

MODERN İMALAT SİSTEMLERİNDE ÖLÇME, MUAYENE VE TEST EKİPMANLARININ KONTROLÜ – KOORDİNAT ÖLÇME CİHAZLARININ KALİBRASYONU

M. Numan DURAKBAŞA¹, Anıl AKDOĞAN²

¹Technische Universitaet Wien, Austauschbau und Messtechnik, A 1040 Wien ÖSTERREICH

Tel: +43 1 58801 31142 E-Mail: durakbasa@mail.ift.tuwien.ac.at

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Mak. Fak., Mak. Müh. Bölümü., Makine Malzemesi ve

İmalat Teknolojisi Anabilim Dalı İSTANBUL

Tel: 212 2597070 / 2604 E-Mail: nomak@yildiz.edu.tr

ÖZET

Ölçme ve görüntüleme cihazlarının periyodik kalibrasyonları ve doğrulanması, modern endüstriyel imalatta ürünlerin kalitesi için gerekli ve önemlidir. Ölçme hiyerarşisi sistemi ve buna ilaveten Kalite Yönetim Sistemleri alanındaki uluslararası standart ISO 9000:2000 ailesi, kullanılan ölçme cihazları için ayrıntılı bir kontrol ve doğrulama sistemi kurmayı talep etmektedir. Ölçme ve görüntüleme cihazları ölçme kapasitesinin ölçme talepleriyle tutarlılığını sağlamak için kullanılabilir ve test edilebilir. Koordinat metrolojisi modern imalat mühendisliğinde giderek artan bir öneme sahiptir. Koordinat Ölçme Cihazı (CMM) kullanıcısı için CMM'in tamlığına olan güven, pratik ölçme işlemlerinin temelini oluşturur. Paralel etalonlarla (gauge block), adım etalonları (step gauge), ölçme halkaları ve kalibre edilmiş diskler, universal test aletleri (artefact), CMM'lerin ölçme hatalarını periyodik olarak muayene etme, bulma ve doğrulama faaliyetleri için kullanılmaktadır. CMM'lerin testleri ile ilgili temeller, ISO TC 213 komitesi tarafından hazırlanan Geometrik Ürün Spesifikasyonu ve Verifikasyonu uluslararası standartlarında verilmiştir (4,5,6,15).

Anahtar Kelimeler: Koordinat Ölçme Tekniği, Kalibrasyon, Doğrulama, Geometrik Ürün Spesifikasyonu ve Verifikasyonu,

1. GİRİŞ

Modern üretim tekniğinde, ölçme cihazları üretim prosesi ile doğrudan ilişki halindedir. Bu nedenle de muayene, ölçme ve deney teçhizatı dolaylı veya dolaysız yoldan kaliteyi etkiler. Bunun neticesi olarak, kontrol sistemi, gittikçe artan bir oranda kalite güvenliği tedbiri anlamına gelmekte ve büyük önem kazanmaktadır. Ölçme teknolojisi ve özellikle imalat ölçme teknolojisindeki sürekli artan gelişmeler bugün açıkça gözlenebilmektedir. Proses ve ürünle ilgili temelleri oluşturan ölçme teknolojisi, ISO 9000:2000 uluslararası kalite yönetimi standartlarının taleplerini de karşılamaktadır. Süreçlerin ve üretim aşamalarının optimal bir şekilde kontrol edilmesi, mevcut pazar koşulları altında;

- müşteri odaklı kalitenin artması,
- verimliliğin ve güvenilirliğin artması,
- hammaddeler ve onlar kadar gücün ekonomik tüketimi,
- çevre koruma ve çevreye özen gösterme

gibi temel faktörlere dayanan modern otomasyon teknikleri ile cihaz ve tesislerin mükemmel işletilmeleriyle mümkün olmaktadır.

Buna ilaveten uluslararası rekabet ortamında, marketin ihtiyaçlarını tam olarak karşılamak amacıyla, simültane olarak ürün yaşamını azaltmayı işaret eden, ürün çeşitliliğinde bir artışa gidilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Genellikle, teknik olarak bilimsel kuralların meşruluğu, yalnızca, tecrübelerden çıkan ölçme sonuçlarının dezavantajlar için bir uyumsuzluk göstermediği durumlarda kabul edilebilir olmaktadır.

