

KALİTE GÜVENCE SİSTEMİ İÇİNDE ÖLÇÜM YETERLİLİK SİSTEM ANALİZİ MODELİ

Uğur KAVİ

Yüksek Lisans Tezi

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs – 2008

KALİTE GÜVENCE SİSTEMİ İÇİNDE ÖLÇÜM YETERLİLİK SİSTEM ANALİZİ MODELİ

Uğur KAVİ

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sermin ELEVİLİ

Mayıs – 2008

KABUL ve ONAY SAYFASI

Uğur KAVİ'nin YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı KALİTE GÜVENCE SİSTEMİ İÇİNDE ÖLÇÜM YETERLİLİK SİSTEM ANALİZİ MODELİ başlıklı bu çalışma, jürimizce lisanüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

...../...../.....

Üye : Prof. Dr. Orhan TORKUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özden ÜSTÜN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sermin ELEVİLİ (Danışman)

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. M. Sabri ÖZYURT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

KALİTE GÜVENCE SİSTEMİ İÇİNDE ÖLÇÜM YETERLİLİK SİSTEM ANALİZİ

Uğur KAVİ

Endüstri Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2008

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Sermin ELEVİLİ

ÖZET

Kalite Güvence Sistemi içerisinde kalitenin iyileştirilmesi, verimliliğin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi çabaları çerçevesinde süreçle ilgili doğru ve etkin kararlar alınabilmesi, sürece özgü karakteristiklerin sistematik olarak ölçülmesine ve analizine bağlıdır. Bu nedenle, herhangi bir süreç değerlendirme veya iyileştirme çalışması öncesinde elde edilen ölçüm verilerinin güvenilir olup olmadığı belirlenmeli, diğer bir ifadeyle ölçüm sistemi analizi yapılmalıdır.

Bu çalışmada, ölçüm sistemi analiziyle ilgili çeşitli sektörlere ait teorik ve uygulamalı çalışmalar incelendikten sonra cam sektörüne özel bir uygulama yapılması amaçlanmıştır. Özellikle cam üretim sürecinde yaşanan ve/veya yaşanabilecek hurda maliyetleri ve duruş kayıpları ile ilgili problemlerle doğrudan ilişkili olan cam şekillendirme makineleri parçalarının ölçümlerini içeren bu çalışmada, Ortalama–Aralık Metodu ve Varyans Analizi Metodu kullanılmıştır. İki ayrı kritik parametreye dönük ölçüm süreçleri ele alınmış ve bunlardan kalınlık ölçümü ile ilgili olan süreç için kullanılan ölçüm sisteminin yetersiz olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ölçüm Sistemi Analizi, Tekrarlanabilirlik, Tekrar Yapılabilirlik, Varyans Analizi, %R&R.

MEASUREMENT CAPABILITY SYSTEM ANALYSIS IN A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

Uğur KAVİ

Industrial Engineering, M.S. Thesis, 2008

Thesis Supervisor: Asst. Prof. Sermin ELEVLI

SUMMARY

In a quality management system, making the right decision on process and process parameters to improve quality, efficiency and reduce costs depends greatly on measurement and analysis of process characteristics. Therefore, before evaluating or taking steps to improve a process, it should be determined that the measurement data is correct. In other words, a measurement systems analysis should be performed.

In this thesis, different studies on measurement systems analysis are examined and it is applied to measurement system in glass manufacturing company. Mean-Range Method and Analysis of Variance Method are used in this study which includes the measurement analysis of parts of glass forming machines that have a very important effect on scrap costs. Measurement processes of two critical parameters are studied and it is determined that the measurement system used in thickness measurement process is unacceptable.

Keywords: Analysis of Variance, Measurement Systems Analysis, Repeatability, Reproducibility, % R&R.

TEŐEKKÜR

Bu çalıőmamda benden hiçbir Şekilde desteğini esirgemeyen tez danıőmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Sermin ELEVLİ'ye, Art–Craft firmasındaki çalıőmalarım için beni motive eden Sn. Tuęrul BARAN, Sn. Necdet Güven ve Sn. Erol GRAL'a, çalıőmalarımda bana yardımcı olan l Kontrol Birimi alıőanları ve Art–Craft mesai arkadaőlarım, gerek tezimin hazırlık aşamasında gerekse de yazımı aşamasında, uykusuz zamanlarımda dahi beni hep destekleyen eőim Kevser KAVİ'ye en içten teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ANALİZİ	3
2.1. Ölçüm	3
2.2. Ölçüm Standartları (Masterlar)	5
2.3. Ölçüm Sistemi	5
2.3.1. Ölçüm Sistemi Ayırımı	5
2.3.2. Ölçüm Sistemlerinin İstatistiksel Özellikleri	6
2.3.3. Ölçüm Sistemi Değişkenlik Çeşitleri	7
2.3.3.1. Kararlılık	9
2.3.3.2. Eğilim	13
2.3.3.3. Doğrusallık	15
2.3.3.4. Tekrarlanabilirlik	17
2.3.3.5. Tekrar Yapılabilirlik	18
2.3.3.6. Parça Değişkenliği (Part to Part Variation)	19
2.4. Ölçüm Sistemi Analizi	21
2.4.1. Ölçüm Sistemi Değerlendirilmesinde Genel Kurallar	21
2.4.2. Ölçüm Sistemi Analiz Çalışması İçin Hazırlık	22
2.4.3. Test Yönteminin Seçilmesi/Geliştirilmesi	23
2.4.4. Örnek Büyüklüğü Seçilmesi	24
2.4.5. Nicelik Verileri Açısından Sistem Analizi	26
2.4.5.1. Aralık Metodu	26
2.4.5.2. Ortalama ve Aralık Metodu	27
2.4.5.3. Varyans Analizi Metodu (ANOVA)	37
2.4.6. Nitelik Verileri Açısından Sistem Analizi	42
2.4.6.1. Kısa Metot	42
2.4.6.2. Uzun Metot	43

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	46
4. MATERYAL VE METOT	49
4.1. Gürok Turizm ve Madencilik A.Ş. Art-Craft Firmasının Tanıtımı	49
4.1.1. Üretim Süreci Özeti	51
4.2. Metot	53
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	60
5.1. Kalınlık Ölçüm Analizi	60
5.2. Uzunluk Ölçüm Analizi	69
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR DİZİNİ	85

EKLER

1. d_2^* Değerleri Tablosu
2. Kontrol Grafikleri Sabitleri Tablosu
3. z, t ve F Dağılım Tabloları
4. Test ve Spesifikasyon Sınırlarının Çeşitli Değerleri İçin Üretici ve Tüketici Riskleri ve Ölçüm Hataları
5. Sık Kullanılan α , β , p1 ve p2 Değerlerine Göre Hesaplanmış Örnek Büyüklüğü Dağılımları

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	Yeterli ve Yetersiz Ayırım	6
2.2	Doğruluk ve Kesinlik Açısından Karşılaşılabilecek Durumlar	8
2.3	Kararlılık	9
2.4	Eğilim	13
2.5	Doğrusallık	15
2.6	Tekrarlanabilirlik	17
2.7	Tekrar Yapılabilirlik	18
2.8	Örnek Hata Grafikleri	37
4.1	Art – Craft Organizasyon Şeması	50
4.2	Üretim Süreci Genel Akış Şeması	52
4.3	Kontrol Süreci Genel Akış Diyagramı	53
4.4	Analiz İçin Veri Toplama Süreci	55
4.5	Ortalama – Aralık Metodu ile Analiz Süreci	56
4.6	Varyans Analizi Metodu İle Analiz Süreci	58
5.1	Kalınlık Ölçüm Sonuçlarının Grafikselsel Analizi	64
5.2	Uzunluk Ölçüm Sonuçları Grafikselsel Analizi	73

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ölçüm Aleti Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Veri Sayfası	29
2.2 Ölçüm Aleti Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Raporu	32
2.3 Varyans Analizi (ANOVA) Tablosu	40
2.4 Değişkenlik Bileşenlerinin Tahmini	41
2.5 Değişkenlik Bileşenleri 5.15 Sigma Dağılımı	41
2.6 Örnek Nitelik Ölçüm Çalışması, Kısa Metot	43
5.1 Kalınlık Ölçüm verileri	62
5.2 Kalınlık Ölçümü Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Analiz Raporu	63
5.3 Kalınlık Ölçüm Sistemi MINITAB Varyans Analizi Tablosu	66
5.4 Kalınlık Ölçüm Sistemi Varyans Analizi Tablosu	67
5.5 Kalınlık Ölçümü İçin ANOVA ve Ortalama–Aralık Metodu Karşılaştırma Tablosu	68
5.6 Uzunluk Ölçüm Verileri	71
5.7 Uzunluk Ölçümü Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Raporu	72
5.8 Uzunluk Ölçüm Sistemi MINITAB Varyans Analizi Tablosu	75
5.9 Uzunluk Ölçüm Sistemi Varyans Analizi Tablosu	76
5.10 Ölçümcü–Parça Etkileşimi Hariç ANOVA Tablosu	77
5.11 Uzunluk Ölçümü İçin ANOVA ve Ortalama–Aralık Metodu Karşılaştırma Tablosu	78
5.12 Uzunluk Ölçüm Verileri (n=20)	80
5.13 Uzunluk Ölçümü MINITAB Varyans Analizi Tablosu (n=20)	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

σ_e	Ölçüm cihazı standart sapması.
σ_0	Ölçümcü standart sapması.
σ_m	Ölçüm Sistemi standart sapması.
σ_p	Parça standart sapması.
σ_t	Toplam değişkenlik.
σ_g	Gerçek üretim değişkenliği.
I	Parça-ölçümcü etkileşimi.
p_1	Kabul edilebilir kalite düzeyi.
p_2	Kabul edilemez kalite düzeyi.
α	Üretici riski.
β	Tüketici riski.

