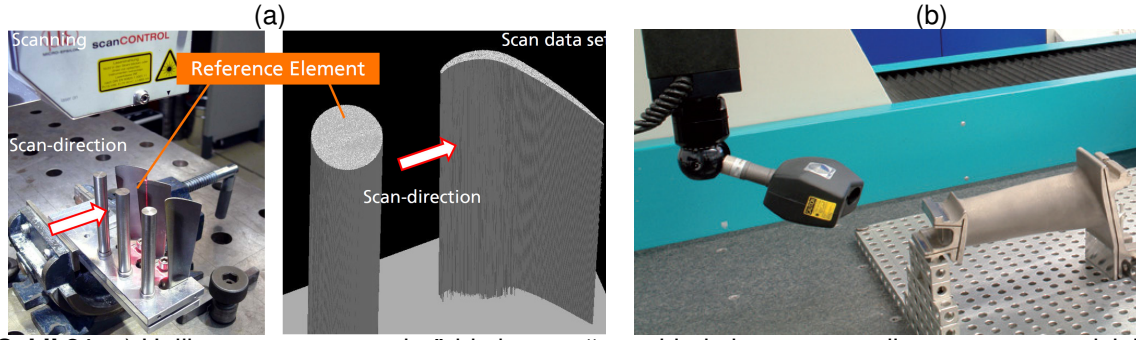


Şekil 19. Başlıca motor modülleri [19]

Optik ölçüm yöntemlerinden lazerle veya yapısal ışıkla tarama en çok kanatçık profilinde uygulanan yöntemlerdir. Bu sayede, dokunmatik problemlerle alınan birkaç kesit yerine, tüm yüzey profili elde edilebilmektedir. Nikon Metrology'e göre, havacılık ve enerji sektöründe lazerle tarama ölçüm sistemini kullanan Airbus, Boeing, GE Jet Engine, Gemco, Pratt&Whitney, Rolls Royce, Siemens Power Generation, Snecma, Stork, Amerika Birleşik Devletleri Hava kuvvetleri gibi bir çok kurum ve kuruluş bulunmaktadır [17]. Lazerle tarama sadece parça imalatının ardından kalite kontrol gereksinimleri açısından değil, çalışmış parçaların tamirinde de kullanılan bir yöntemdir. Özellikle, işleme esnasında parça hizalama konusunda oldukça yardımcı bir araçtır. Buna örnek olarak, lazerle yığma esnasında, palenin yüksekliğini belirleyerek kaç katman malzeme atılacağına karar verilmesinde kullanılan lazer tarama gösterilebilir (bkz. Şekil 21a). Bu sistem sayesinde, lazer yığma ile yapılan tamir işlemi otomatize edilmiştir [20]. Siemens Enerji Grubu da lazer tarama ile kanatçık taramanın avantajları ölçüm öncesi hemen hemen hiç hizalama ihtiyacının olmaması, tam otomasyon için uygunluk, dokunmatik yöntemlere göre daha az zamanda daha çok veri toplanması ve serbest formlu yüzeylerin taranması esnasında prob kompenzasyonunun ortadan kalkması olarak göstermiştir (bkz. Şekil 21b) [21].



Şekil 20. a) Kırlangıç kuyruğu ile bağlanan kanatçık b) disk ile entegre kanatçık – blisk [2]



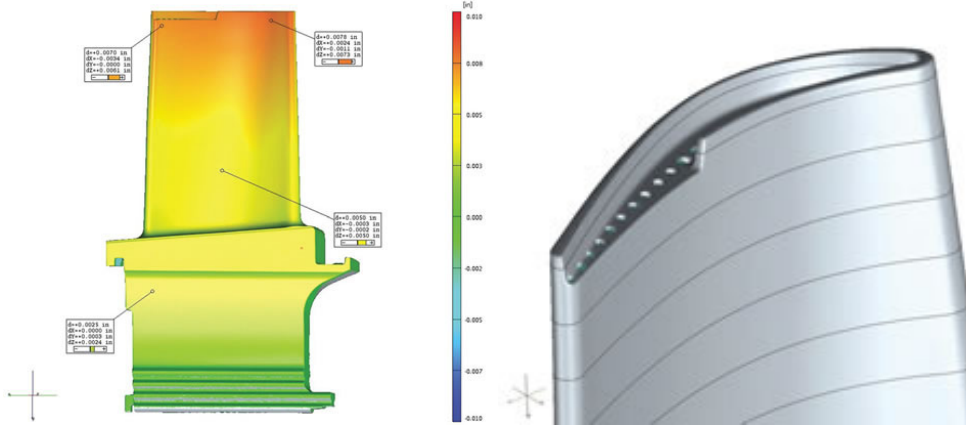
Şekil 21. a) Helikopter motoruna ait türbin kanatçığı tamirinde lazer tarama ile parça geometrisinin elde edilmesi [20] b) Lazer tarama ile kanatçık kalite kontrolü [21].

Yapısal ışıqla ölçüm alan sistemler, havacılık sektöründe özellikle son yıllarda dikkat çekici şekilde kendilerine yer bulmaya çalışmaktadır. Yapısal ışıqla ölçüm sistemi geliştiren üreticiler özellikle bu sektör için özel çözümler geliştirmektedir. Buna örnek olarak Gom'un ATOS ScanBox'ı gösterilebilir [22]. Bu sistemde, blisk grubu da dahil olmak üzere, ölçümü zor olan parçaların tam bir otomasyonla kalite kontrol gereksinimlerinin yerine getirilmesi amaçlanmıştır (bkz. Şekil 22). Bu sistemde yüksek çözünürlüklü bir ATOS yapısal ışıqla ölçüm sistemi, bir robot koluna entegre edilmiştir. Bu sayede, işlem öncesi programlanan robot yolu ve ölçüm metodu ile aynı tür parçaların tam bir otomasyonla ölçülmesi ve hatta veri analizi mümkün hale getirilmiştir.

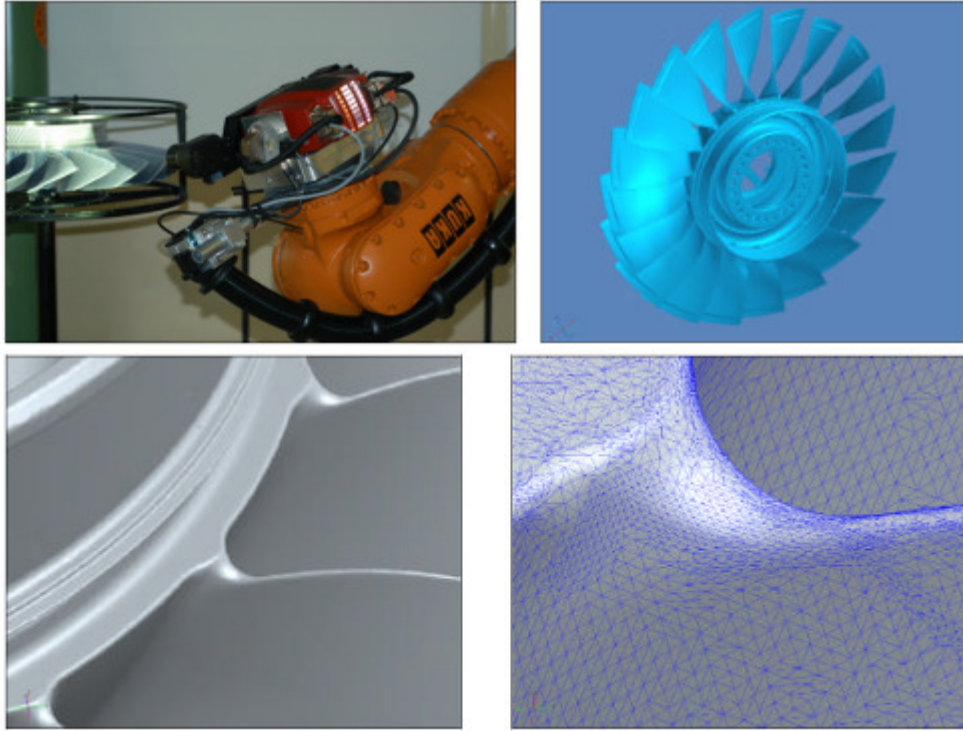


Şekil 22. Gom'dan ATOS ScanBox [22]

Özellikle döküm şirketleri, karmaşık geometrisi ve soğutma kanalları ile konvansiyonel ölçüm teknikleri için pek uygun olmayan türbin kanatçıklarının kalite kontrollerinde yapısal ışıqla tarama tekniklerini kullanmaktadırlar. Bu sayede, Şekil 23'te gösterildiği üzere, nominal geometriden olan sapmalar kolaylıkla ve hızlıca saptanabilmektedir [23]. Almanya'da ana faaliyet alanı bakım, tamir ve revizyon olan MTU şirketinde de yapısal ışıqla blisk ölçümü konusunda çalışmalar mevcuttur [24][25]. Probu CMM'lerle programlanması ve ölçümü çok uzun saatler alan blisk konusunda, optik ölçüm yöntemleri arasından yapısal ışıqla tarama yapmak, potansiyeli yüksek bir uygulama olarak görülmektedir.



Şekil 23. Yapısal ışıkla türbin kanatçığı taraması [23]



Şekil 24. Blisklerin yapısal ışık ölçüm sistemi ile sayısallaştırılması [24]

4. FARKLI OPTİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Tersine mühendislik uygulamalarında ve parça kalite kontrolünde kullanılmak üzere, TEİ'de optik ölçüm yöntemlerinin araştırılmasına başlanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, kanatçık geometrisi baz alınarak, kıyaslamalı bir değerlendirme amaçlanmıştır. TEİ'de yapılan çalışmalarda, yapısal ışıkla tarama için 3 farklı cihaz, lazerle tarama için 2 farklı cihaz, farklı uygulamalara yönelik olarak endüstride kullanım oranları ve katalog verileri kullanılarak seçilmiştir.

Tablo 1'de kullanılan cihazlar, ilgili kamera çözünürlükleri ile gösterilmektedir.