Direkt olarak ölçme teknolojileri ve ölçme cihazlarından elde edilen satışlar, dünya çapında 100 milyar Euro'dan başlamaktadır. Bu alanla ilgili araştırmalar, genel olarak, modern dünya ekonomisi ve insan toplumu için temel bir kuruluş gereksinimidir. İleri teknoloji ürünleri, nano mertebesinde ölçme çözünürlüklerinde ve diğer fiziksel büyüklükler için yüksek hassasiyet gerektirmektedirler.

2. KOORDİNAT ÖLÇME TEKNİĞİNİN ÜRÜN VE SÜREÇ KALİTESİNE ETKİSİ

Koordinat ölçme cihazları, modern imalat mühendisliğinde sürekli artan bir öneme sahiptirler. Bu ölçme cihazları sayesinde herhangi bir kompleks geometrik şekle sahip olan iş parçasını hassas, esnek, çabuk ve objektif olarak ölçmek mümkün olmaktadır. 1970'lerin başlarında koordinat ölçme cihazları için daha yüksek standartlar geliştirilmiştir. Bu tür cihazların akıllı imalat sistemlerine ilave edilmesi, günümüzde ancak modern imalat takımlarıyla üretilebilen karmaşık geometriye sahip iş parçalarının otomatize edilmiş imalatına olanak tanımıştır. Bir CMM kullanıcısı için CMM'in tamlığına olan güven, pratik ölçme işlemlerinin temelini oluşturur. CMM'lerin doğrulanma temelleri ve farklı doğrulama metodları, Geometrik Ürün Spesifikasyonu (GPS) - CMM'ler için Kabul ve yeniden doğrulama testleri standartlarında verilmiştir. (ISO/TC 213 WG 10). Modern imalat sistemleri için, ISO 9000 standartları tarafından verilen kalite yönetim sistemleri alanındaki doğrulama sistemleri ifadesi ile CMM'lerin endüstriyel uygulama çalışmaları arasındaki bağlantıyı kurmak önemlidir (4,5,6). Kalite güvenliği için aşağıdaki durumlarda kullanılacak olan ölçme cihazlarının kalitesi ve cinsi büyük önem teşkil etmektedir;

- ürün tasarlama ve geliştirme,
- proses planlama ve geliştirme,
- üretim ve ürün sonuçları,
- doğrulama ve/veya muayene
- montaj ve operasyona alma
- teknik destek ve bakım

Bu liste her fiziksel ürünün yaşam-devri boyunca geçirdiği bazı temel adımları içermektedir. Kalite yönetimi elbette ölçme teknolojilerinden çok daha geniş kapsamlıdır, bununla beraber ölçme teknolojileri olmadan fiziksel ürünlerin kalite korumasının mümkün olmadığı da bilinmektedir. Modern ölçme tekniği, farklı ürünlerin üretimi ile ilgili olan her kalite yönetim sisteminin ana bir parçası ve temel bir direğidir.