Kısaltmalar

Açıklama

EV	Tekrarlanabilirlik.
AV	Tekrar yapılabilirlik (Ölçümcü değişkenliği).
PV	Parça değişkenliği.
TV	Toplam değişkenlik.
ASS	Alt spesifikasyon sınırı.
ÜSS	Üst spesifikasyon sınırı.
ATS	Alt test sınırı.
ÜTS	Üst test sınırı.
R&R	Ölçüm sistemi değişkenliği (tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik)
ANOVA	Varyans Analizi
SD	Serbestlik derecesi.
SS	Kareler toplamı.
MS	Kareler ortalaması.
EMS	Kareler ortalamasının beklenen değeri.

1. GİRİŞ

Kalite Yönetim Sistemlerinde süreç etkinliklerinin ölçümü, süreçler hakkında etkin analizlerin yapılabilmesi ve gerçekçi kararlar alınabilmesi açısından, ölçüm verileri günümüzün rekabete dayalı koşullarında sık ve değişik şekillerde kullanılmaktadır. Örneğin, bir üretim sürecinde ayarlama yapılıp yapılmayacağını kararı genellikle ölçüm verilerine dayandırılmaktadır. Ölçüm verileri veya bunlardan hesaplanan bazı istatistikler, sürecin istatistiksel kontrol sınırları ile karşılaştırıldığında, eğer karşılaştırma sürecin istatistiksel olarak kontrol dışına çıktığını gösterirse bir takım ayarlamalar yapılmaktadır. Öte yandan, eğer sürecin kontrol içinde olduğu tespit edilirse, sürecin ayarlama yapılmadan yürütülmesine izin verilmelidir. Bu nedenle sürecin gerçek değişkenliğini ortaya çıkarmak için, öncelikle ölçüm sisteminden kaynaklanan değişkenlik tanımlanmalı ve süreç değişkenliğinden ayrıştırılmalıdır.

Ölçüm verilerinin başka bir kullanımı da, iki değişken arasında belirli bir ilişki olup olmadığını belirlemektir. Örneğin, bir döküm parçasının önemli olarak kabul edilen bir boyutu ile döküm malzemesinin sıcaklığı arasında bir ilişki olduğundan şüphe duyulabilir. Bu olası ilişki üzerinde, kritik ebat ölçümlerini ve döküm malzemesinin sıcaklık ölçümlerini karşılaştırmak için, regresyon analizi olarak adlandırılan istatistiksel bir yöntem izlenerek çalışılabilir.

Genelde bu tip analitik çalışmalar süreci etkileyen sebepler hakkında bilgiyi artırır. Analitik çalışmalar sürecin daha iyi anlaşılmasına yol açtıkları için, ölçüm verilerinin en önemli kullanım alanları arasındadırlar. Bir ölçüm sisteminin analizindeki amaç, sistemin ortaya çıkardığı sonuçları etkileyebilecek sapma kaynaklarını daha iyi anlamaktır.

Analitik çalışmalar özellikle şu istatistiksel özellikleri değerlendirir:

1) Doğruluk (Ölçüm Sistemi Eğilim Ölçüleri)

- Kararlılık
- Eğilim
- Doğrusallık

2) Kesinlik (Ölçüm Sistemi Dağılım Ölçüleri)

- Tekrarlanabilirlik
- Tekrar yapılabilirlik

Ölçüm Sistemi Analizi, bir süreç karakteristiğine ait verilerin etkili bir analizinin yapılabilmesi ve istatistiksel süreç kontrolü tekniklerinin uygulanabilmesi için, öncelikle elde

edilen verilerin güvenilir olup olmadığının belirlenmesi ihtiyacından hareketle geliştirilmiştir. Ölçüm cihazından ve ölçüm cihazının kullanımından doğan değişkenliği bulmak, mühendislik toleransı ile ölçüm değişkenliği miktarını karşılaştırmak ve ölçüm sürecini iyileştirerek toplam değişkenliği azaltmayı amaçlar. Böylece, kontrol altında olan bir sürece müdahale edilmesinden kaynaklanan I. tip hata ve kontrol altında olmayan bir sürece müdahale edilmemesinden kaynaklanan II. tip hata olasılıklarının azaltılması sağlanmış olur.

Ölçüm verilerinden yararlanılarak yapılan bu analitik çalışmalarda kullanılan yöntemler bazen “Ölçüm R&R” yöntemleri olarak adlandırılırlar. Çünkü çoğunlukla sadece tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik istatistiksel özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Ölçüm sistemi değişkenliğinin belirlenmesi için kullanılan sayısal teknik ne olursa olsun, her analizde grafik teknikleri kullanılmalıdır. Belirli bir ölçüm sisteminin analizinde en yüksek verimi sağlayacak istatistiksel araçlar değişkenliğin beklenen baskın kaynaklarına bağlıdır. Bununla beraber ölçüm sistemlerinin analizinde yararlı olabilecek çeşitli teknikler mevcuttur. Bu teknikler için ilk varsayım, ölçümün ölçülen parçaya etkide bulunmaması veya zarar vermemesidir.

Bu tez çalışması kapsamında, bir sofrta camı üreticisi bünyesinde tasarımı ve montajı yapılan cam şekillendirme makinelerinde kullanılan parçaların ölçümü ve kabulü için oluşturulan ölçüm süreçlerinden, kalınlık ve uzunluk için olan iki ayrı süreç üzerinde ölçüm sistem analizi uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu amaçla teorik ve uygulamaya dönük olarak yapılmış çalışmalar incelenmiş ve bir sistem analiz modeli ortaya koyularak, ölçüm süreçlerinin değişkenlik kaynaklarının etkilerinin incelenmesi ve muhtemel problemlili alanların nasıl tespit edilebileceği irdelenmiştir.

Bu kapsamda, ölçüm işleminin ne olduğu, ölçüm sistemi istatistiksel özellikleri ve ölçüm sistemi analizi için yapılması gereken hazırlıklar ile ölçüm sistem analizinde hangi metotların kullanılabileceği ikinci bölümde anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, ölçüm sistemi analizi ile ilgili gözden geçirilmiş olan literatürün özeti verilmiştir. Dördüncü bölümde, uygulamanın yapıldığı Art–Craft firması hakkında bilgi verilmiş ve uygulamada hangi metotların kullanıldığı oluşturulan akış şemaları ile birlikte belirtilmiştir. Beşinci bölümde, sofrta camı üreticisi olan Art–Craft fabrikasında ölçüm sistem analizi ile ilgili olarak nicelik verileri kullanılarak yapılan uygulama anlatılmıştır. Altıncı bölümde, çalışma ile ilgili değerlendirme yapılmış ve elde edilen sonuçlar anlatılmıştır.

2. ÖLÇÜM SİSTEMLERİ ANALİZİ

Kalite güvence sistemlerinde tasarım ve uygunluk kaliteleri ancak ölçme faaliyetleri sonucunda bir anlam kazanırlar. Ölçüm verilerinin kalitesi ise, kararlı koşullarda çalışan bir ölçüm sisteminden elde edilen çoklu ölçümlerin istatistiksel özellikleri ile ilgilidir. Düşük veri kalitesine sebep olan nedenlerden en önemlisi verilerde kaynağı bilinmeyen ve belirlenmemiş değişkenliğin fazla olmasıdır. Bu durum, verinin yorumlanmasını daha zor ve ölçüm sistemini daha az cazip konuma getirir. İşte bu noktada ölçüm sistem analizi uygulamalarıyla verilerdeki değişkenliğin ne kadarının ölçme işlemleri sonucu oluştuğu belirlenebilir.

Bir ölçüm sistemi değerlendirilirken üç temel nokta çözümlenmelidir [1];

- 1) Ölçüm sistemi yeterli ayırım yapma özelliğine sahip midir?
- 2) Ölçüm sistemi zamana göre istatistiksel olarak kararlı mıdır?
- 3) İstatistiksel özellikler beklenen aralık içinde tutarlı mıdır ve süreç analizi veya kontrolü için kabul edilebilir mi?

Bu belirlemeler en doğru şekilde süreç değişkenliğine göre yapılır. Ölçüm hatalarını sadece tolerans dağılımı olarak raporlama alışkanlığı, sürekli süreç gelişiminin önem kazandığı pazar rekabeti için yetersizdir [2].

Ölçüm Sistemleri Analizi endüstriyel uygulama olarak, Nicelik Verileri için yapılan ve Nitelik Verileri için yapılan analizler olarak ikiye ayrılırlar. Analiz yöntemleri çoğu zaman “Ölçüm R&R” yöntemleri olarak da adlandırılırlar, çünkü çoğunlukla sadece tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik istatistiksel özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Genelde, yöntemlerin üretim ortamında kullanımı kolaydır. Bu yöntemler yapıları itibarıyla istatistiğe dayalı olduğu halde, istatistikçi olmayanların da rahatlıkla kullanabileceği şekilde düzenlenmiştir.

2.1. Ölçüm

Ölçüm en basit şekilde “sayıları tayin etme işlemi” olarak tanımlanabilir. Bunun dışında;

- Gözlem sonuçlarının sayı ile ifade edilmesi
- Belirli bir özelliğe göre malzemelere sayılar tayin etmek,
- Belirli bir özelliğe göre birbirleri arasındaki etkileşimi temsil etmesi için, malzemelere sayılar tayin etmek [3] gibi tanımlamalar da kullanılabilir.

Sayıları tayin etme işlemi ölçüm işlemi olarak tanımlanır ve tayin edilen değer ise ölçüm değeri olarak tanımlanır [3].

Ölçüm Cihazı, ölçümleri elde etmek için kullanılan herhangi bir cihaz olarak tanımlanır ve Geçer/Geçmez cihazlarını da kapsar

Ölçüm verilerinin kalitesi, kararlı koşullarda çalışan bir ölçüm sisteminden elde edilen çoklu ölçümlerin istatistiksel özellikleriyle ilgilidir. Örneğin, kararlı bir ölçüm sisteminin, belirli bir karakteristik için çeşitli ölçümler elde etmek amacıyla kullanıldığını kabul edelim. Eğer bu karakteristik için ölçümlerin hepsi master değere ‘yakın’ ise veri kalitesi ‘yüksek’ denebilir. Aynı şekilde eğer ölçümlerin bazıları veya hepsi master değere ‘uzak’ ise veri kalitesi ‘düşük’ denebilir.