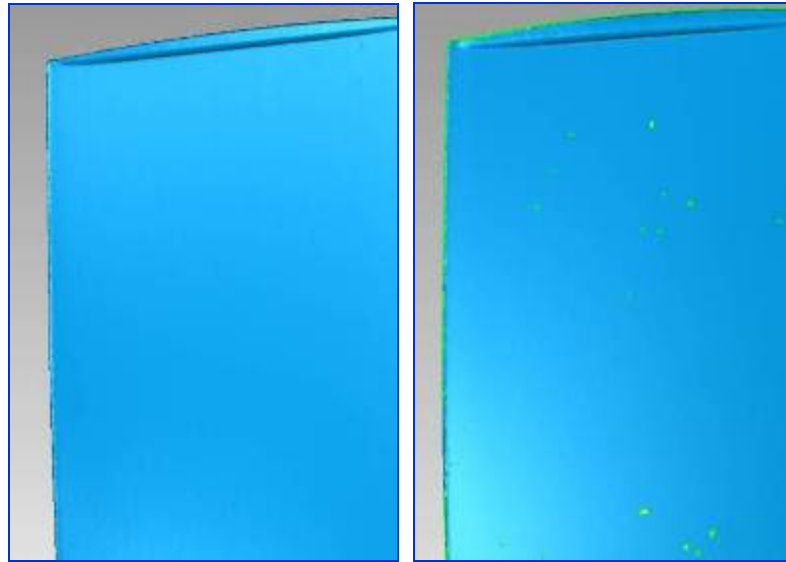
Tablo 1. Kullanılan cihazlar ve genel özellikleri

Yapısal Işık Kullanan Cihazlar	Kamera çözünürlüğü	Kamera sayısı	Çıktı formatı
Sistem A	8 MP	2	.stl ve diğer formatlar
Sistem B	8 MP	2	.stl ve diğer formatlar
Sistem C	5 MP	1	.stl ve diğer formatlar
Sistem D	2 MP	1	.stl ve diğer formatlar

Lazer Tarama Cihazı	Nokta sayısı / Saniye	Kamera sayısı	Çıktı formatı
Sistem X	70.000	1	.xyz (.stl veremiyor)
Sistem Y	1.000.000	2	.asc ve diğer formatlar

Yapısal ışıkla tarama için, seçilen sistemlerin genelinde, kanatçık üzerine spreylenerek tarama gerçekleştirilmiştir. Sistem B için hem spreysiz hem de spreylenerek tarama çalışması yapılmıştır. Sistem D ile spreysiz, sistem C ile spreylenerek tarama yapılmıştır. Spreysiz şekilde alınan sonuçlar Şekil 25'te gösterilirken, Şekil 26'da kanatçık spreylenerek farklı sistemler ile alınan sonuçlar verilmiştir.

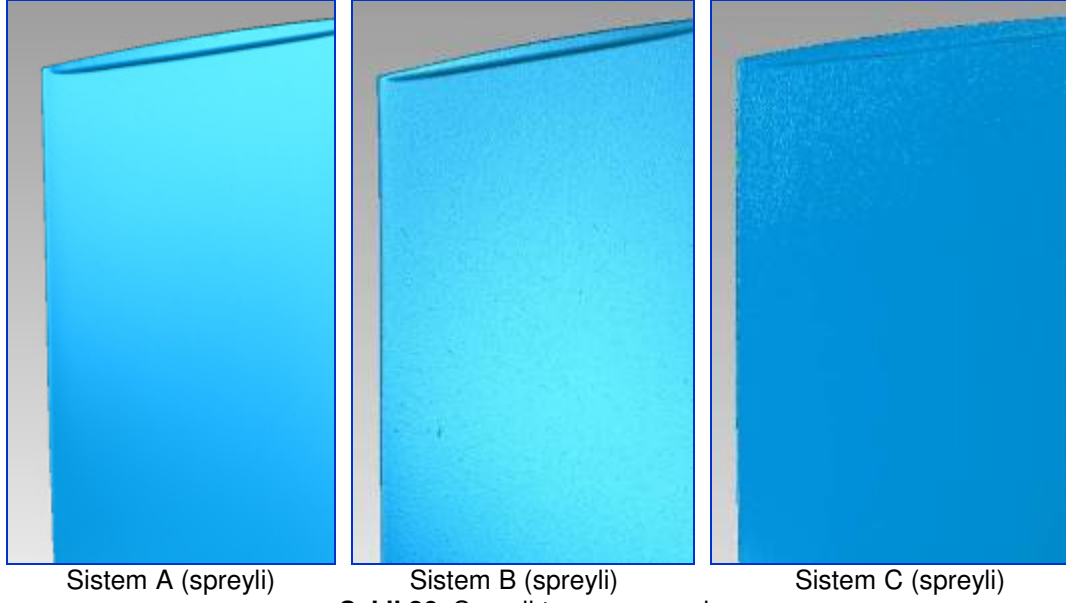
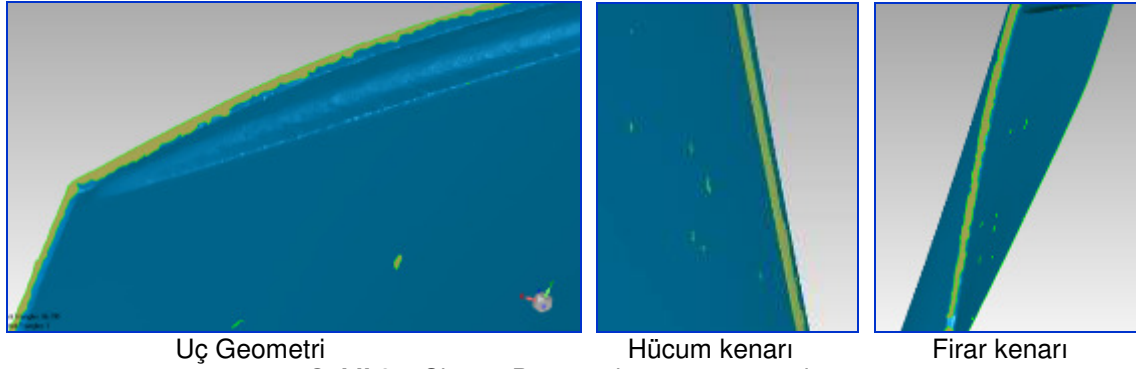
Sistem B ile alınan spreysiz tarama sonucunda görüldüğü gibi, spreysiz yapılan çalışmadaki tarama verisi, kanatçık gövdesi ve yüzeyin pürüzlülüğü açısından gerçek durumu yansıtmaktadır. Fakat parçanın hücüm, firar ve diğer keskin köşeli kenarlarının ince yapısından dolayı kenarlarda ve sivri köşelerde gerekli noktalar alınamamıştır. Bu noktaların alınamamasında parçanın ayna gibi davranarak projeksiyon cihazının ışığını yansıtması da etkili rol oynamıştır. Ayrıca kanatçık gövdesinin bazı bölgelerinde, yansımalarından dolayı nokta alınamamıştır. Şekil 27'de sistem B'nin nokta alamadığı parçanın köşe ve kenarları gözükmemektedir.



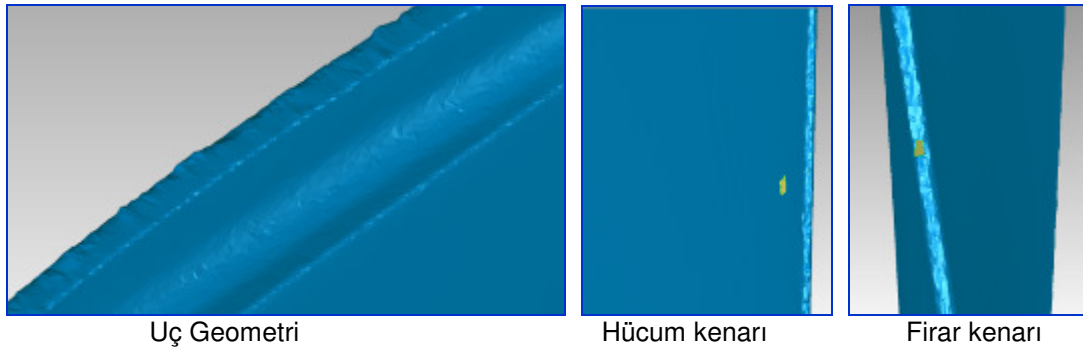
Sistem D (spreysiz)

Sistem B (spreysiz)

Şekil 25. Spreysiz tarama sonuçları

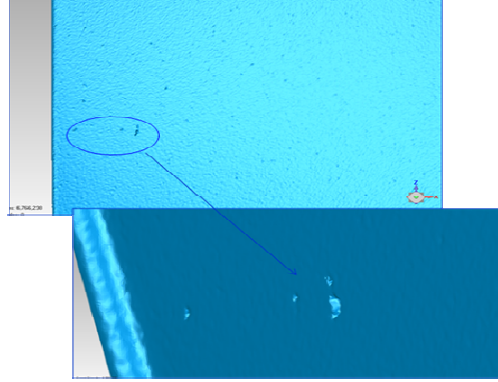
**Şekil 26.** Spreyli tarama sonuçları**Şekil 27.** Sistem B spreysiz tarama sonuçları

Sistem D ile yapılan spreysiz çalışmada ise, genel olarak kanatçık üstünde yer yer nokta alınamayan bölgeler olsa da uç geometrisi, hücum ve firar kenarlarından az miktarda nokta alınabilmiş (bkz. Şekil 28) fakat data eksikliğinden dolayı geçişler yeterince pürüzsüz olmamıştır. Sistem B spreysiz test sonuçlarıyla karşılaştırıldığında uç geometrilerden de nokta alabildiği görülmektedir. Şekil 25'te sistem D ve sistem B spreysiz tarama sonuçları görülmektedir. Spreysiz tarama sonuçlarında Şekil 12'de gösterilen sivri uç hataları, boşluk hataları ve yüksek tepeli köşe hataları gibi hatalar bulunmaktadır.

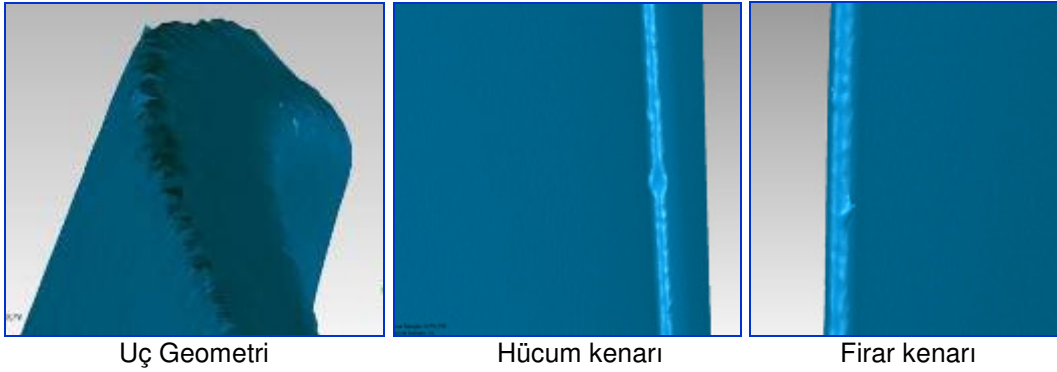
**Şekil 28.** Sistem D spreysiz tarama sonuçları

Sprey sıkılarak tarama yapılan çalışmalarda ise, alınan nokta bulutuna ağ örülmesi (ing. meshing) ile sistem B yüzeyinde Şekil 29'da görülen çeşitli kabarmalar ve dalgalı bir yüzey yapısı elde edilmiştir.