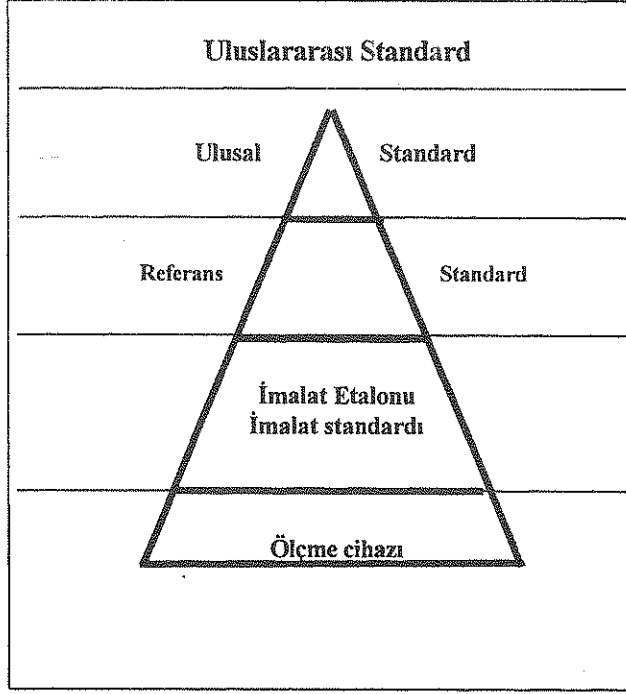
Modern ölçme tekniğinin gereği, üretim süreçlerinin enine boyuna denetlenmesi, kontrol edilmesi, sıraya dizilmesi ve üstelik kurallara bağlanması mümkün olmaktadır. Ölçme sonuçları, üretim prosesi ve ürün kalitesi ile ilgili bilgileri kapsamaktadır. Bilgiler rasgele örnekleme veya %100 muayene düzenlerine bağlı olarak elde edilebilir. Kontrol edilen değişkenler, imalat proseslerini optimize etmek ve üretim kalitelerini iyileştirmek adına, üretim teçhizatlarının hazırlanma-parametrelerinde modifikasyon ve prosesle bağlantı için gerekli bilgilerden türetilirler.

Modern üretim için ölçme teknolojisinin temel karakteristiği, makine ve iş parçalarından elde edilen ölçme ve test sonuçları ile ölçme-algılama bilgilerinin düzeltici veri olarak tekrar üretim sürecine aktarılması imkanına sahip olmasıdır. Böylelikle oluşan kalite kontrol devrelerinin farklı fonksiyonları vardır. Düzeltme ve uyarlanabilir kontrol; özel uygulamalara bağlı fonksiyonel taleplerle modifiye edilebilen, kapalı çevrim bir kontrol sistemi sağlar. Bir iş parçasına yönelik olarak küçük kapalı çevrim kontrol devresi, işlevini gören işleme tezgahı ile ölçme ekipmanı arasında, tasarımda belirlenen özelliklerin öngörülen tolerans sınırları içerisinde kalmasını sağlamak üzere kontrol fonksiyonlarını kapsar.

Büyük kalite çevrimleri yüksek kalite bilgisini, ürünün yüksek kalite durumunu ve prosesin kalite yeterliliğini göz önüne alarak, planlama alanına geri döndürebilir. Bilginin değerlendirilmesi, kısa bir zaman aralığında, makina, takım ve parçalar hakkındaki yeni imalat eğilimlerini belirlemek için kullanılmaktadır.

3. METROLOJİNİN HİYERARŞİK YAPISI VE ÖLÇME CİHAZLARININ KONTROLU

İmalatın akışıyla ilgili olan muayene, test ve ölçme cihazlarının, sürekli kullanımda yüksek aşınmaya eğilimli olmalarından dolayı, kesinlikle, tüm imalat akışı için yetecek, yaygın bir iş-görme kapasitesine sahip olmaları gerekmektedir(7). Bunun sonucu olarak, ölçme cihazlarının düzenli muayenesi, kontrolü ve dokümantasyon proseslerinin sistem bünyesinde implementasyonu talep edilir. Böylelikle bu cihazlar, ölçme aletleri ve ölçme standartlarının uluslararası tanınan ölçme hiyerarşisi içindeki pozisyonlarını muhafaza ederler.



Şekil 1. Ölçme cihazları ve ölçme standartlarının hiyerarşisi

Muayene, test ve ölçme cihazlarının yönetimi, ölçme cihazlarının herhangi bir zamanda fonksiyonunu yerine getirmesini sağlamalıdır. Buna ilaveten, talep edilen gereksinimleri karşılama veya bakım ve tamir anlamında kullanılan ölçme ve test ekipmanlarının operasyonel hassasiyetleri imalat ekipmanlarının yönetimi tarafından sağlanmalıdır (8). Günümüzde tedarikçiler tarafından ölçme ekipmanlarının yönetimi ile ilgili hazır sistemler üretilmiştir. Birçok kuruluş, özellikle otomobil, elektronik ve çelik endüstrisi, tedarikçilerinden muayene, test ve ölçme cihazları için bir yönetim sistemi talep etmektedirler.