Veri kalitesini karakterize etmek için kullanılan istatistiksel özellikler, genellikle eğilim ve değişkenliktir [3]. Eğilim olarak adlandırılan özellik, master değere göre verinin lokasyonunu gösterir ve değişkenlik olarak adlandırılan özellik ise verinin dağılımını gösterir. Fakat, hatalı sınıflandırma oranı gibi diğer istatistiksel özellikler de bazı durumlar için uygun olabilir.

Düşük veri kalitesinin en yaygın sebeplerinden biri, verilerde sebebi belirlenmemiş çok fazla değişkenlik olmasıdır [3]. Örneğin, bir tankın içindeki sıvı hacmini ölçmek için kullanılan bir ölçüm sistemi kullanıldığı ortamın sıcaklığına çok duyarlı olabilir. Bu durumda, verideki değişkenlik hem sıvı hacminin değişmesinden, hem de ortam sıcaklığının değişimlerinden kaynaklanır [4]. Bu durum, verinin yorumlanmasını daha zor ve ölçüm sistemini daha az cazip duruma getirir.

Bir ölçüm setindeki değişkenliğin birçoğu, ölçüm sistemi ve çevre koşulları etkileşiminden meydana gelir. Eğer etkileşim çok fazla değişkenlik meydana getiriyorsa, veri kalitesi düşük olur. Bu nedenle, büyük miktarda değişkenlik içeren bir ölçüm sistemi, üretim sürecinin değişkenliğinin yanlış değerlendirilmesine sebep olabileceğinden, üretim sürecini analiz etmek için uygun olmayacaktır [4].

Her ne kadar değişkenlik istenmeyen bir durum olsa da bazı önemli istisnalar vardır. Eğer değişkenlik, ölçülen karakteristikteki küçük değişikliklerden dolayı ise ölçüm sistemi genellikle kabul edilebilir olarak düşünülür. Ölçüm sistemi bu tür değişikliklere ne kadar duyarlıysa, o kadar hassastır [2]. Eğer veri kalitesi kabul edilebilir değilse, ölçüm sistemi iyileştirilmelidir.

2.2. Ölçüm Standartları (Masterlar)

Ölçüm standartları hiyerarşik bir yapı sergilerler. En üstte Uluslararası Standartların yer aldığı bu ölçme referans zincirinin, ülke sınırları içinde kullanıcı seviyesine kadar tam olarak bağlantısını sağlayan metroloji laboratuvarları ulusal metroloji sistemini oluştururlar.

Ulusal Standartların altında ise Referans Standartlar yer alır. Referans Standartlar, işletmelerin kendi ekipman doğrulama standartlarını kalibre ettirdikleri seviyedir. İşletmelerin, kendi süreç ya da kalite kontrol cihazlarını doğruladıkları ve kalibre ettikleri bu standartlara Çalışma Standartları adı verilir. Hiyerarşinin en alt seviyesi, endüstriyel testlerde kullanılan ölçüm cihazlarıdır [4].

2.3. Ölçüm Sistemi

Ölçüm sistemi, ölçülen karakteristiğe sayı tayin eden operasyonlar, yöntemler, ölçüm cihazları ve diğer cihazlar, yazılım ve personel toplamı; bir başka ifadeyle ölçümleri elde etmek için kullanılan süreçlerin tümü olarak tanımlanabilir [3].

İdeal bir ölçüm sistemi kullanıldığı her seferde, sadece “doğru” ölçümler oluşturacaktır. Her ölçüm, her zaman master standartlarına uyacaktır [5]. Böyle ölçümler elde eden bir ölçüm sistemi, ölçülen her ürün için sıfır değişkenlik, sıfır eğilim ve yeterli ayırım gibi istatistiksel özelliklere sahiptir. Ancak, uygulamada böyle istatistiksel özelliklere sahip olan ölçüm sistemleri nadiren bulunur ve bu sebeple daha az arzulanan istatistiksel özelliklere sahip ölçüm sistemlerini kullanmak zorunluluğu ortaya çıkar. Ölçüm sisteminin kalitesi genellikle elde edilen verilerin istatistiksel özellikleri ile belirlenir [2]. Maliyet, kullanım kolaylığı vb. diğer özellikler, ölçüm sisteminin cazip olup olmasını etkilediği için ayrıca önemlidir. Fakat sistemin kalitesini belirleyen elde edilen verilerin istatistiksel özellikleridir.

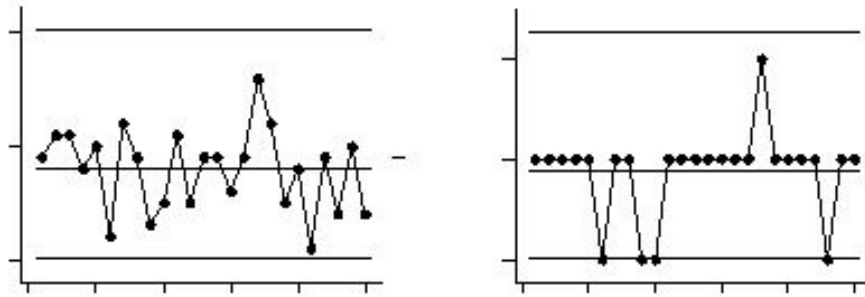
2.3.1. Ölçüm Sistemi Ayırımı

Bir ölçüm sistemini seçerken veya analiz ederken ölçüm sisteminin ayırımı yani ölçüm sisteminin ölçülen karakteristiklerdeki küçük değişimleri bile tespit edebilme ve doğru olarak gösterme yeteneği önem kazanır [6]. Bu yetenek, çözünürlük olarak da adlandırılır.

Ekonomik ve fiziksel sınırlar sebebiyle ölçüm sistemi, bir süreç dağılımının bütün parçalarını farklı karakteristiklere sahip olarak algılamayacaktır. Bunun yerine ölçülmüş karakteristikler, ölçülmüş değerler aracılığıyla veri kategorilerine gruplandırılır. Aynı veri kategorisindeki tüm parçalar ölçülmüş karakteristikler için aynı değere sahip olacaktır.

Eğer bir ölçüm sistemi yeterli bir ayırma sahip değilse, bu ölçüm sistemi parça karakteristiklerinin ölçümü ve süreç değişkenliğini tanımlamak için uygun bir sistem olmayabilir [6]. Eğer böyle bir durum söz konusuysa, daha iyi ölçüm teknikleri kullanılmalıdır.

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi kabul edilemez ayırımın belirtileri en iyi şekilde aralık (R) grafiğinde görülebilir. Aralık (R) grafiği incelendiğinde, noktaların dörtte birinden daha fazlası sıfır ise veya aynı değere sahipmiş gibi ise, ölçümler yetersiz ayırım ile yapılmış demektir [7]. Bu sorun ölçümlerin ayırımının artırılmasıyla, yani çözünürlüğü daha yüksek ölçüm cihazı kullanılarak çözülebilir.



Şekil 2.1 Yeterli ve Yetersiz Ayırım

Bir ölçüm sistemi, görünen çözünürlüğü süreç değişkenliğinden göreceli olarak küçükse yeterli ayırma sahip olacaktır [3]. Görünen çözünürlüğün, tolerans aralığının en fazla onda biri olması veya sürecin standart sapmasının 6 ile çarpımının en fazla onda biri olması da yeterli ayırım için yeterli olacaktır [2].

2.3.2. Ölçüm Sistemlerinin İstatistiksel Özellikleri

Ölçüm sisteminin kalitesi genellikle elde edilen verilerin istatistiksel özellikleri ile belirlenmektedir. Bir uygulama için en önemli olan istatistiksel özellikler, diğer bir uygulama için muhakkak en önemli olmak zorunda değildir. Örneğin, koordinat ölçüm cihazının (CMM) bazı kullanımlarında, en önemli istatistiksel özelliği “küçük” eğilim ve değişkenliktir. Bu özelliklere sahip bir CMM cihazı, Ulusal Standartlar Enstitüleri tarafından belirlenen standart değerlerine çok “yakın” ölçümler elde edecektir. Böyle bir cihazdan elde edilecek veriler bir üretim işlemini analiz etmek için çok yararlı olacaktır. Fakat eğilimi ve değişkenliği ne kadar

küçük olursa olsun, aynı CMM cihazı, bazı durumlarda iyi ve kötü ürün arasında kabul edilebilir bir ayırım yapamayabilir. Bu durumlarda cihaz, üretim sürecini analiz etmek için kabul edilebilir, fakat bitmiş parça denetlemesi için kabul edilemez.

Verilerin esas kullanımı için en önemli istatistiksel özelliklerin belirlenmesinde yönetim sorumluluk sahibidir. Yönetim aynı zamanda, kullanılacak ölçüm sistemi seçilirken bu özelliklerin esas alınmasını sağlamak zorundadır. Bunu yerine getirmek için, her zaman uygulanabilecek standart talimatlar geliştirilmelidir.