Uç geometrisine bakıldığı zaman keskin olarak nitelendirilen köşede sivri uç hataları bulunmaktadır (bkz. Şekil 30). Sprey sıkılması ile hücum ve firar kenarlarında yansımadan dolayı nokta alamama sıkıntısı olmamıştır, fakat buralarda geometri üzerinde yine dalgalanma ve yüksek tepeli köşe hataları bulunmaktadır (bkz. Şekil 30).

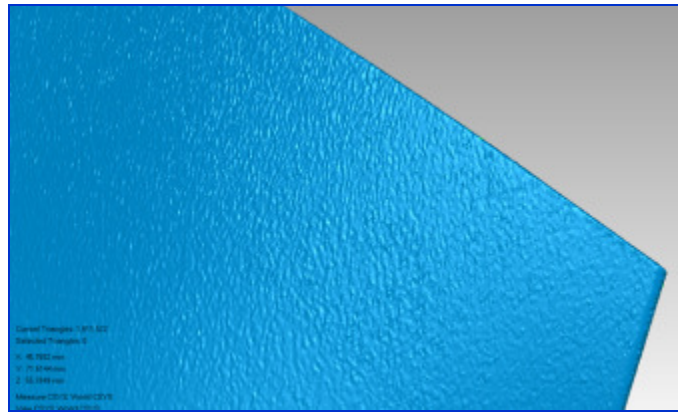


Şekil 29. Sistem B spreyli tarama sonucunda görülen yüksek tepeli köşe hatası



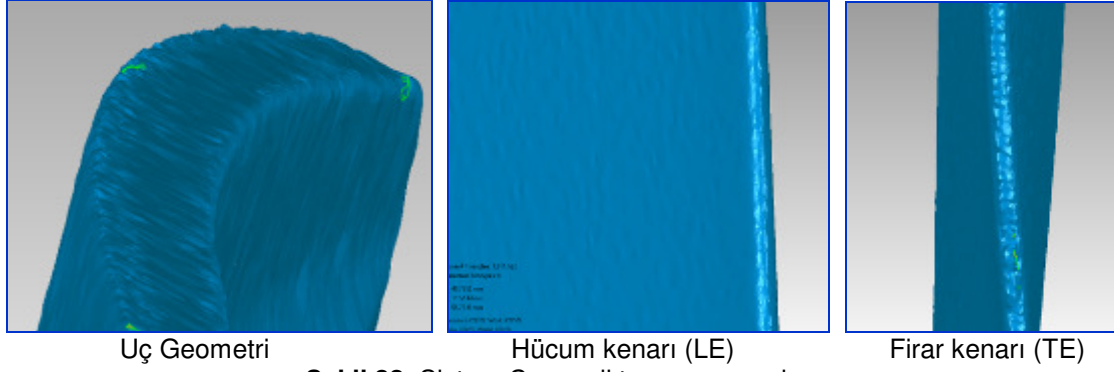
Şekil 30. Sistem B spreyli tarama sonuçları

Sistem C ile sprej sıkılarak yapılan çalışma sonuçlarında yüzey üzerinde bir dalgalanma, gerçek parçada mevcut olmayan bir pürüzlülük görülmektedir (bkz. Şekil 31). Bu görüntünün, sıkılmış sprejin uygun olmayan şekilde kullanılmış olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 31. Sistem C spreyli tarama sonucu

Şekil 32'de sistem C spreyli olarak taranan kanatçığın uç geometrisi, hücum kenarı ve firar kenarının tarama sonuçları görülmektedir. Uç geometride yeşil ile görülen boşluk hataları, yüksek tepeli köşe hataları ve yüzeyde dalgalanmalar bulunmaktadır. Hücum ve firar kenarlarında da aynı şekilde yüksek tepeli köşe hataları, yüzeyde dalgalanmalar ve boşluk hataları görülmektedir.



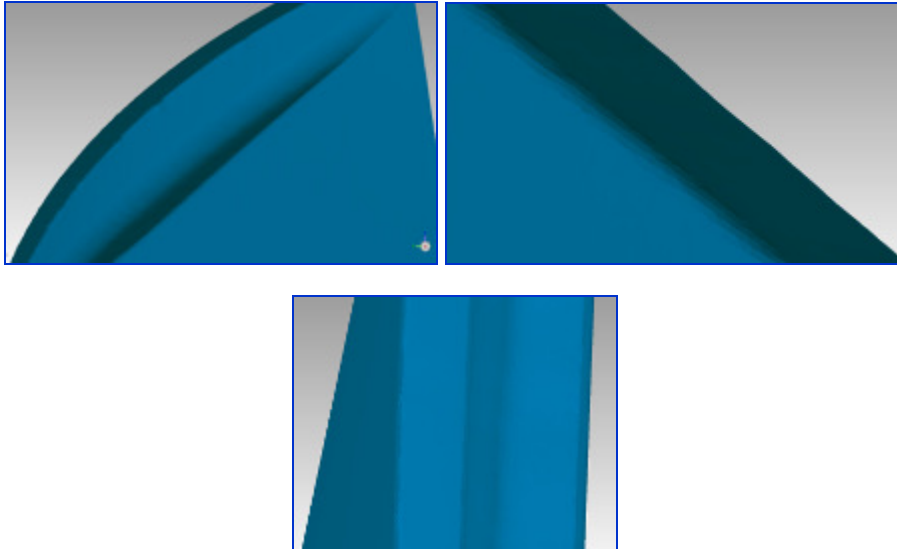
Şekil 32. Sistem C spreylili tarama sonuçları

Yüzeyde görülen dalgalanma, sıkılan spreyn kalitesine, nasıl sıkıldığına ve homojen olarak sıkılıp sıkılamadığına göre değişiklik göstermekle birlikte tarama için kullanılan cihaza da bağlıdır.

Sistem A incelendiğinde ise sprej sıkılarak taranan bir kanatçık olmasına rağmen yüzeyi oluşturan noktaların başarılı bir şekilde alındığı görülmektedir (bkz. Şekil 33). Kanatçığın hiçbir bölgesinde, yüzey dalgalanması görülmemektedir. Uç geometrisi ayrıntılı olarak Şekil 34'te gösterilmiştir. Sistem B,C ve D'de görülen boşluk hataları ve yüksek köşeli tepe hataları görülmemektedir.



Şekil 33. Sistem A ile taranan kanatçığın orta kısmından alınan tarama sonuçları

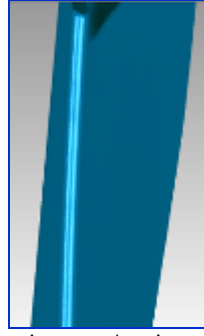


Şekil 34. Sistem A spreylili tarama sonuçları - çeşitli açılardan uç geometrisi

Sistem A hücum ve fırar kenarlarında yüksek tepeli köşe olarak adlandıramayacağımız bir görüntü bulunmaktadır (bkz. Şekil 35). Hücum ve fırar kenarında uç geometriye yaklaşıldıkça değişen kanatçık geometrisinden dolayı uç kısımlarda az miktarda olan yüksek tepeli köşe hataları görülmektedir.



Hücüm kenarı



Firar kenarı (uç kısım)

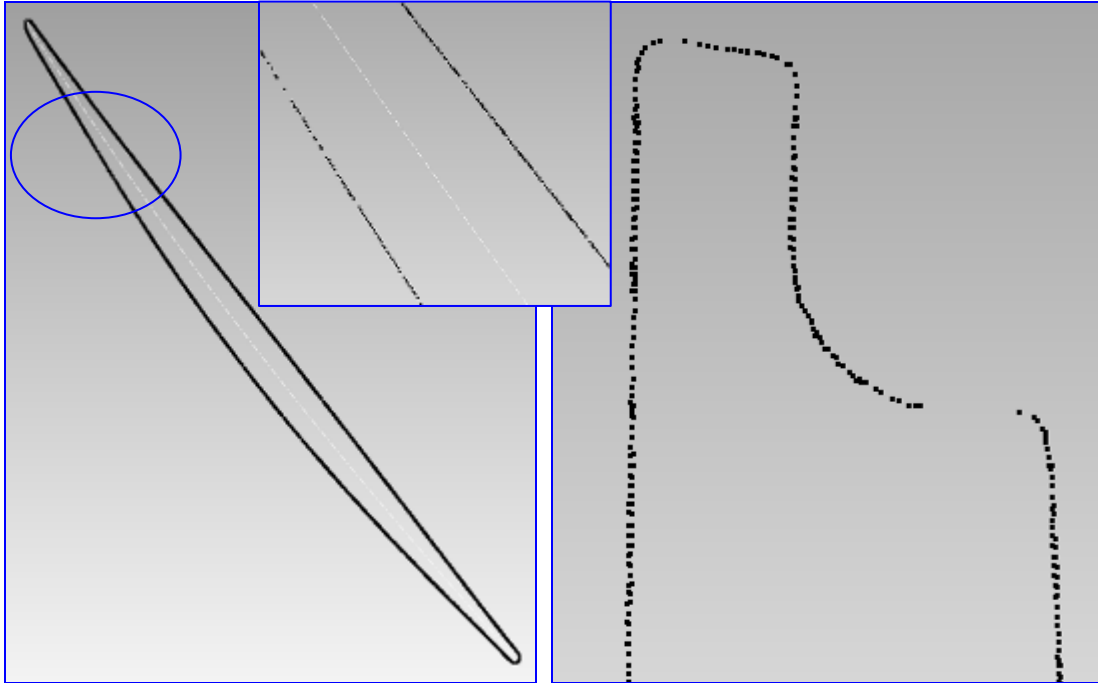


Firar kenarı (dip kısım)

Şekil 35. Sistem A spreyli tarama sonuçları - Hücüm kenarı ve farklı açılardan firar kenarı tarama sonuçları