Muayene, test ve ölçme ekipmanları;

- belirlenmiş aralıklarla ya da kullanım öncesi, izlenebilir uluslararası ölçme standardı veya ulusal ölçme standardına göre doğrulanmalı veya kalibre edilmeli,
- ihtiyaç oldukça tekrar tekrar ayarlanmalı,
- belirlenen kalibrasyon durumunu olanaklı kılmak için tanımlanmış olmalıdırlar.

Önceki ölçme sonuçlarının geçerliliği, cihaz taleplere uygunsuz bulunursa, değerlendirilmeli ve kaydedilmelidir. Organizasyon cihaz ve durumdan etkilenen herhangi bir ürün üzerinde gerekli müdahaleyi yapmalıdır. Kalibrasyon ve doğrulama sonuçlarının kayıtları korunmalıdır.

Ölçme ekipmanının yönetim sistemi için temel talep, konu ile ilgili ürün kalitesinin kaydının, ilave edilen ölçme ekipmanı yatırımında, tamamlanmasıdır. Bu durum muayene, test ve ölçme cihazlarını etiketlemeyi gerektirmektedir ki bu durum net bir tanımlamayı garanti etmektedir. Ölçme ekipmanlarının bilgisayar destekli kontrol sistemleri, her ölçme ekipmanı için temel veriler olarak şu bilgileri kapsamaktadır;

- kimlik verisi (grup numarası, unvan, üretici, kullanım bölgesi)
- tanımlama verisi (ölçme ünitesi, ölçme hızı, çözünürlük)
- durum verisi (test ekipmanının durumu)
- test görüntüleme (test standardı, son/yakın test, test etme aralığı, test etme faktörü) ve bilgi sağlayıcı veri (sıcaklık oranı, aksesuarlar, bakım maliyetleri, satın alma tarihi ve maliyeti)

Muayene, test ve ölçme cihazlarının kontrol sistemi implementasyonunda ilk adım olarak, farklı grup ölçme ve test ekipmanları için kontrol planları hazırlanır. Belirli grup ölçme ekipmanları için kontrol planları ilgili grup numarası altına yerleştirilir, böylece tüm ölçme ekipmanları tanımlanması gerçekleştirilmiş olur.

4. ESNEK KALİBRASYON ARALIKLARININ BELİRLENMESİ

Ölçme tekniğinin otomasyonu özellikle, üretici gücün temel bakış açısı altında, esnekliğin önemli bir sınır durum olarak kabul edilmesi gerekliliğidir. Bilgisayar destekli ve akıllı imalat sistemleri içindeki endüstriyel çevrelerde, ölçme tekniği değişen görevlere adaptasyonda esnekliğe ayarlanmalıdır. Tüm ölçme ve test cihazları, belirlenen mesafelerde, kullanım alanına göre incelenmelidir. Uygulamalar,

- stabilite,
 - belirlenen amaç ve muayene,
 - test ve ölçme ekipmanlarının kullanım sıklığı
- açılardan belirlenmelidir.

Yasal talimatlar, (kurulum yasası gibi) doğrulama ve kalibrasyon aralıklarını belirleyebilir. Önceki kalibrasyon sonuçlarının temellerinde, aralıklar eğer gerekiyorsa, hassasiyeti devamlı surette korumak amacıyla kısaltılabilmektedir. Aynı zamanda, açıkça ortaya çıkan kalibrasyon sonuçlarında aralık uzatılabilir ve güvenli hassasiyetteki bu ölçüm ölçme ve test cihazını yıpratmamaktadır (7).