Her ölçüm sistemi değişik istatistiksel özelliklere sahip olabilmektedir. Bunun dışında, bütün ölçüm sistemlerinin sahip olması gereken bazı temel özellikler vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

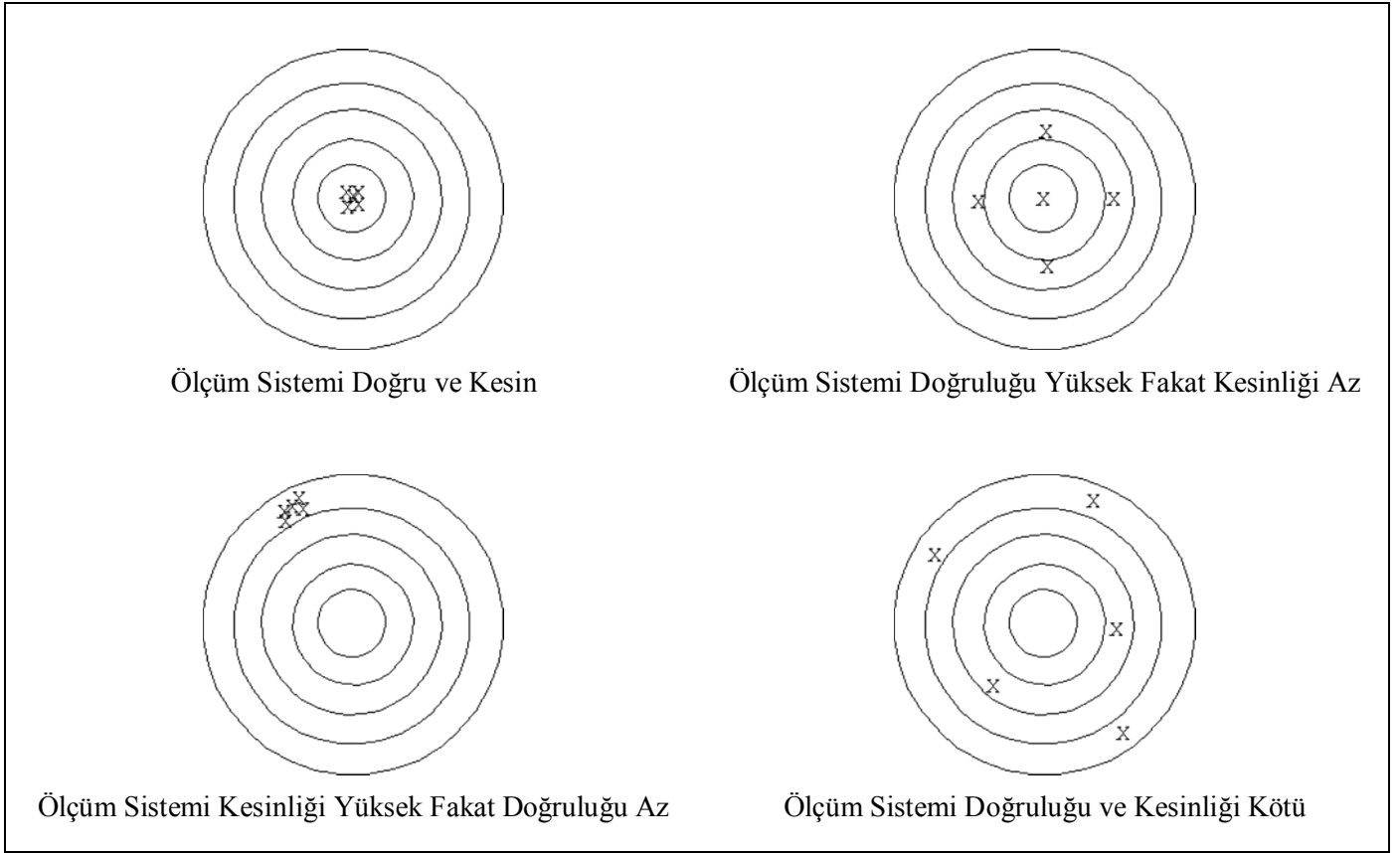
- 1) Ölçüm sistemi istatistiksel olarak kontrol altında olmalıdır. Bu, ölçüm sistemindeki değişkenliğin özel sebeplerden değil sadece genel sebeplerden kaynaklanması anlamına gelir.
- 2) Üretim sürecinin değişkenliğiyle karşılaştırıldığında ölçüm sisteminin değişkenliği daha küçük olmalıdır.
- 3) Spesifikasyon limitleriyle karşılaştırıldığında değişkenlik küçük olmalıdır.
- 4) Ölçülen parçalar farklılaştıkça, ölçüm sisteminin istatistiksel özellikleri değişebilir. Bu tür durumlarda, ölçüm sisteminin en büyük (en kötü) değişkenliği, süreç değişkenliği veya toleranstan en küçük olanına göre küçük olmalıdır.

2.3.3. Ölçüm Sistemi Değişkenlik Çeşitleri

Çoğu kez ölçümlerin hatasız olduğu kabul edilir. Analiz ve sonuçlar bu varsayıma dayandırılır. Fakat, gerçek süreç değişkenliğine odaklanabilmek için öncelikle ölçüm sisteminden gelen değişkenlik belirlenmeli ve süreç değişkenliğinden ayrıştırılmalıdır. Ölçüm sistemi değişkenliği ana olarak iki kategoriye ayrılabilir;

- 1) Doğruluk: Ölçüm değeri ve ilgili parçanın gerçek değeri arasındaki farktır.
- 2) Kesinlik: Bir parça aynı ölçüm cihazıyla tekrar tekrar ölçüldüğünde gözlemlenen varyasyondur.

Şekil 2.2'de ölçüm sisteminde doğruluk ve kesinlik açısından karşılaşılabilecek durumlar gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Doğruluk ve Kesinlik Açısından Karşılaşılabilecek Durumlar

Ölçüm sistem analizi açısından doğruluk ve kesinlik şu şekilde alt elemanlara ayrılarak incelenilir;

1) Doğruluk

- Kararlılık,
- Eğilim,
- Doğrusallık.

2) Kesinlik

- Tekrarlanabilirlik,
- Tekrar yapılabilirlik,

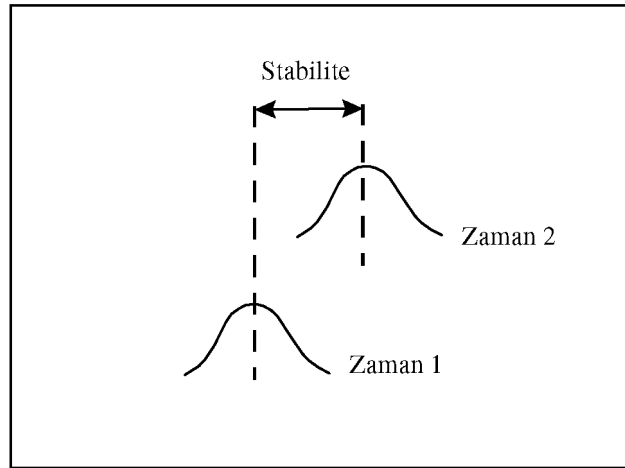
Ölçüm sistemi çalışmasının amaçlarından biri, ortam şartlarıyla etkileşim içinde olan ölçüm sistemlerinin ölçüm değişkenliği miktarı ve çeşitleriyle ilgili bilgi elde etmektir.

Tekrarlanabilirlik ve eğilimi tanımlamak ve bunlar için kabul edilebilir limitler belirlemek, çok yüksek tekrarlanabilirliğe sahip aşırı kesin ölçüm aletleri sağlamaktan daha pratik olduğu için bu bilgi değerlidir. Böyle bir çalışma aşağıdaki yararları sağlar [8]:

- 1) Yeni ölçüm ekipmanını kabul etmek için kriterler.
- 2) Bir ölçüm cihazını diğeriyle karşılaştırma olanağı.
- 3) Yetersiz olduğu düşünülen bir ölçüm cihazının değerlendirilmesi.
- 4) Ölçüm aletinin tamir öncesi ve sonrası durumlarının karşılaştırılması.
- 5) Bir üretim süreci için, süreç değişkenliğini ve kabul edilebilirlik seviyesini hesaplamak için gerekli bilgi.

2.3.3.1. Kararlılık

Kararlılık (stabilite), ölçüm sisteminin belirli bir cihazla aynı parçanın tek bir özelliğini zamana bağlı olarak ne kadar doğru ölçtüğünün bir göstergesidir. Bu durum Şekil 2.'de [3] gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Kararlılık

Ölçüm sistemi kararlılığı ile daha genel bir terim olan ve aynı zamanda tekrarlanabilirlik, eğilim ve genel süreçlere de uygulanan istatistiksel kararlılığı birbirinden ayırmak çok önemlidir. Yani, aynı master parçayı ölçen iki ölçüm sistemi olabilir. Her ikisinin de istatistiksel kararlılığı kanıtlanırsa bile, sistemlerden birinin zaman içindeki eğiliminde

diğerinden daha fazla sapma görülebilir. İstatistiksel olarak, iki sistem de “aynı düzeyde” kararlıdır fakat ölçüm sistemi analizi açısından bakıldığında, ölçüm cihazı kararlılığı açısından zaman içinde daha büyük eğilim sapması olan bir sistem diğerinden daha az “kararlı” olarak düşünülür.

Konu hakkındaki bilgilerle birleştirildiğinde istatistiksel kararlılık bir sürecin gelecekteki performansının önceden bilinmesine olanak sağlar [9]. Bir ölçüm sürecinin kontrol altında olup olmadığı belirlenmeden “tekrarlanabilirlik”, “tekrar yapılabilirlik”, vb. için çizilmiş şekiller çalışma sırasında elde edilen verinin tanımlanmasından öteye gitmez. Gelecekteki performans için bir anlam ifade etmezler. Kararlılık durumu belirsizken bir ölçüm sisteminin tekrarlanabilirliğini, tekrar yapılabilirliğini, vb. değerlendirmek faydadan çok zarar getirebilir. Analiz sonucuna göre bir harekette bulunulursa, yapılan değişiklik sebebiyle ölçüm sistemi değişkenliğinde artışa sebep olunabilir [1].

Ölçüm sisteminin istatistiksel kararlılığından bahsedildiğinde, sistemin kararlı kaldığı sürenin uzunluğu genellikle konunun en önemli noktasıdır. “Kısa Dönemli Kararlılık” ve “Uzun Dönemli Kararlılık” gibi kavramlar bazen ölçüm sistemi analiz metotları için varsayım olarak görülmektedir [3]. Herhangi bir sürecin istatistiksel kararlılığının analizinde zaman önemli bir faktörken, daha çok önem verilmesi gereken, sistemin kararlılık analizi sırasında maruz kaldığı şartlardır. Bu yüzden, konuya hakim olmadan kararlılık analizi için zaman dilimleri belirlenemez.