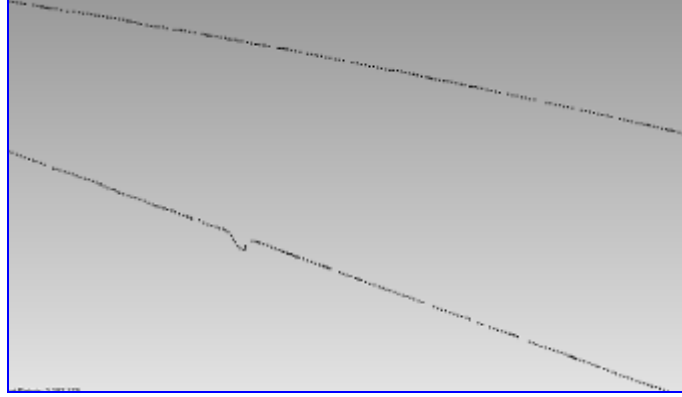
Yapısal ışık kullanan cihazlarla spreylenmeden kanatçıklar veya parlak metal yüzeyler taranamamaktadır. Cihazdan parçaya gönderilen optik ışık, parlak olan metal yüzeylerden yansımakta ve cihazın kamerası yansıyan ışığı yakalayamamaktadır. Bu nedenle spreysiz taranan parçaların bazı yüzeylerinde nokta alınamamaktadır. Kenarlarda nokta alınamamasının sebebi ise hem yukarıda bahsedilen yansıma, hem geometrinin ölçüsel değeri, hem de cihazın yakalayabileceği en küçük 2 nokta arasındaki mesafe miktarıdır. Spreyli yapılan taramalarda ise en kritik olan aşama spreylemedir. Spreyi kimin sıkıldığı, hangi spreyl malzemesinin kullanıldığı, homojen sıkılıp sıkılamadığı gibi ayrıntılar tarama sonucuna etkisi olan faktörlerdir.

Yapılan çalışmalarda kanatçık tarama sonuçları nokta bulutuna çevrilerek aynı yerlerden kesit atılmış, hücum ve firar kalınlığı için belirlenen bir mesafedeki toplam nokta sayısına bakılmıştır. Spreysiz tarama çalışmalarında hücum ve firar kenarlarından nokta alınamadığı için taramalar nokta bulutuna çevrilerek kesitleri incelenmemiştir. Şekil 36'da sistem B spreyli tarama sonucundan elde edilen nokta bulutuna atılan kesit görülmektedir. Kesit incelendiğinde tarama sırasında alınan nokta yoğunluğu görülmektedir. Uç geometride ise bazı yerlerde nokta alınamazken, üst üste birçok nokta alınmıştır.



Şekil 36. Sistem B pale kesiti ve kanatçığa dik olarak atılan kesit

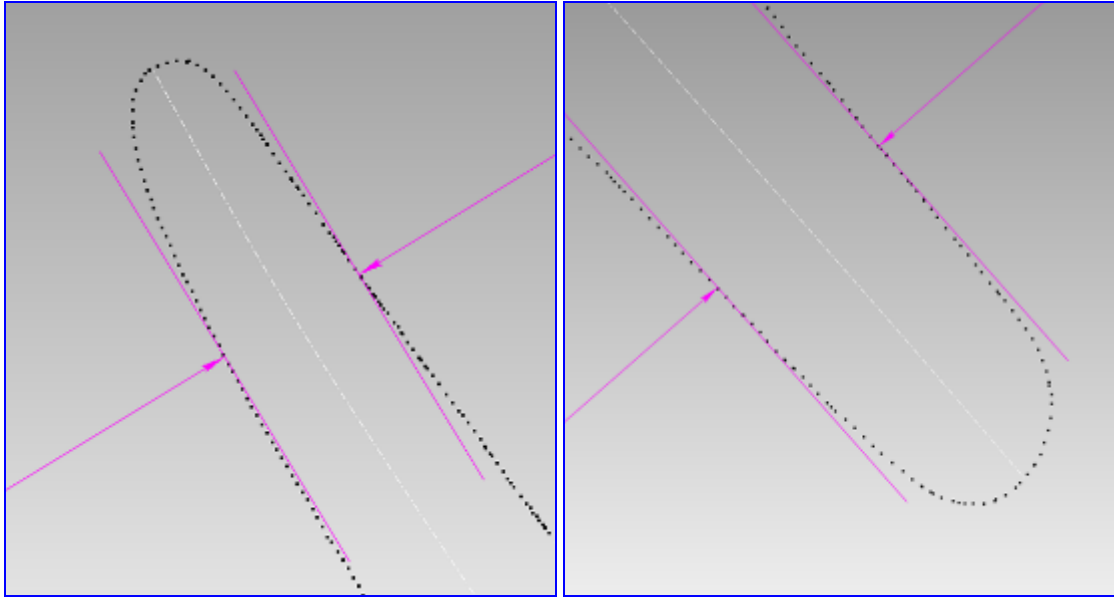
Şekil 29'da görülen yüksek tepeli köşe hatasının nokta bulutundaki kesiti Şekil 37'de görülmektedir. Kanatçığın orjinal geometrisinde bu şekilde bir bozukluk görülmediğinden ölçümdeki bu sapmanın spreylemeden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 37. Sistem B tarama datasında bulunan yüksek tepeli köşe hatasına atılan kesit

Şekil 38'de ise sistem B taraması için hücum ve firar kalınlığı için belirlenen bir mesafedeki toplam nokta sayısına bakılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere üst üste kesişen noktalar bulunmaktadır.

Kesit alınırken, kesit kalınlığı, nokta bulutunda $50\ \mu\text{m}$ olarak seçilmiştir. Değerlendirmeler için hücum ve firar kenarı kalınlıkları içerisinde kalan noktalar için $1.026\ \text{mm}$ 'lik mesafe baz alınmıştır.

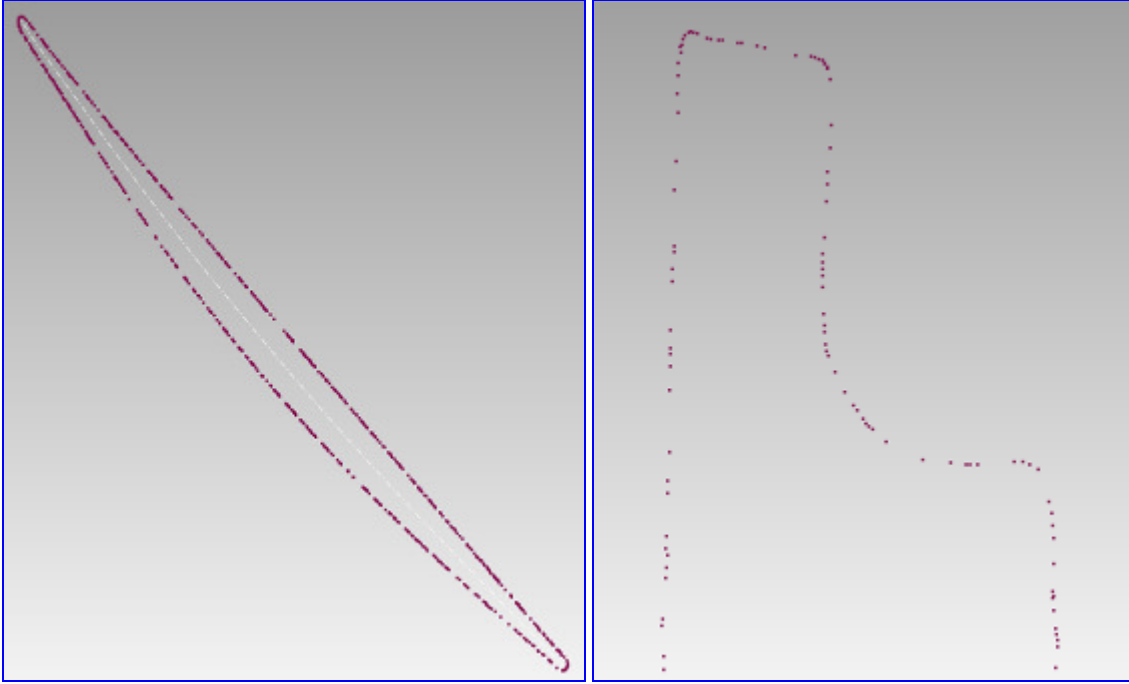


Şekil 38. Kesit alınan tarama sonuçları - sırasıyla hücum ve firar kenarları

Sistem B (spreyli) hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 68 adet

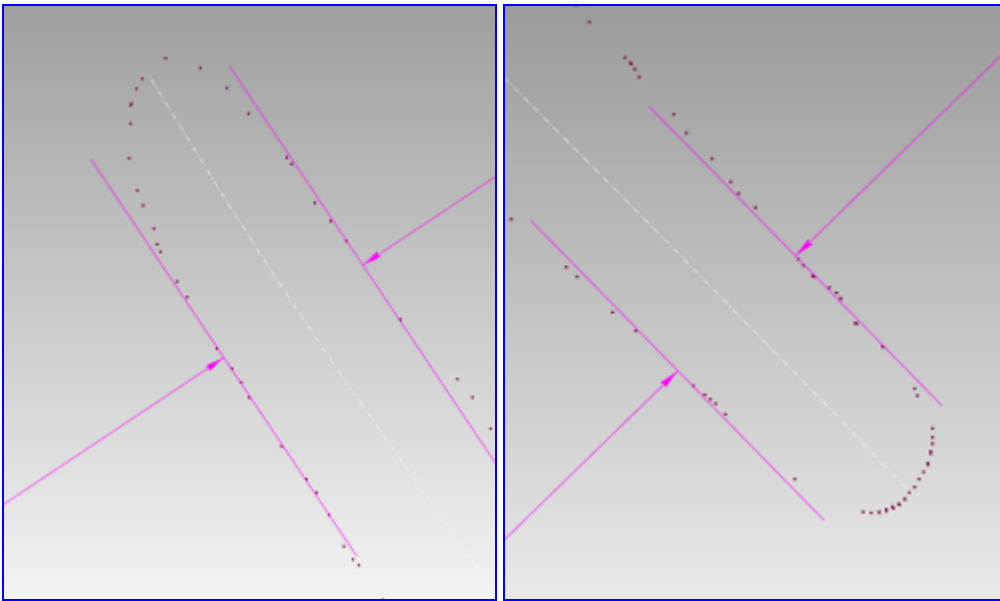
Sistem B (spreyli) firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 80 adet

Şekil 39'da sistem C spreyli tarama sonucundan elde edilen nokta bulutuna atılan kesit görülmektedir. Uç geometride ise Şekil 32'de görülen yüksek tepeli köşe hataları, nokta bulutu kesitinde de görülmektedir.