“Optimal Aralık”, toplam maliyetlerin minimum olduğu durumdur. Eğer aralık çok küçük seçilirse, kontrol maliyetleri, eşit periyotta gereğinden çok kontrol yapılacağından, çok artmaktadır. Aralık çok geniş seçilirse, ölçme ve test ekipmanını bir sonraki kontrolde “kabul edilemez” durumda bulma ihtimali çok yükselmektedir. Diğer bir anlatımla, bu durum uzun zaman kabul edilemez bir ölçme cihazıyla çalışmak anlamına gelir ve bu durumda sevki edilen ürünlerde kaliteyi düşürmektedir. Düşük kalite daima maliyetlerde bir yükselme durumuyla birleşmektedir. Optimal aralığın boyutu; kullanım sıklığı, kullanım modu, aşınma davranışı, zaman aşımı sonuçları, izin verilen tolerans aralığı, kullanıcı sayısı, kalibrasyon zincirindeki durumu vb. bir çok farklı faktöre bağlıdır. Bu faktörler zamanla sabit kalmadığından, optimal aralıkta sabit zamanlı olamamaktadır (10).

5. ÖLÇME BELİRSİZLİĞİNİN TAYİNİ

Bugün birçok ürün, iş-paylaşım prosesleri bileşenlerinin, küresel imalat montaj bantlarından tek seferde toplanmaktadır. Bu ancak dünya çapında aynı ölçüm ve kalibrasyon kurallarının, bununla birlikte ölçme belirsizlikleriyle ilgili şartların sağlanmasıyla mümkün olabilmektedir. Belirsizlikler üretim içinde ilgili ölçme cihazlarının uygun rehberlikle kullanılmasıyla öngörülen toleransların sağlanması için büyük önem taşımaktadır.

Uluslararası ölçüde kabul görmüş belirsizlik değerlendirme rehberi “GUM” kapsamlı birçok ölçme belirsizliği uygulaması için çalışmalar yapmıştır. Bununla birlikte uygulamalar için genel kurallar ve geniş yelpazeli emniyetsiz ölçümlerde uygulanabilir kurulum bilgileri oluşturulmuştur. GUM rehberi, BIPM, IEC, ISO ve OIML gibi uluslararası uzman organizasyonların işbirliği ile meydana getirilmiştir.

Herhangi bir ölçme prosesinde etkin olan tüm sistematik etkilerin tamamen tanımlanabilmesi mümkün değildir ve dolayısıyla gerçek değerinde saptanması olası değildir. Bu durumda ölçüm değeri bizim için ölçümün gerçek değeri olarak affettiğimiz muhtemel bir değerdir. Belirsizlik değerleri bizi gerçek ölçüm değerinden uzaklaştıran etkenlerdir. Ölçüm belirsizlikleri iki yolla saptanabilir:

-A tipi değerlendirme (A modeli):

Burada hesaplamalar frekans dağılımlarına göre yapılmaktadır. Girdi değerleri aynı şartlar için algılanmış $n > 10$ sayıdaki ölçüm değerine göre formüle edilmektedirler.

-B tipi değerlendirme (B modeli):

Bu değerlendirme tipinde, hesaplamalar önceden belirlenmiş bir dağılıma göre yapılmaktadır. Tahmini etkenler daha önce yapılan ölçümlere, deneyimlere, eldeki verilere veya proses hakkındaki genel bilgilere göre yapılır.

Her iki model de birbirleriyle denktir ve iki bileşende bir ölçümde birlikte ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca birlikte hesaplama da yapılabilir.

Ölçüm için genel bir model formüle etmek için, ölçüm değeri Y çoğunlukla direkt olarak ölçülmez ve N sayıdaki değişik girdinin bir fonksiyonu olarak X_1, X_2, \dots, X_N ortaya çıkar.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Bu noktadan ölçümün değerlendirilmesi adım adım şu şekilde ilerler:

1. Ortaya çıkan bağlantının tam bir tanımı
2. Tüm etkili düzeltmelerin (sıcaklık, hava basıncı, gerilim vb.) saptanıp yapılması
3. Ölçüm belirsizliklerinin tüm sebeplerinin belirsizlik analizine alınması
4. Y ölçüm değeri, bunun y tahmini değeri ve bunların belirsizlikleri kare yayılımına göre birleştirilir
5. Belirlenmiş k güvenlik katsayısı ile $y \pm k \cdot uc(y)$ değerlendirmenin ortalaması tarif edilir.