Ölçüm sistemlerini, istatistiksel kararsızlığa yol açan tüm şartlara dayanıklı hale getirmek her zaman mümkün ve/veya ekonomik olmayabilir. Bir ölçüm sisteminin istatistiksel kararlılığı değerlendirildiğinde, ölçüm sistemini etkilemesi beklenen çevre, operatör, malzeme ve metotlar dikkate alınmalıdır. Her ölçüm sistemini tüm olası çevre şartları için kontrol etmek makul değildir [8]. Ancak bir ölçüm sisteminin istatistiksel kararlılığını değerlendirmeden önce hangi faktörlerin ölçüm sistemini etkileyebileceği ve öncelik verileceğini belirlemek önemlidir. Böylece çalışmada yüksek öncelikli faktörler göz önünde bulundurulmuş olur. Neden ve sonuç diyagramları, süreç akış şemaları ve süreç modelleri gibi süreci iyileştirici araçlar bu faktörlerin belirlenmesinde yardımcıdır [9].

İstatistiksel kararlılık, Kontrol Grafiği kullanılarak belirlenir. Kontrol grafikleri, tüm belirlenebilir nedenlerden kaynaklanan değişimlerin tespit edilmesini sağlar. Kontrol grafikleri kullanırken, kontrol sınırlarının dışına düşen noktaların yanı sıra sistematik eğilimleri de göz önünde bulundurmak gerekir. Nitekim bu işaretlerin varlığı “kontrol dışı” veya kararlı olmayan şartların oluştuğunu kanıtlar [8].

Kontrol grafiği kullanılarak yapılan bir ölçüm sistemi kararlılık çalışmasında, tekrarlanan master veya master parça ölçümlerinin ortalama ve aralıklarını esas alan Ortalama ve Aralık ($\bar{X} - R$) grafikleri oluşturulur [3]. Böyle bir analiz ile ölçüm sisteminin kalibrasyon gerektirdiğini gösteren bir kontrol dışılık işareti belirlenebilir. Bir kontrol dışılık işareti olmadan yapılan kalibrasyon, ölçüm sisteminin ölçümlerindeki sapmayı artırabilir. Kontrol dışılık işareti, masterın veya master parçanın kirli olmasından dolayı da ortaya çıkmış olabilir. Her durumda kontrol grafiklerinin içerdiği mesajların yorumu süreç bilgisine bağlıdır.

Bir ölçüm sistemi Kontrol Grafiğinin örnek sayısı ve örnek büyüklüğü de ölçüm sistemi bilgisine dayanarak belirlenmelidir. Esas itibariyle dikkat edilmesi gereken husus kullanım esnasında ölçüm sisteminin maruz kaldığı şartlardır [8]. Örnek olarak, dijital terazi kullanımında operatörün sistemi kullanmadan önce gerekli ısınma süresini sağladığından emin olunmadan örnekleme yapılmamalıdır.

Referans değeri alınması esnasında sonuçlara eğilim dahil olmadığının garanti edilmesi için bir ölçüm sisteminin Kontrol Grafiğinin tasarımına da dikkat edilmelidir. Örnek olarak, sadece sabah alınan örnekler ölçüm sisteminin maruz kaldığı alışılmış şartların tümünü temsil edemeyebilir. Herhangi bir Kontrol Grafiğinde, kontrol dışılık işaretleri örnek sayısı ve örnek büyüklüğündeki problemler sebebiyle ortaya çıkabilir. Yani Kontrol Grafiği tekniklerinin dikkatli planlanması önemlidir.

Bir ölçüm sisteminin kararlılık değerini hesaplamaya gerek yoktur. İyileşmeyi ölçmek için bazen indisler kullanılır, fakat bir Kontrol Grafiği ile sistemdeki iyileştirme, grafik üzerinde de görülebilir [8]. Süreçten özel sebeplerin giderilmesi suretiyle kararlı bir ölçüm süreci sağlanabilir. Daha fazla iyileştirmeye kontrol sınırlarının genişliğinde azaltmaya gidilerek ulaşılabilir. Bu durum, sistemde genel sebeplerden kaynaklanan varyasyonun azaltıldığına işaret eder.

R (veya s) grafiğinde sürecin kontrol dışı olduğuna ilişkin bir işaret olmadığında, ölçüm sürecinin zaman boyunca sapsması tahmin edilerek ölçüm sisteminin kararlılığı belirlenir (ölçüm cihazı kararlılığı). Ölçüm süreci standart sapsmasının bir tahmini

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \text{ dir.}$$

Bu, ölçüm sistemi kararlılığının uygulama için uygun olup olmadığını belirlemek için, süreç standart sapsması ile karşılaştırılabilir [8]. Ölçüm sisteminin standart sapsması, süreç

standart sapmasından büyükse bu ölçüm sistemi bu süreç hakkında karar vermek ve süreç kontrolü için kullanılamaz, çünkü süreç değişkenliğini doğru tespit edemez.

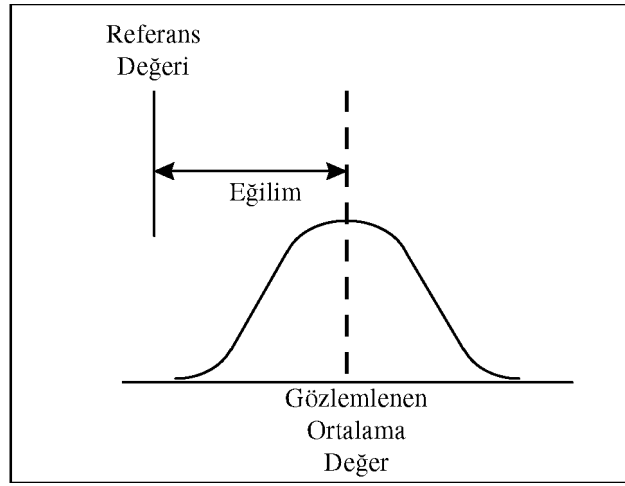
Kararlılığı belirlemek için izlenebilecek yol şu şekilde özetlenebilir [3]:

- 1) Örnek alınır ve “izlenebilir standartlara” göre referans değeri/değerleri belirlenir. Eğer böyle bir parça elde yoksa, ölçümlerin orta aralığına düşen bir parça seçilir ve bu kararlılık analizi için master parça olarak belirlenir. Bilinen referans değeri, ölçüm sistemi kararlılığında izlenecek yol için gerekli değildir. Beklenen ölçümlerin alt noktası, üst noktası ve orta aralığında master parçalar almak cazip olabilir. Her biri için ayrı ölçüm ve kontrol grafikleri gerekecektir.
- 2) Periyodik olarak (günlük, haftalık) master parça 3–5 kez ölçülür. Örnek büyüklüğü ve sayısı ölçüm sisteminden gelen bilgiye dayandırılmalıdır. Faktörler, ne sıklıkla tekrar kalibrasyon veya onarım gerektiğini, hangi frekansla ölçüm sisteminin kullanıldığını, çalışma şartlarının ne zorlukta olduğunu içermelidir. Ölçüm sisteminin gerçekten kullanıldığı zamanı temsil etmesi için, ölçümler değişen zamanlarda alınmalıdır. Bu şekilde, ısınma, atmosfer ve gün içinde değişebilecek diğer faktörler göz önüne alınmış olur.
- 3) Veriler, $\bar{X}-R$, veya $\bar{X}-s$ Kontrol Grafiğine çizilir.
- 4) Kontrol sınırları tespit edilir ve her normal grafik için kontrol dışı veya kararlı olmayan durumlar saptanır.
 - a. R (veya s) grafiklerindeki kontrol dışılık şartları kararlı olmayan bir tekrarlanabilirliğe işaret ederler (kısmen bloke olmuş hava hattı, değişken voltaj, vb.).
 - b. \bar{X} Grafiğindeki kontrol dışılık ölçüm sisteminin artık doğru ölçmediğine işaret eder (eğilim değişmiştir). Değişimin sebebi belirlenmeli ve düzeltilmelidir. Eğer sebep yıpranmaysa, çözüm kalibrasyonun tekrarı olabilir.
- 5) Ölçüm sisteminin tekrarlanabilirliğinin uygulamaya uygun olup olmadığını belirlemek için ölçümlerin standart sapması hesaplanır ve bu değer süreç standart sapmasıyla karşılaştırılır.

Ölçüm sisteminin kararlılığının eksikliğine katkıda bulunan başlıca sebepleri belirlemek için deney tasarımı veya diğer analitik problem çözme teknikleri gerekebilir [3].

2.3.3.2. Eğilim

Şekil 2.4’de [10] görüleceği üzere eğilim, ölçümlerin gözlemlenen ortalaması ve referans değeri arasındaki farktır. Referans değeri, yüksek seviyeli bir ölçüm ekipmanı (örneğin ölçü kontrol biriminde yer alan ölçüm ekipmanı) ile yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenebilir. Eğilim “doğruluk” ile eş anlamlı olarak kullanılabilir. Fakat “doğruluk” literatürde çeşitli anlamlara gelir ve eğilime alternatif olarak kullanımı tavsiye edilmez [3].



Şekil 2.4 Eğilim

Ölçüm sisteminin eğilimini belirlemek için, bir parçanın kabul edilmiş referans değerini elde etmek gerekir. Referans değer genellikle ölçü kontrol merkezinde kullanılan ölçüm cihazları veya ilgili bölümün kendi kullandığı ekipmanlar ile tespit edilir. Referans değerleri, daha sonra ölçüm R&R çalışmalarında ölçümü yapan kişilerin gözlemlediği ortalamalarla (\bar{X}_A , \bar{X}_B , \bar{X}_C olarak tanımlanmıştır) karşılaştırılır. Bu işlemler sonucu eğilim, referans değeri ve gözlemlenen ölçüm ortalaması arasındaki farkla belirlenir [8].