Şekil 39. Sistem C kanatçık kesiti ve kanatçığa dik olarak atılan kesit

Şekil 40'ta, sistem C nokta bulutunda hücum ve firar kalınlığı için belirlenen bir mesafedeki toplam nokta sayısı gösterilmektedir. Firar kenarındaki nokta sayısı 42 adet olmasına rağmen, üst üste nokta çakışmaları bulunmaktadır.

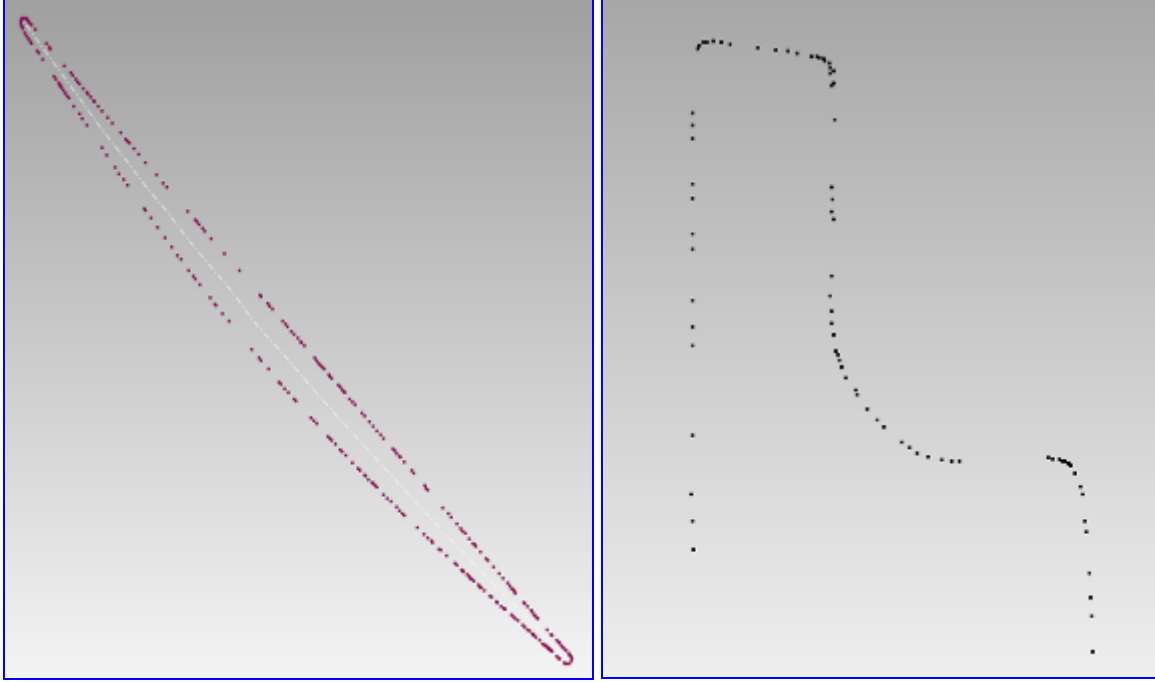


Şekil 40. Kesit alınan tarama sonuçları - sırasıyla hücum ve firar kenarları

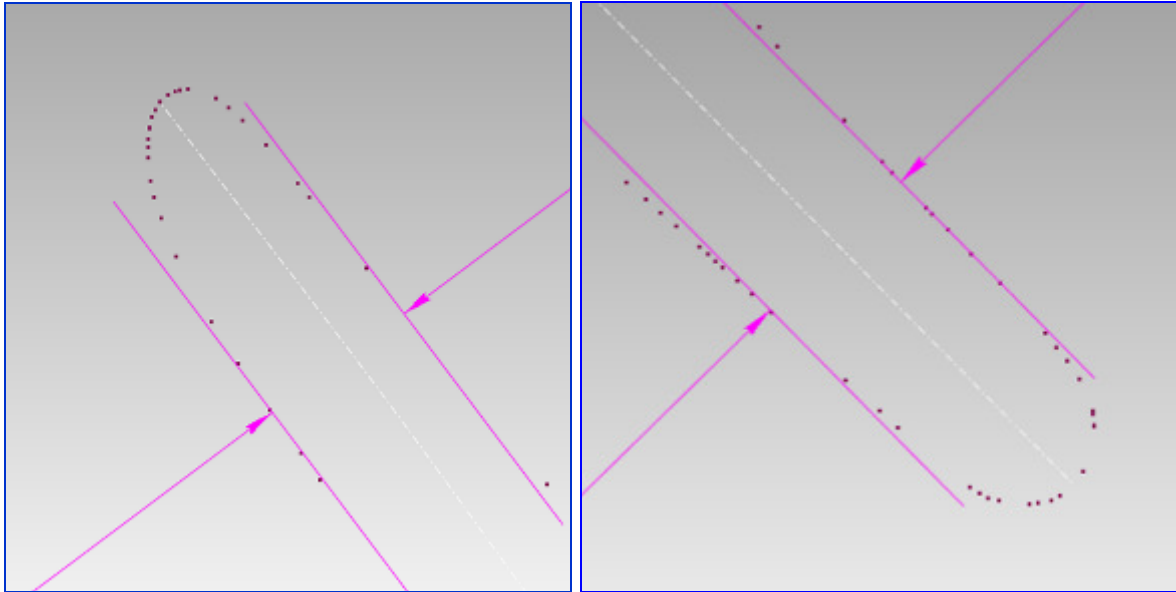
Sistem C (spreyli) hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 23 adet

Sistem C (spreyli) firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 42 adet

Şekil 41'de ise yapısal ışıkla yapılan tarama çalışmalarından son olarak sistem A spreyli tarama sonucundan elde edilen nokta bulutuna atılan kesit görülmektedir. Kesitte tarama sırasında cihaz tarafından alınan noktalar görülmektedir.



Şekil 41. Sistem A kanatçık kesiti ve kanatçığa dik olarak atılan kesit



Şekil 42. Kesit alınan tarama sonuçları - sırasıyla hücum ve firar kenarları

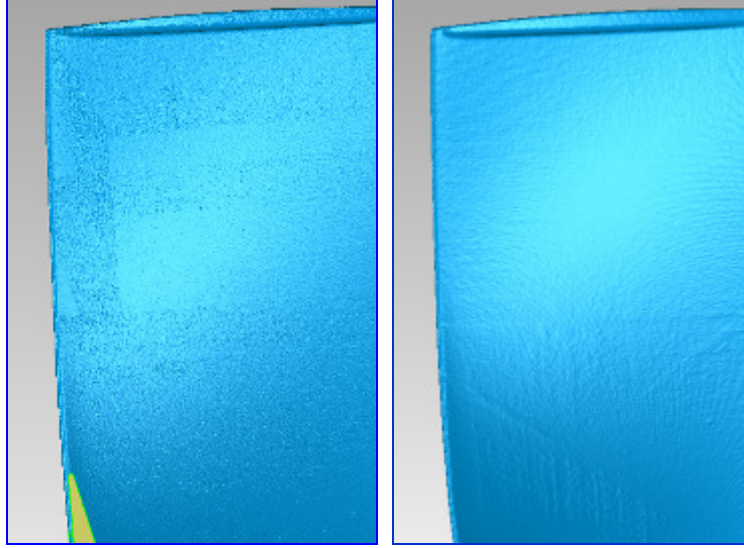
Sistem A (spreyli) hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 28 adet

Sistem A (spreyli) firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 26 adet

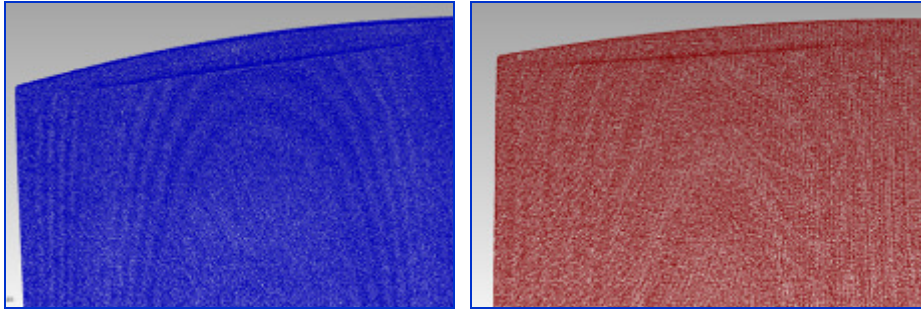
Nokta bulutuna atılan kesitler incelendiğinde ise hücum kenarı olarak belirlenen bölge içerisinde kalan nokta sayılarına göre bakıldığında sistem B cihazının diğer yapısal ışıkla tarama yapan cihazların 2 katından daha fazla nokta alabildiği görülmektedir. Sistem B sivri ve küçük radyuslu kenarlarda en fazla nokta alabilen cihazdır.

Lazer tarama cihazları ise bu çalışmada, CMM'e ayrı bir prob gibi takılarak kullanılmıştır. Ölçüm sonucunun doğruluğu sadece lazer cihazının doğruluğuna bağlı değil, kullanılan CMM'e de bağlıdır.

Yapılan çalışmalarda kanatçık üzerine spreysel sıklımadan tarama gerçekleştirilmiştir. Sistem X ve sistem Y ile yapılan taramaların genel görünüşleri Şekil 43 ve Şekil 44'teki gibidir. İki tarama sonucu elde edilen nokta bulutuna örülen ağ incelendiğinde yüzey dalgalıdır ve yüksek tepeli köşe hataları bulunmaktadır.