Bugün ölçme sonucunda homojen olarak tanımlanan ölçme belirsizlikleri ile dünya çapında karşılaştırılabilirlik sağlanmıştır.

6. KOORDİNAT ÖLÇME CİHAZLARININ KONTROLÜ VE KALİBRASYONU

Koordinat ölçme cihazları, modern imalat mühendisliğinde sürekli artan bir öneme sahiptirler. Bu ölçme cihazları sayesinde herhangi bir karmaşık geometrik şekle sahip olan iş parçasını hassas, esnek, çabuk ve nesnel olarak ölçmek mümkün olmaktadır. 1970'lerin başlarında koordinat ölçme cihazları için daha yüksek standartlar geliştirilmiştir. Bu tür cihazların akıllı imalat sistemlerine ilave edilmesi, günümüzde ancak modern imalat takımlarıyla üretilen karmaşık geometriye sahip iş parçalarının imalatının otomasyonuna olanak tanımıştır.

Koordinat ölçme cihazının kalibrasyonu ve doğrulanması, modern üretimde özellikle mikro ve nanoteknolojinin yüksek taleplerinde temel bir kalite gereksinimidir.

Bir CMM kullanıcısı için CMM'in tamlığına olan güven, pratik ölçme işlemlerinin temelini oluşturur. Paralel etalonlar, step etalonlar, ölçme halkaları, kalibre edilmiş diskler ve universal ölçme aletleri, CMM'lerin hatalarını periyodik olarak muayene etme, bulma ve doğrulama faaliyetleri için kullanılmaktadır. CMM'lerin testleri ile ilgili temeller, Geometrik Ürün Spesifikasyonu uluslararası standartları tarafından verilmiştir. CMM'deki ölçme görevine bağlı olarak farklı çeşitlerde doğrulama ve kalibrasyon aletleri kullanılmaktadır (13).

Özel olarak dizayn edilmiş bir test aleti universal uygulamalar için endüstriyel alanlarda ve kalibrasyon laboratuvarlarındaki yardımcı testlerde kullanılabilir. Elde edilen sonuçlar ve sağlanan tecrübeler temelinde, test aletlerinin dizaynı ve mukayeseli ölçmelerin yapılma durumları için genel kurallar formüle edilebilir. 5 adet çelik top ile hazırlanan özel tasarım bir test aleti; pozisyon, düzlemsellik, diklik ve açısız ve boyutsal karakteristiklerin hesaplanması gibi boyut ve şekil sapmalarının kontrolünü sağlar. Aynı zamanda 3 eksen yönündeki hataları ortaya çıkarır. Böylece test aleti üç farklı yüzeyde üç boyutlu ölçmelere izin vermektedir.

Test aletinin sahip olması gereken diğer önemli karakteristikleri şunlardır;

- mekanik ve termal stabilitesi
- farklı kontrol ölçümleri arasında bir karşılaştırmayı garanti eden uzun ömürlü stabilitesi
- ölçülen karakteristiklerde iyi bir yüzey kalitesi
- CMM'lerin minimum ve maksimum ölçme aralıkları (range) ile otomasyonun farklı seviyelerine uygulanması
- çevre/yaşam koşullarına adaptasyonunun kısa bir zaman alması.

CMM'in, imalatçıları tarafından gözlenen yalnızca iki önemli özel koşulu bulunmaktadır. Bunlar operasyonel ve çevresel durumlardır. Bu test aleti ile ilgili bilgisayara kolayca adapte edilebilen çok farklı software sistemleri mevcuttur. Ölçme ve ölçme stratejileri yöntemleri benzerdir. Görüntüleme ve ölçme cihazlarının doğrulama sistemlerine bağlı olarak yapılan CMM kontrolünde aşağıdaki maddeleri sırasıyla izlemek gerekmektedir.

- ölçme verisinin değerlendirilmesi
- her döngünün sonuçlarının biriktirilmesi

- istatistiksel değerlendirme.