Eğilimi belirlemek için izlenebilecek yöntem iki başlık altında özetlenebilir.

A. Bağımsız Örnek Metodu

- 1) Bir örnek alınır ve izlenebilir standartlara göre referans değer(ler)i belirlenir. Eğer böyle bir parça elde yok ise, ölçümlerin orta aralığına düşen bir parça seçilir ve bu eğilim analizi için master parça olarak belirlenir. Parça 10 kez ölçülür ve bu 10

okumanın ortalaması hesaplanır. Bu ortalama “referans değeri” olarak kullanılır. Beklenen ölçümlerin alt noktası, üst noktası ve orta aralığında master parçalar almak cazip olabilir. Her biri için ayrı analiz gerekecektir.

- 2) Bir ölçümcünün normal usulle örneği 10 kez ölçmesi sağlanır.
- 3) 10 okumanın ortalaması hesaplanır.
- 4) Bu ortalama referans değeri çıkartılarak eğilim hesaplanır.

Eğilim = Gözlemlenen Ölçüm Ortalamaları - Referans Değeri

Proses Varyansı = 6 Sigma Aralığı

$$\% \text{ Eğilim} = \frac{\text{Eğilim}}{\text{Proses Varyansı}} \times 100$$

B. Grafik Metodu

Eğer kararlılığı ölçmek için bir \bar{X} -R grafiği kullanılmışsa, bu veriler eğilimi belirlemek için de kullanılabilir.

- 1) Bir örnek alınır ve izlenebilir standartlara (masterlara) göre referans değer(ler)i belirlenir. Eğer böyle bir parça elde yok ise, ölçümlerin orta aralığına düşen bir parça seçilir ve bu eğilim analizi için master parça olarak belirlenir. Parça 10 kez ölçülür ve bu 10 okumanın ortalaması hesaplanır. Bu ortalama “referans değeri” olarak kullanılır.
- 2) Ölçüm ortalaması (\bar{X}) hesaplanır.
- 3) \bar{X} ’ dan referans değeri çıkartılarak eğilim hesaplanır.

Eğilim = \bar{X} - Referans Değeri

Proses Varyansı = 6 Sigma Aralığı

$$\% \text{ Eğilim} = \frac{\text{Eğilim}}{\text{Proses Varyansı}} \times 100$$

Eğer eğilim göreceli olarak fazlaysa, aşağıdaki olası nedenler araştırılmalıdır [3, 4, 8]:

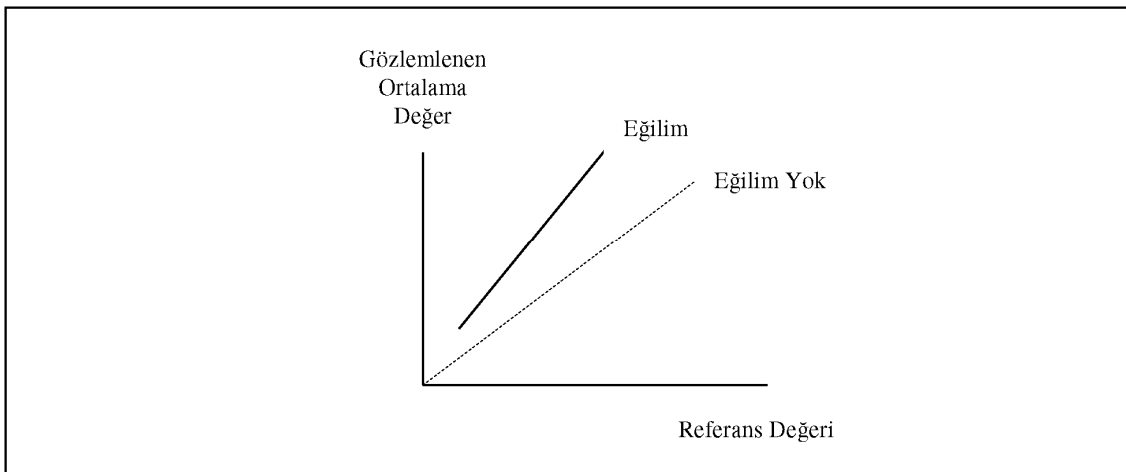
- 1) Mastarda hata,
- 2) Aşınmış elemanlar,
- 3) Aletlerin yanlış ölçü birimlerine ayarlanması,

- 4) Aletlerin yanlış özellikleri ölçmesi,
- 5) Aletlerin doğru kalibre edilmemesi,
- 6) Ölçümü yapan kişinin aletleri yanlış kullanması.

2.3.3.3. Doğrusallık

Doğrusallık, ölçüm cihazının beklenen çalışma aralığı boyunca eğilim değerleri farklıdır [3]. Doğrusallık, ölçüm cihazının çalışma aralığının başından sonuna kadar parçalar seçilerek belirlenebilir. Seçilen parçaların her birinin eğilimi referans değeri ve gözlemlenen ortalama ölçümün farkı alınarak belirlenir. Şekil 2.5’de [3] görüldüğü gibi parçaların referans değerleri ile gözlemlenen ortalama değerler yardımıyla oluşturulan regresyon grafiğindeki doğrunun eğimi ölçüm aletinin doğrusallığını gösteren endekstir. Ölçüm aletinin doğrusallığını süreç değişkenliği (veya tolerans) yüzdesine çevirmek için yüzle çarpıp süreç değişkenliğine (veya toleransa) bölmek gerekir.

Çalışma aralığı boyunca seçilen parçalar, bir veya daha fazla ölçümcü tarafından ölçülür ve her parça için gözlemlenen ortalama belirlenir. Referans değerleri ve gözlemlenen ortalamalar arasındaki fark eğilimdir; seçilen her parça için hesaplanır. Doğrusallık grafiği (Şekil 2.5), çalışma aralığı boyunca eğilimler ve referans değerleri kullanılarak çizilir. Sistemin doğrusallığı ve doğrusallık yüzdesi, regresyon doğrusunun eğiminden ve parçaların süreç değişkenliğinden (veya tolerans) hesaplanır.



Şekil 2.5 Doğrusallık

Eğer regresyon doğrusu noktaların çoğunu kapsıyorsa, doğrusallık ve doğrusallık yüzdesinin büyüklüğü, doğrusallığın kabul edilebilir olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Eğer regresyon doğrusu noktaları kapsamıyorsa, eğilim ortalamaları ve referans değerleri arasında doğrusal olmayan bir ilişki olma olasılığı vardır.

$$y = a + b \cdot x$$

y : Eğilim x : Referans Değeri a : Eğim

$$\text{Eğim : } a = \frac{\sum(x \cdot y) - \left(\sum x \cdot \frac{\sum y}{n} \right)}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

$$b = \sum \frac{y}{n} - a \cdot \left(\sum \frac{x}{n} \right)$$

$$\text{Determinasyon Katsayısı: } R^2 = \frac{\left(\sum(x \cdot y) - \sum x \cdot \frac{\sum y}{n} \right)^2}{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \times \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}$$

$$\text{Doğrusallık} = (\text{Eğim}) \times (\text{Proses Varyansı})$$

$$\% \text{ Doğrusallık} = \frac{\text{Doğrusallık}}{\text{Proses Varyansı}} \times 100$$

Doğrusallığın bulunması için izlenilecek yöntem aşağıda verilmiştir [3, 4];

- 1) Ölçüleri, ölçüm cihazının sınırları içinde olan beş parça seçilir.
- 2) Parçanın referansının belirlenmesi ve söz konusu cihazın çalışma sınırlarının kapsadığını doğrulamak için “ölçü kontrol birimi” tarafından her parça ölçülür.
- 3) Tüm parçalar ölçümcüler tarafından 12 kez ölçülür. Eğilimin en aza indirilmesi amacı ile parçalar rasgele olarak seçilir.
- 4) Parça eğilim ortalaması, parça ortalamasının parça referans değerinden çıkarılması ile bulunur.
- 5) Eğilim ortalaması ve referans değerleri grafiği çizilir.
- 6) Regresyon doğrusu yukarıdaki denklemlerde verildiği gibi hesaplanarak çizilir [3].

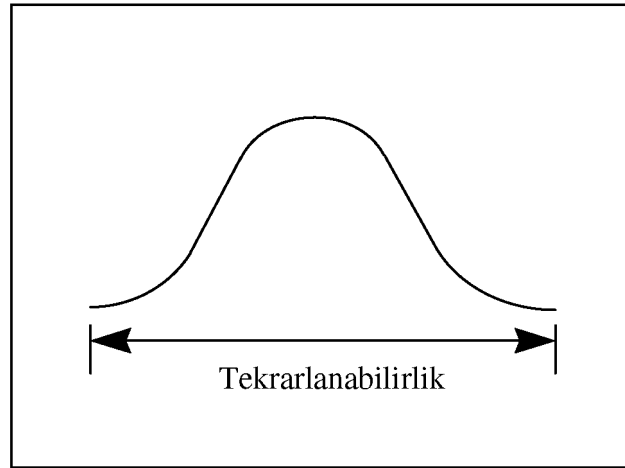
Genellikle eğim düştükçe ölçüm aleti doğrusallığı artarken, eğim arttıkça doğrusallık düşer.

Eğer bir ölçüm sistemin doğrusallığı yok ise, aşağıdaki sebepler araştırılmalıdır;

- 1) Ölçüm cihazı, çalışma aralığının üst ve alt noktalarına doğru olarak kalibre edilmemiştir.
- 2) Minimum ve maksimum mastarında hata.
- 3) Aşınmış ölçüm aleti.
- 4) Ölçüm aletinin iç tasarım özellikleri.