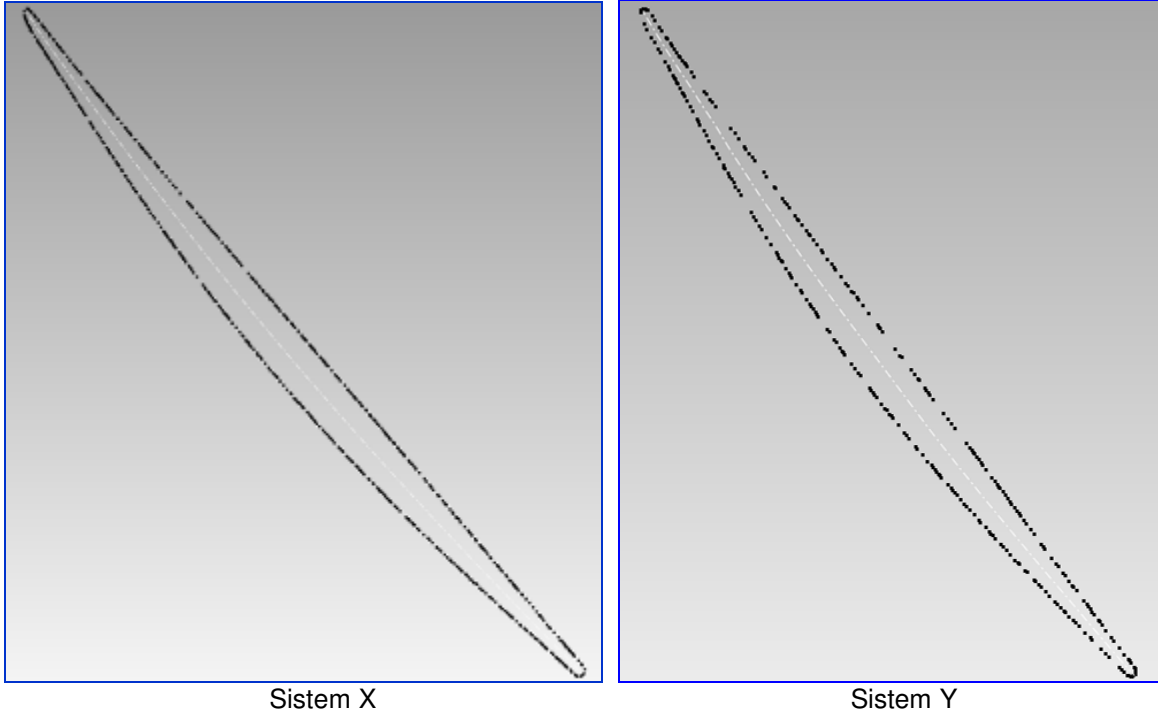


Şekil 43. Sırasıyla sistem X ve sistem Y taramalarının yüzey örülmüş hali



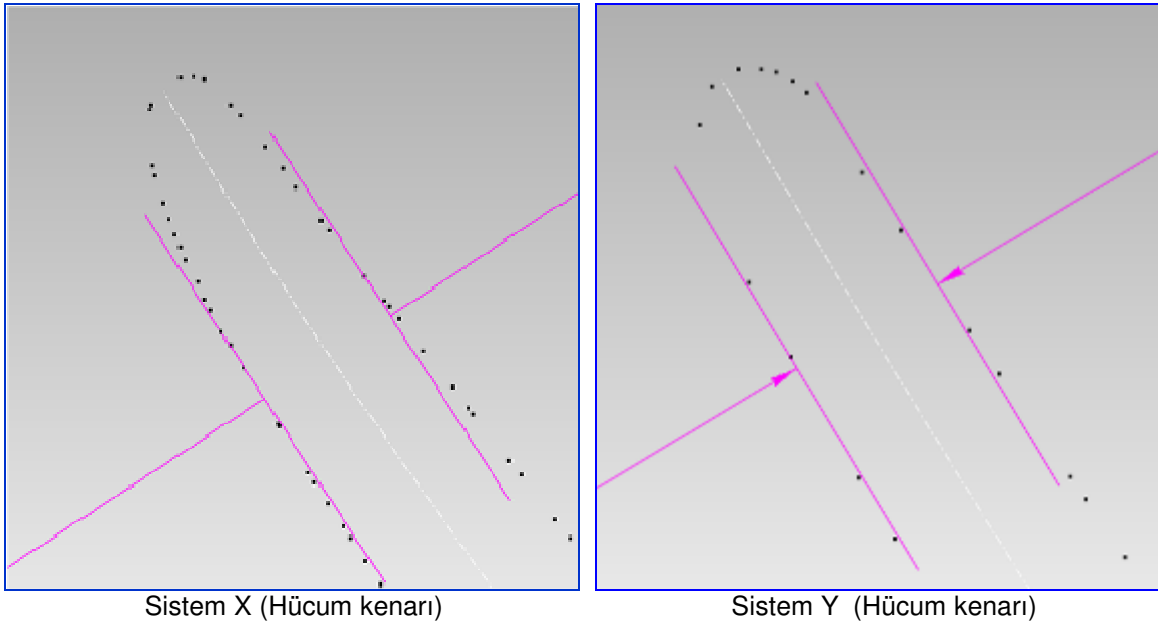
Şekil 44. Sırasıyla sistem X ve sistem Y için nokta bulutu

Şekil 45'te tarama yapılan 2 kanatçık sonucu için de aynı yerlerden kesit atılarak, hücum ve firar kalınlığı için belirlenen mesafedeki toplam nokta sayısına bakılmıştır.



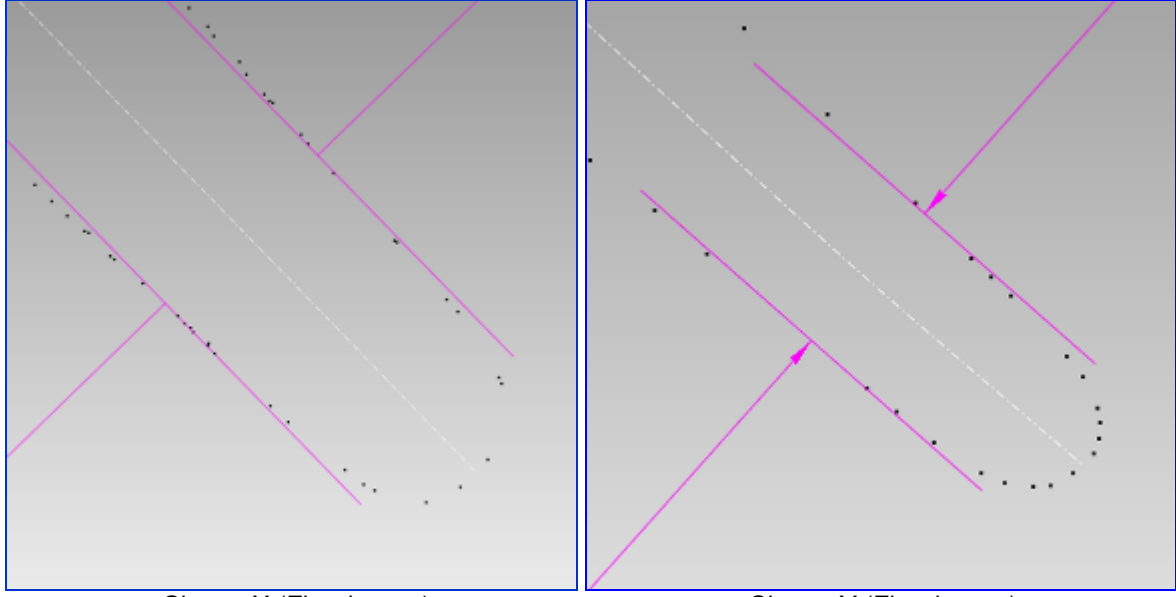
Şekil 45. Lazer tarama cihazlarıyla yapılan tarama kesitleri sistem Y kesitinde sistem X'e göre daha az nokta bulunduğu görülmektedir.

Kesit alınırken, yapısal ışıkla tarama cihazlarıyla aynı kesit kalınlığı (50 μ m) ve mesafe (1.026 mm) baz alınmıştır.



Şekil 46. Kesit alınan tarama sonuçları

Sistem X hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 26 adet
Sistem Y hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 11 adet



Sistem X (Firar kenarı)

Sistem Y (Firar kenarı)

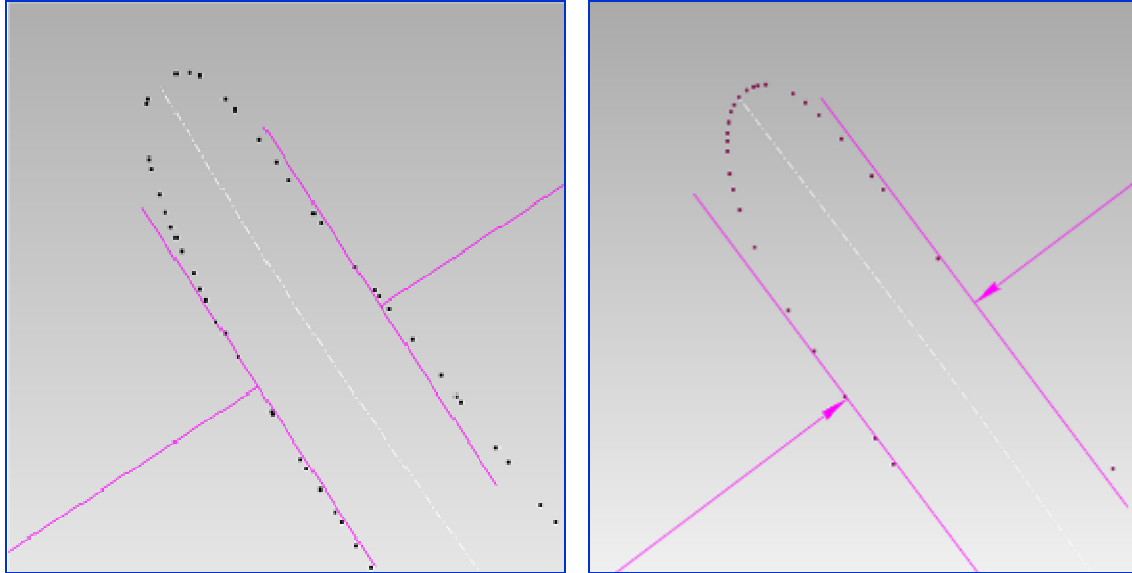
Şekil 47. Kesit alınan tarama sonuçları

Sistem X firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 22 adet

Sistem Y firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 17 adet

Belirlenen hücum ve firar kalınlık alanı içerisinde kalan nokta sayısı sistem X'de daha fazladır. Şekil 46 ve Şekil 47'den görüldüğü üzere hücum kenarı için kenar ucunda alınan nokta sayısı sistem X tarama sonucunda firar kenarından daha fazla iken, sistem Y'de daha azdır. Hücum kenarındaki geometri firar tarafındaki geometriden daha küçük ölçülere sahiptir.

Optik sistemler içerisinden yapısal ışık tarayıcısı sistem A ile lazer tarayıcı olan sistem X tarama sonuçlarının karşılaştırılması ise Şekil 48 ve Şekil 49'da gösterilmiştir.