Yaşam süresince test edilen ve kalibrasyonu yapılan koordinat ölçme cihazı için ölçme verisini değerlendirmek ve depolamak, aynı zamanda optimum kontrol aralıklarını belirlemek ve planlamak için bir veri bankası sistemi kullanılmaktadır (9).

CMM'in lineer boyutları ölçme performansı,

- boyut ölçümleri için bir CMM'in gösterge hatası E kullanıcı tarafından ISO 14253-1'e göre ölçme belirsizliği göz önüne alınarak belirlenmiş, maksimum kabul edilebilir gösterge hatası MPEE'den büyük olmadığı ve
- dokunma hatası P, kullanıcı tarafından ISO 14253-1'e göre ölçme belirsizliği göz önüne alınarak belirlenmiş, maksimum kabul edilebilir problama hatası MPEP'den büyük olmadığı durumlarda doğrulanmaktadır (11,12).

7. SONUÇ

CMM'lerin ürün ve proses kalitesindeki artan kullanım oranlarına ve ISO 9000:2000 ailesi Kalite Yönetim Sistemleri alanındaki uluslararası standartlara göre muayene, test ve ölçme cihazlarının doğrulanmasına bağlı olarak, kalitatif yüksek operasyon için talep edilen, CMM'lerin operasyonel kabiliyetinin ve ölçme tamlığının ön sıralarda yer almasını garanti ederek, ekonomik olarak kontrolünü sağlamaktır.

Veri bankası sistemi için kullanılacak olan yardımcı testler, önerilen test aletinin, farklı tasarım ve boyutlardaki CMM'lerin kontrolü ve görüntülenmesinde, imalat çevrelerinde, laboratuvar koşullarında olduğu gibi, geniş alanda kullanışlı bir cihaz olduğunu göstermektedir.

8. KAYNAKLAR

- [1] ISO 9000: 2000: Quality management systems - Fundamentals and vocabulary
- [2] ISO 9001: 2000: Quality management systems - Requirements
- [3] ISO 9004: 2000: Quality management systems - Guidelines for performance improvements.
- [4] ISO 10360-1: 2000 Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 1: Vocabulary
- [5] ISO 10360-2: 1994 Coordinate metrology - Part 2: Performance assessment of coordinate measuring machines.
- [6] ISO 10360-4: 2000 Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 4: CMMs used in scanning measuring mode.
- [7] ON M 1340: Prüfmittelüberwachung. Austrian Standard, 2001.
- [8] ENV 13005: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Vornorm. 1999 (ENV 13005:1999: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM).
- [9] Durakbasa, N.M.; Osanna, P.H., Prüfmittelüberwachung und -verwaltung im Qualitätsmanagement - leistungsfähig und flexibel durch Rechneinsatz, e & i 115 (1998), No.4, pp.207/212.
- [10] Durakbasa, N.M: Intelligent Control of Measuring Equipment and Test Instruments for Precision Engineering. Proceedings of the International NAISO Congress on Information Science Innovations ISI'2001 - IQMM'2001, ICSC Academic Press, Canada/ The Netherlands, 2001, ISBN 3-906454-25-8, 887/891
- [11] ISO 14253-1:1998: Geometrical Product Specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specifications
- [12] ISO/TS 14253-2:1999: Geometrical Product Specifications (GPS) -- Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment -- Part 2: Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification.
- [13] Trapet, E.: Report of CIRP/WECC Ball Plate Intercomparison.1994.
- [14] Osanna, P.H., Durakbasa, N.M. e.a.: CMM Testing and Calibrating Using a Universal Test Artefact. In: Blackshaw, D.M.S., Hope, A.D., Smith, G.T. (Editors): Laser Metrology and Machine Performance. Computational Mechanics Publications, Southampton, 1993, ISBN 1-85312-241-6, S.287/291.
- [15] ISO TS 15530-3 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Coordinate measuring machines (CMM) -- Techniques for determining the uncertainty of measurement -- Part 3: Use of calibrated workpieces