2.3.3.4. Tekrarlanabilirlik

Şekil 2.6'da [3] görüleceği üzere tekrarlanabilirlik, bir ölçümcü tarafından bir ölçüm cihazının birçok kez kullanılarak, aynı parçanın aynı karakteristiğini ölçerken elde edilen ölçümlerin değişkenliğidir [3].



Şekil 2.6 Tekrarlanabilirlik

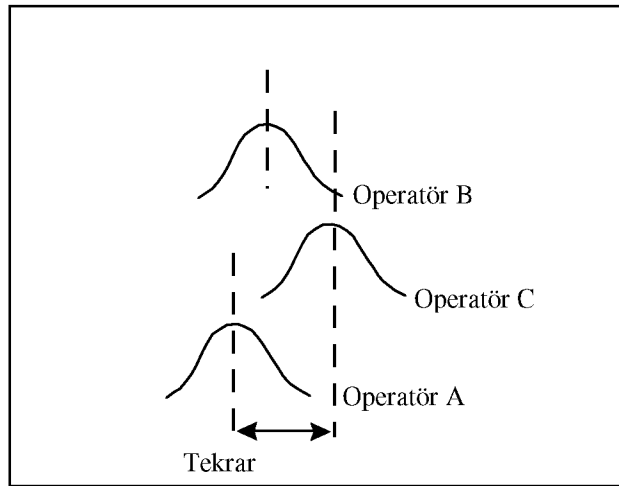
Ölçüm işleminin tekrarlanabilirliği, ölçüm sisteminin değişkenliğinin tutarlılığını gösterir. Aletin kendisinden kaynaklanan ölçüm farklılıkları ve parçanın alet içindeki pozisyon farklılıkları, genel tekrarlanabilirlik hatalarının sebepleridir. Bu farkların her ikisi de tekrarlanmış ölçümlerin alt grup aralığıyla (R) temsil edildiği için, aralık grafiği ölçüm işleminin tutarlılığını gösterecektir. Eğer aralık grafiği kontrol dışına çıkmışsa, genellikle ölçüm

sisteminin tutarlılığında bir sorun vardır. “Kontrol dışı” olarak belirlenmiş noktalarda tutarsızlığın özel sebepleri araştırılmalı ve düzeltilmelidir [7]. Tek istisna, ölçümlerin yetersiz ayırımı durumunda gerçekleşir.

Eğer aralık grafiği kontrol altındaysa, çalışmanın süresi boyunca ölçüm işlemi ve ölçüm cihazı değişkenliği tutarlıdır. Tekrarlanabilirlik standart sapması (ölçüm cihazı standart sapması) $\sigma_e = \frac{\bar{R}}{d_2^*}$, den tahmin edilebilir. \bar{R} tekrarlanmış ölçümlerin ortalama değişim aralığıdır. Ölçüm cihazı değişkenliği veya tekrarlanabilirlik; tekrarlanmış ölçümler ve ölçümcü sayısı–parça sayısı çarpımının 15’ten büyük olduğu varsayımından hareketle, $EV = 5.15 \times \frac{\bar{R}}{d_2^*}$ veya $4.56 \times \bar{R}$ olacaktır (5.15 ölçümlerin normal dağılımının %99’unu temsil eder). Burada d_2^* , 1.128’e eşittir ve EK.1’ de yer alan çizelgeden elde edilir [1].

2.3.3.5. Tekrar Yapılabilirlik

Şekil 2.7’de [3] görüleceği üzere tekrar yapılabilirlik, değişik ölçümcülerin aynı ölçüm cihazını kullanarak, aynı parçanın aynı karakteristiğini ölçerken elde ettikleri ölçümlerin ortalamalarının değişkenliğidir [3].



Şekil 2.7 Tekrar Yapılabilirlik

Ölçüm işleminin tekrar yapılabilirliği, ölçüm yapan kişilerin değişkenliğinin tutarlılığını gösterir. Ölçüm yapan kişinin değişkenliği, her ölçümcüye mal edilebilecek artan eğilimi gösterir. Eğer bu eğilim veya ölçümcü değişkenliği mevcutsa, ölçümcülerin bireysel toplam ortalaması farklı olacaktır. Bu durum, her parça için ölçümcü ortalamaları karşılaştırılarak Ortalama Kontrol Grafiğinden izlenebilir.

Ölçümcü değişkenliği veya tekrar yapılabilirlik, her ölçümcü için toplam ortalama belirlenerek ve daha sonra en büyük ölçümcü ortalamasından en küçük ölçümcü ortalaması çıkartılıp aralık (R_0) bulunarak kestirilebilir. Tekrar yapılabilirlik için standart sapma, $\sigma_0 = \frac{R_0}{d_2^*}$

formülü ile bulunabilir. Tekrar yapılabilirlik, $AV = 5.15 \times \frac{R_0}{d_2^*}$ olacaktır.

2.3.3.6. Parça Değişkenliği (Part to Part Variation)

Parça değişkenliği, ölçümü yapılan parçalar arasındaki değişkenliktir ve genellikle ortalama Kontrol Grafiğinde görülebilir [8]. Her ölçümcü için, alt grup ortalamaları (1. ölçüm ortalaması, 2. ölçüm ortalaması vb.) parçalar arası farkları yansıtır. Ortalama grafiğinde her ölçümcü açısından alt grup ortalamalarının %50'den fazlasının kontrol sınırlarının dışında olması istenir. Bunun anlamı parça değişkenliğinin ölçüm cihazından kaynaklanan değişkenlikten daha büyük olduğudur. Ancak böyle bir durumda ölçüm sistemi süreç kontrolü ve analiz için kabul edilebilirdir. Aksi durumda parça değişkenliği, tekrar yapılabilirlik değeri içinde saklıdır ve ölçüm değişkenliği süreç değişkenliğine baskındır. Eğer bu parçalar beklenen süreç değişkenliğini temsil etmesi için seçilmişse, ölçüm sistemi süreci analiz etme amacı için kabul edilemez.

Tam tersine, ortalamalar ne kadar çok sınırların dışına düşerse ve ölçümcüler parçaların hangilerinin toplam ortalamadan farklı olduğunda hemfikir olduğu sürece, ölçümler daha yararlı olacaktır. Eğer parça ortalamalarının büyük bir kısmı sınırların dışına taşarsa ve ölçümcüler hangi parçaların limitler dışına düştüğünde hemfikirlerse, ölçüm sistemi genellikle yeterli görülür [3]. Bu durumda \bar{X} grafiği, ölçüm sisteminin bağıl olarak parça ölçme açısından yeterlilik derecesini gösterir. Bazı durumlarda, bu hesaplama ölçüm sisteminin yeterli olup olmadığını görmek için yeterlidir.

Ölçüm sistemi yeterliyse (aralık grafiği kontrol altında) ve parça değişkenliği belirlenebiliyorsa (ortalama grafiğinde noktaların büyük kısmı kontrol sınırlarının dışında),

ölçüm sisteminden kaynaklanan süreç değişkenliği yüzdesi belirlenebilir. Ölçüm sistemi standart sapması (σ_m) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sigma_m = \sqrt{(\sigma_e^2 + \sigma_0^2)}$$

σ_e , ölçüm aleti standart sapması ve

σ_0 , ölçümcü standart sapmasıdır.

Parça standart sapması, ölçüm sistemi çalışması verilerinden saptanabilir [3]. Parça standart sapması (σ_p), her parçanın ortalaması hesaplanarak ve daha sonra örnek ortalamalarının aralığı (R_p) bulunarak kestirilebilir. Parça standart sapması, $\sigma_p = \frac{R_p}{d_2^*}$ değerinden bulunabilir.

Parça değişkenliği, $PV = 5.15 \times \frac{R_p}{d_2^*}$ olacaktır (5.15 normal dağılım için ölçümlerin %99'unu temsil edecektir). Genel bir uygulama olan beş parça içeren ölçümler için Parça Değişkenliği $PV = 2.08 \times R_p$ şeklinde hesaplanır.

Ölçüm sistemiyle ilgili, tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik süreç değişkenliği yüzdesi, genellikle %R&R olarak isimlendirilir ve $\frac{\sigma_m}{\sigma_t} \times 100$ şeklinde hesaplanır. σ_t , toplam süreç değişkenliği standart sapmasıdır. σ_t , çalışma değişkenliği standart sapması olarak bilinen ölçüm çalışmasından hesaplanır ve değeri

$$\sigma_t = \sqrt{(\sigma_p^2 + \sigma_m^2)} \text{ dir.}$$

Ölçüm sistemiyle ilgili, tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik tolerans yüzdesi

$$5.15 \times \left[\frac{\sigma_m}{\text{Tolerans}} \right] \times 100 \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

Ölçüm verilerinden yararlanılarak Farklı Veri Kategorileri Sayısı, $\frac{\sigma_p}{\sigma_m} \times 1.41$ veya

$$\frac{PV}{R \& R} \times 1.41 \text{ formüllerinden elde edilebilir.}$$

Eğer Farklı Veri Kategorileri Sayısı ikiden küçükse, ölçüm sistemi süreci kontrol etmek için yeterli değildir [3].

Eğer Farklı Veri Kategorileri Sayısı iki ise bu durum, verilerin iki gruba ayrılabilceği anlamına gelir ki bu da veriler sadece nitelik verisi olarak kullanılabilir demektir. Ölçüm sistemi süreci analizinde yeterli olabilmesi için, Farklı Veri Kategorileri Sayısı beş ve tercihen daha fazla olması gerekir [2].

Bundan dolayı, tolerans yüzdesi, süreç değişkenliği yüzdesi, ve farklı veri kategorileri sayısı, ölçüm sisteminin kabul edilebilirliğinin hesaplanmasında farklı ölçütlerdir.

2.4. Ölçüm Sistemi Analizi

2.4.1. Ölçüm Sistemi Değerlendirilmesinde Genel Kurallar

Bir ölçüm sisteminin değerlendirilmesinde birinci adım doğru değişkenin ölçüldüğünü doğrulamaktır. Eğer yanlış değişken ölçülüyorsa, ölçüm sisteminin ne kadar doğru veya hassas olduğu önemli değildir. Bu tür bir durum yarar sağlamaktan çok kaynakların tüketilmesi anlamına gelecektir.