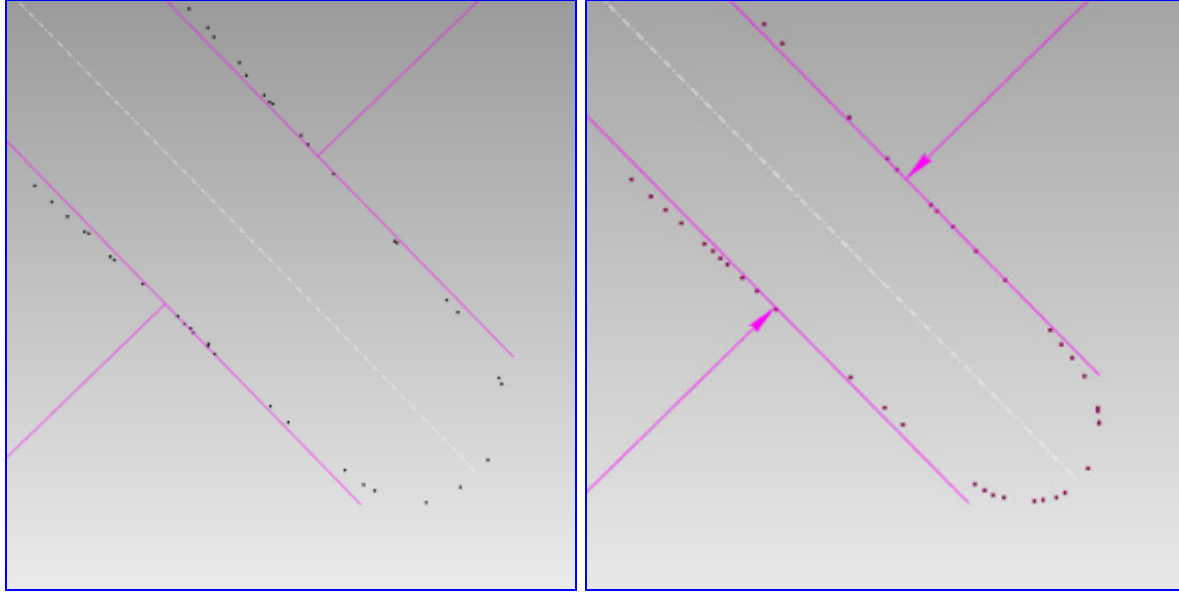
Sistem X (Hücum kenarı)

Sistem A (Hücum kenarı)

Şekil 48. Kesit alınan tarama sonuçları

Sistem X hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 26 adet

Sistem A hücum kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 28 adet



Sistem X (Firar kenarı)

Sistem A (Firar kenarı)

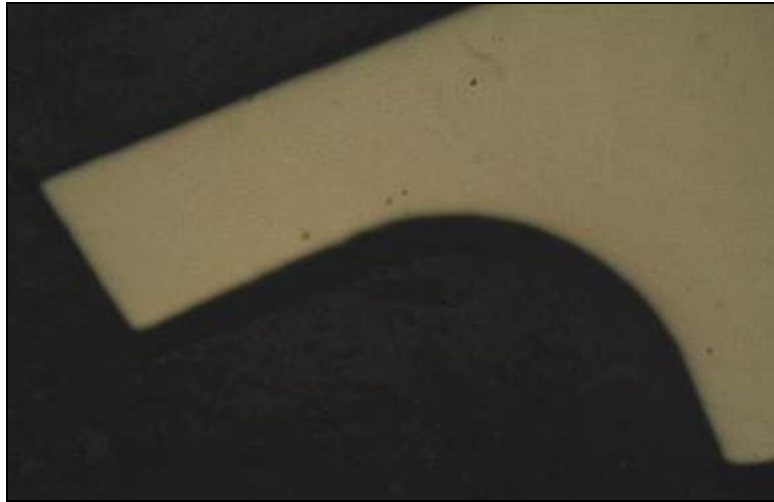
Şekil 49. Kesit alınan tarama sonuçları

Sistem X firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 22 adet

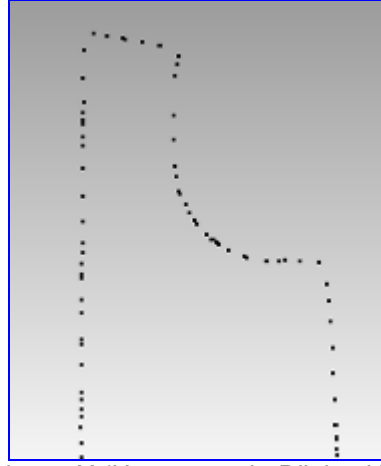
Sistem A firar kenarı kalınlığı içerisindeki nokta sayısı : 26 adet

Şekil 48 ve Şekil 49'dan sistem X ve sistem A hücum ve firar kalınlık alanı içerisinde kalan nokta sayısının yakın olduğu, fakat keskin köşelerde sistem A'nın sistem X'e göre daha çok sayıda nokta alabildiği görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir konu da sistem A'nın spreylili çalıştığı, sistem X'in ise spreysiz çalışmış olmasıdır.

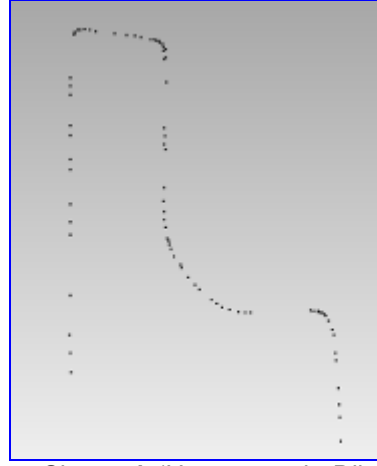
Tarama datası alınan kanatçıklardan bir tanesinin farklı bölgelerinden örnek kesitler alınmış ve metal laboratuvarında incelenmiştir. Kanatçık ucunu gösteren bölge için mikro yapı resmi Şekil 50'de verilmiştir.

**Şekil 50.** Dik kesit alınan kanatçık sonucu

Sistem A ve sistem X tarama sonuçlarına, kanatçığa dik olacak şekilde aşağıdaki gibi kesit atıldığında ise sistem A sonucunun sistem X sonucuna göre daha yuvarlak kenar hatlarına sahip olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 51).



Sistem X (Uç geometri - Dik kesit)

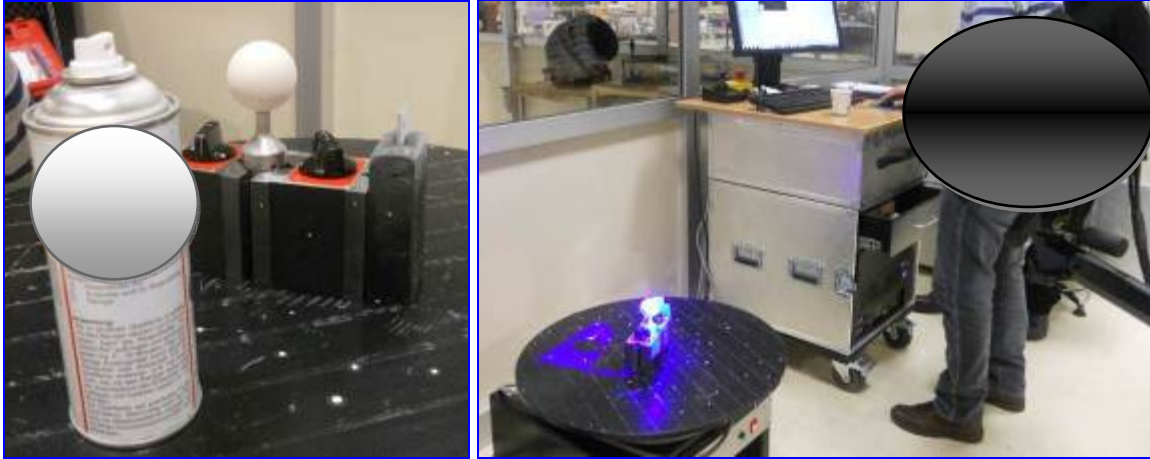


Sistem A (Uç geometri - Dik kesit)

Şekil 51. Sistem A ve sistem X cihazları tarama sonuçları

Aşağıda, optik ölçüm sistemlerinden sistem A 5 MP ve sistem X için yapılan ölçümsel sonuçlar karşılaştırılmıştır;

Sistem A 5 MP ile tekrar edilebilirlik ve ölçümsel sonucunu inceleyebilmek için kalibreli standart bir kalınlık mastarı ile kalibreli bir küre kullanılmıştır. Metal master ışığı yansıttığı ve seramik küre şeffaf bir malzemeymiş gibi davranarak ışığı yansıtmadığı için iki örneğe de sprej sıkılarak çalışma yapılmıştır (bkz. Şekil 52).

**Şekil 52.** Sistem A 5 MP ile yapılan çalışmadan örnek görüntüler**Tablo 2.** Sistem A 5 MP (spreyli) ile yapılan çalışma sonuçları

	Küre	Mastar
Nominal	Ø44.9880	2.540
Tek.1	Ø45.021	2.579
Tek.2	Ø45.020	2.578
Tek.3	Ø45.021	2.581

Tekrarlanabilirlik kontrolü için 3 tekrar yapılmıştır. Tablo 2'deki sonuçlar incelendiğinde çapta en fazla 0.001 mm'lik bir sapma, kalınlıkta ise en fazla 0.003 mm'lik bir sapma gözlenmiştir. Gerçek parça ile

karşılaştırıldığında, çapta en fazla 0.033 mm'lik sapma, kalınlıkta ise en fazla 0.041 mm'lik bir sapma görülmüştür. Sapma miktarı sistem+spreyden kaynaklanmaktadır. Sistem A kanatçık taramasında kullanılan spre, master kalınlık denemesinde kullanılan spreiden farklı bir yapıya sahiptir. Kanatçık taramasında kullanılan spre parçaya sıkıldığında parça kalınlığının ve geometrisinin en az etkilenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Kalınlık mastarı - küre ölçümsel kontrolünde kullanılan sistem A 5 MP cihazı doğruluk değeri kataloglarda 3-4 mikron olarak öngörülmektedir.

Sistem X ile yapılan küre tekrar edilebilirlik testinde yine 3 tekrar yapılmış ve firma tarafından yaptırılan mat bir küre kullanılmıştır. Bu küre ile lazer tarayıcının CMM üzerinde kalibrasyonu yapılabilmektedir. Tekrar edilebilirlik kontrolü için Tablo 3'teki sonuçlar incelendiğinde çapta 0.001 mm'den küçük olan sapmalar gözlenmiştir. Gerçek parça ile karşılaştırıldığında, çapta en fazla 0.006 mm'lik sapma görülmüştür. Bu değer katalog değerinde yazan çok problu hata değeri ile uyushmaktadır.

Tablo 3. Sistem X ile yapılan çalışma sonuçları

	Küre
Nominal	Ø30.000
Tek.1	Ø30.006
Tek.2	Ø30.006
Tek.3	Ø30.006

Optik ve dokunmatik sistemlerin kalibrasyonunda kullanılmak amacıyla farklı malzeme ve yapıda mastarlar geliştirilmektedir [26]. Sistem X lazer tarama cihazı tekrar edebilirlik kontrolünde kullanılan mat kürenin malzeme bilgisi elimizde bulunmamaktadır. TEI bünyesinde henüz optik bir sistem olmadığından dolayı sistem A 5 MP cihazı ile yapılan tekrar edebilirlik testinde ise seramik CMM mastarı ve standart master kullanılmıştır.

5. SONUÇ

Optik ölçüm sistemleri hem parçaların kalite kontrolü için hem de tersine mühendislik uygulamaları için kullanılmaktadır. Her geçen gün gelişen ve optik sistemler aracılığıyla ilerleyen tersine mühendislik çalışmalarının kalitesi, kullanılan optik sisteme göre değişiklik göstermektedir. Kullandığınız sistem ne kadar başarılıysa (keskin kenar ve köşelerden nokta alabiliyorsa, yüzey dalgalanmaları ne kadar azsa, ölçülen geometrinin dışından nokta alınmıyorsa, tekrar edebilirliği iyiye vb.) tarama sonucu üzerinden yapılan ölçümler de tersine mühendislik çalışmaları da o kadar başarılı olacaktır.

Yukarıda yapılan çalışmalardan görüldüğü üzere yapısal ışık kullanan cihazlar, kanatçık ucu gibi keskin geometrilerde ve parlak yüzeylerde lazerli cihazlara göre daha iyi nokta alma kabiliyetine sahiptir. Taramada kullanılan lazerin avantajı herhangi bir spreyleme işlemi olmadan ölçüm yapabilmesidir. Dezavantajı ise küçük radyuslu olan geometrilerde, ince kenarlarda ve sivri köşelerde yeteri kadar nokta alamamasıdır.

Optik ölçüm sistemlerinden yapısal ışık kullanan cihazların kabiliyeti parlak metal yüzeyler üzerindeki spreysiz uygulamalar için sınırlıdır. Spreyleme sistemleri otomatikleştirilerek kişiden bağımsız hale getirilebilir. Böylece spreylemeden kaynaklanan kalınlık hatası standartlaştırılarak, spreiden kaynaklanan hata ölçüm sonucuna etki olarak yansıtılabilir.

Bu çalışma kapsamında incelenen sistemlerden yapısal ışıkla tarama yapan cihazlar ile blisk gibi erişilmesi zor olan geometriler ölçülebilirken CMM üzerinde kullanılan lazer cihazları ile bu işlem mümkün görülmemektedir.

Yapılan bu çalışma ve karşılaştırmalar sonucunda, farklı optik ölçüm sistemlerinin performansını etkileyen parametreler ile ilgili bilgi edinilmiş olup, bu temeller üzerine daha net kriterler belirlenerek mevcut sistemlerin test ve karşılaştırması için çalışmaların devam etmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] COYNE, B., "Blisk and Integrated Measurement", Quality Manufacturing Today Dergisi, Eylül 2008, http://www.qmtmag.com/display_eds.cfm?edno=7274846.
- [2] LIN, Y.P., "Geometrically adaptive milling of fan blade assembly weld fillets", M.A.Sc. Thesis, McMaster University, Canada, 2012.
- [3] ALİ, N.S., "Reverse Engineering of Automotive Parts Applying Laser Scanning and Structured Light Techniques", M.A.Sc. Thesis, The University of Tennessee, Knoxville, USA, 2005.
- [4] www.3dcgi.com
- [5] <http://www.profexdca.sk/slu%C5%BEby/geometria-strojov/?lang=en>
- [6] GARCIA, D., ORTEU, J.-J., "3D Deformation Measurement Using Stereo-Correlation Applied to Experimental Mechanics", The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19-22 Marr, Orange, Kaliforniya, ABD, 2001.
- [7] MONGON, B., PFEIFER, J., KLAAS, E., "What light color should a white light scanner use?", 2012 CMSC Teknik Sunuşlar, 16-20 Haziran, New Orleans, Louisiana, ABD, 2012.
- [8] www.scanare3d.com
- [9] <http://www.qualitydigest.com/inside/metrology-news/steinbichler-optotechnik-introduces-3d-touch-probe-t-point-cs.html>
- [10] GENG, J., "Structured light 3D surface imaging", Advances in Optics and Photonics 3, pp.128-160, 2011.
- [11] EREN, G., AUBRETON, O., MERIAUDAU, F., SECADES, L.A.S., FOFI, D., NASKALI, T., TRUCHETET, F., ERCIL, A., "A 3D scanner for transparent glass", ICIAP 2009, LNCS 5716, pp.519-527, 2009.
- [12] BRAJLIH, T., TASIC, T., DRSTVENSEK, I., VALENTAN, B., HADZISTEVIC, M., POGACAR, V., BALIC, J., ACKO, B., "Possibilities of Using Three-dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspetcion", Journal of Mechanical Engineering 57, 11, pp. 826-833, 2011.
- [13] RHOADES, C.W., "Characterization of the accuracy in a reverse engineering process employing white light scanned data to develop constraint-based three dimensional computer models", M.Sc. Thesis, Western California University, 2011.
- [14] <http://machinedesign.com/archive/how-hybrid-modeling-improves-reverse-engineering>
- [15] GATTON, G.L., "Modern Manufacturing with Measure", CMSC Teknik Sunuşlar, Montreal, Kanada, 2011.
- [16] Hardware Review from www.innovmetric.com
- [17] www.nikonmetrology.com/
- [18] BRADSHAW, G., "Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques", Trinity College Dublin, Department of Computer Science, TCD-CS, 1999, pp26.
- [19] ORCHARD, N., "Form Measurement for aero engine components – contact or non-contact?", National Freeform Centre Launch, 2009.
- [20] GASSER, A., WITZEL, J., GOEBEL, M., BACKES, G., KITTEL, J., PIRSCH, N., MANN, ST., WISSENBAACH, K., KELBASSA, I., "Additive Manufacturing in Turbo-engine Applications", ICTM Conference, Aachen, Almanya, Şubat 2013.
- [21] <http://www.brooksmachinery.com/pdfs/Siemens%20Testimonial.pdf>
- [22] <http://www.gom.com/?id=411>
- [23] White Light Scannig for Turbine Blades, 2010 at <http://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/white-light-scanning-turbine-blades.html>
- [24] TOMBERS, A., "Einsatz der optischen 3D-Messtechnik in der Fertigung von Triebwerksbauteilen – Potenzialabschaetzung zur Pruefzeitreduktion", Universitaet Paderborn, Thesis, 2006.
- [25] STEINHARDT, E., "Future AeroEngines – Impact on Design and Production Technology", ICTM Conference, Aachen, Almanya, Şubat 2013.
- [26] KEFERSTEIN, C.P., MARXER, M., GOTTI, R., THALMANN, R., JORDI, T., ANDRAS, M., BECKER, J., "Universal high precision reference spheres for multisensor coordinate measuring machines", CIRP Annals, Hong Kong, Ağustos 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Evren YASA

1980 İstanbul doğumludur. 2002 yılında İTÜ Makina Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra, Kanada'da British Columbia Üniversitesi'nde takım tezgahlarının volumetrik hatalarının modellenmesi ölçülmesi ve kompanze edilmesi konusunda uygulamalı bilimler masterını tamamlamıştır. Ardında kısa bir süre, Sabancı Üniversitesi'nde Prof. Dr. Erhan Budak'la, broş prosesi ve ince cidarlı parçaların tornalanması konusunda araştırma mühendisi olarak çalışmıştır. 2011 yılında ise, Belçika'da Katolik Leuven Üniversitesi'nde Prof. Jean-Pierre Kruth ile eklemeli imalat teknolojileri konusunda doktorasını tamamlamış, 2012 yılına kadar doktora sonrası araştırma görevlisi olarak aynı laboratuvarında lab ve proje koordinatörü olarak görev yapmıştır. 2012 Şubat ayından bu yana Tusaş Motor Sanayii'de Teknoloji Geliştirme Müdürlüğü'nde Tamir Geliştirme Disiplin Uzmanı olarak çalışmaktadır.

Soner ÖREN

Soner Ören, 2012 yılında ODTÜ Elektrik- Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra yine aynı yıl içerisinde TEİ'de göreve başlamıştır. Teknoloji geliştirme mühendisi olarak başladığı görevini halen sürdürmektedir.

Ezgi UĞUR

Ezgi Uğur, 2011 yılında İTÜ Makina Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra aynı yıl içerisinde TEİ'de Teknoloji Geliştirme Mühendisi olarak göreve başlamıştır. Teknoloji Geliştirme mühendisi olarak başladığı görevini halen sürdürmektedir.

Özgür POYRAZ

Özgür Poyraz, lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde ve yüksek lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Malzemeleri ve İmalat Teknolojisi ABD'de tamamlamıştır. Farklı kurumlarda toplam 4 yıl tasarım, imalat ve CAD/CAM konuları üzerine çalışmıştır. 2010 yılında TEİ'de göreve başlamış ve halen Kıdemli Teknoloji Geliştirme Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.

Güray AKBULUT

Güray Akbulut, lisans eğitimini 1999-2004 yılları arasında ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. 2005 yılında TEİ'de göreve başlamış olup, 3 yıl kalite mühendisi ve 2 yıl teknoloji geliştirme mühendisi olarak görev yapmıştır. 2011 yılından itibaren Teknoloji Geliştirme Lideri olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

Semih PİLATİN

Semih Pilatin, 1995 yılında ODTÜ Makina Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra aynı bölümde Yüksek Lisans eğitimine başlamış ve Üniversite-Sanayi işbirliği çerçevesinde belirlenen ortak bir konuda TEİ'de çalışırken Yüksek Lisans eğitimini tamamlamıştır. Askerlik görevinin tamamlanması ardından 1999 yılında TEİ'de tekrar göreve başlamış, sırasıyla Proses Mühendisi, Black Belt, Tasarım Mühendisi, ve Türkiye Teknoloji Merkezi Liderliği görevlerinde bulunmuş ve 2010 yılında Sabancı Üniversitesi'nde Executive MBA programını tamamlamıştır. 2009 yılından itibaren ise TEİ'de Teknoloji Geliştirme Müdürü olarak görev almaktadır.