Bir sonraki adım ölçüm sisteminin kabul edilebilir olması için hangi istatistiksel özelliklere sahip olduğunu belirlemektir. Bu belirlemeyi yapmak için, verilerin nasıl kullanılacağını bilmek önemlidir. Bunu bilmeden, uygun istatistiksel özellikler belirlenemez. İstatistiksel özellikler belirlendikten sonra ölçüm sisteminin bu özelliklere zaten sahip olup olmadığını değerlendirmek gerekir.

Ölçüm sisteminin değerlendirilmesi genellikle Safha 1 ve Safha 2 olarak adlandırılan iki safhada yapılır. Safha 1’ de, ölçüm sürecini anlamak ve ihtiyaçları karşılayıp karşılamayacağını belirlemek gerekir. Safha 1 testinin iki hedefi vardır. Birincisi ölçüm sisteminin ihtiyaç duyulan istatistiksel özelliklere sahip olup olmadığını belirlemektir. Bu tip testler ölçüm sistemi kullanılmaya başlanmadan önce gerçekleştirilmelidir. Eğer test, ölçüm sisteminin uygun özelliklere sahip olduğunu gösterirse, sistem amaçlanan kullanım için kabul edilebilir sayılır ve kullanılabilir. Diğer taraftan, eğer ölçüm sisteminin doğru özelliklere sahip olmadığını görüyorsa, bu ölçüm sistemi kullanılmamalıdır [3].

Safha 1 testinin ikinci hedefi, hangi çevresel faktörlerin ölçüm sistemi üzerinde kayda değer bir etkisi olduğunu keşfetmektir. Örneğin Safha 1 testi, ortam sıcaklığı faktörlerden birisi olmak üzere, değişik seviyelerde çeşitli çevresel faktörler belirlemiş olsun. Eğer Safha 1 testi, ortam sıcaklığının ölçümlerin kalitesini belirgin bir şekilde etkilediğini gösterirse, ölçüm sisteminin atmosfer kontrollü bir ortamda uygulanması seçilebilir. Diğer taraftan, eğer test ortam sıcaklığının fark edilebilir bir etkisi olmadığını gösterirse, ölçüm sistemi kaygı duyulmadan kullanılabilir.

Safha 2 testinin hedefi, kabul edilebilir olarak gözükken bir ölçüm sisteminin uygun istatistiksel özelliklere sahip olup olmadığını belirlemektir. “Ölçüm R&R” olarak adlandırılan çalışma Safha 2 testinin bir biçimidir. Safha 2 testi sık sık normal kalibrasyon programı ve bakım programının rutin bir bölümü olarak gerçekleştirilir, fakat bunlardan bağımsız olarak da yapılabilir.

2.4.2. Ölçüm Sistemi Analiz Çalışması İçin Hazırlık

Her çalışma veya analizde olduğu gibi, ölçüm sistemi analizinden önce de yeterli planlama ve hazırlık yapılmalıdır. Çalışmadan önce yapılması gereken tipik bir hazırlık aşağıda yer almaktadır:

- 1) Kullanılacak yaklaşım tarzı belirlenmiş olmalıdır. Örneğin, eğer cihazı kalibre etmede veya kullanmada ölçümcü etkisi varsa, bu durum gözlemler veya ölçüm cihazı çalışması kullanılarak belirlenmelidir. Bir düğmeye basıldığında sadece bir rakam ölçülmesi gibi tekrar yapılabilirliğin etkisinin yok farz edilebileceği bazı ölçüm sistemleri vardır.
- 2) Ölçümcülerin sayısı, örnek parçaların sayısı ve tekrar eden okumaların sayısı belirlenmiş olmalıdır. Bu seçimde göz önüne alınacak faktörler:
 - a. **Boyutların kritikliği:** Kritik boyutlar daha fazla parça ve/veya deneme gerektirir. Nedeni, ölçüm aleti çalışmasında ulaşılmak istenen güvenilirlik derecesidir.
 - b. **Parça düzeni:** İri veya ağır parçalar daha az örnek ve daha fazla deneme gerektirir.
- 3) Amaç bütün ölçüm sistemini değerlendirmek olduğu için ölçümcüler, ölçüm aletini normalde kullananlar arasından seçilmelidir.
- 4) Örnek parçalar, üretim sürecinden seçilmelidir ve bütün çalışma aralığını temsil etmelidir. Parçaların analizde üretimde yer alan bütün ürün varyasyon aralığını temsil etmesi gerektiğinden, birkaç gün boyunca gün başına bir örnek alınmalıdır. Ölçülecek parçaların, tanımlanabilmeleri için numaralandırılması yararlı olacaktır.
- 5) Ölçüm aletinin, ölçülecek karakteristiğinin beklenen süreç değişkenliğinin en az onda birini direkt olarak okuyabilecek alt birimleri olmalıdır. Örneğin, parça karakteristiğinin değişkenliği 0.001 ise, alet 0.0001 değişimi okuyabilir olmalıdır.

- 6) Ölçüm metodunun (ölçümcü ve ölçüm aleti) parça karakteristiğini ölçtüğünden ve ölçüm prosedürünü uyguladığından emin olunmalıdır.

Bir analizin yürütülme usulü de çok önemlidir. Yanıltıcı sonuçlar olasılığını en aza indirmek için şu basamaklar takip edilmelidir:

- 1) Oluşabilecek değişimlerin çalışma boyunca rastgele dağılabilmesi için, ölçümlerin rastgele bir sırayla yapılması gerekir. Haberli olmaktan doğabilecek eğilimleri engellemek için, ölçümcülerin, hangi numaralı parçanın kontrol edildiğinden habersiz olmaları gerekir. Fakat çalışmayı yürüten kişinin hangi numaralı parçanın incelendiğini bilmesi ve verileri, Ölçümcü A, Parça 1, ilk deneme; Ölçümcü B, Parça 4, ikinci deneme, şeklinde kaydetmesi gerekir.
- 2) Ölçüm aletini okurken, okumalar elde edilebilecek en yakın rakama yuvarlanmalıdır. Eğer mümkünse, okumalar en küçük derecenin yarısı şeklinde yapılmalıdır. Örneğin, en küçük derece 0.0001 ise, her okuma tahmin edilirken en yakın 0.00005 değere yuvarlanmalıdır.
- 3) Çalışma, geçerli bir çalışmayı yürütürken gereken dikkatin önemini kavramış bir kişi tarafından gözlemlenmelidir.

Her ölçümcü, okumaları yaparken, bütün adımları içeren aynı prosedürü izlemelidir.

2.4.3. Test Yönteminin Seçilmesi/Geliştirilmesi

Ölçüm sistemlerinin değerlendirmesi için birçok uygun yöntem vardır. Hangi yöntemin kullanılacağına seçimi, değerlendirilecek her ölçüm sisteminin durumuna göre belirlenmesi gereken birçok faktöre bağlıdır. Bazı durumlarda, yöntemin belirli bir ölçüm sistemine uygun olup olmadığını belirlemek için bir hazırlık testi gerekebilir. Bu tür bir hazırlık testi önceki kısımda anlatılan Safha 1 testinin ayrılmaz bir parçası olmalıdır.

Bir değerlendirme yöntemi seçilirken ve geliştirilirken göz önüne alınması gereken noktalar:

- 1) Ulusal Standartlara kadar izlenebilir olan master standartlar testte kullanılmalı mı ve eğer böyle bir şey gerekliyse, ne seviyedeki master standartlar uygundur? Master standartlar bir ölçüm sisteminin doğruluğunun değerlendirilmesi için sık sık gereklidir. Eğer master standartlar kullanılmazsa, ölçüm sisteminin değişkenliği hala değerlendirilebilir, fakat doğruluğunu kabul edilebilir bir güvenilirlikle

değerlendirmek mümkün olmayabilir. Bu tür bir güvenilirlik eksikliği göz önüne alınması gereken bir nokta olabilir.

- 2) Devam eden bir Safha 2 testi için, kör ölçümlerin kullanımı göz önüne alınmalıdır. Kör ölçümler, o anki ölçüm ortamında ölçüm sisteminin değerlendirildiğini bilmeyen bir operatör tarafından elde edilen ölçümlerdir. Uygun bir şekilde yönetildiğinde, kör ölçümlere dayandırılmış testler genellikle *Hawthorne Etkisi*¹ 'ne maruz kalmaz.
- 3) Testin maliyeti.
- 4) Test için gereken zaman.
- 5) Genel olarak kabul görmüş fakat tanımı olmayan herhangi bir terim, daha iyi anlaşılması için tanımlanmalıdır. Böyle terimlere örnek olarak; doğruluk, kesinlik, tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik verilebilir.
- 6) Devam eden ölçüm sisteminden elde edilen ölçümler, başka bir sistemin ölçümleriyle karşılaştırılacak mı? Eğer karşılaştırılacaksa, 1. basamakta anlatılan master standartlara dayanan test yöntemlerinin kullanılmasına önem verilmelidir. Eğer master standartlar kullanılmazsa, bu iki ölçüm sisteminin beraber iyi çalışıp çalışmadığının belirlenmesi halen mümkün olabilir. Fakat, sistemler beraber iyi çalışmıyorsa, standartlar kullanılmadan hangi sistemin geliştirilmesi gerektiğinin belirlenmesi mümkün olmayabilir.
- 7) Safha 2 testi hangi sıklıkta gerçekleştirilmelidir? Bu karar, ölçüm sisteminin istatistiksel özellikleri, doğacak sonuçlar ve üretim sürecinin müşterisi göz önüne alınarak verilmelidir.

2.4.4. Örnek Büyüklüğü Seçilmesi

Ölçüm Sistem Analizi çalışmalarında, analiz için alınacak örnek büyüklüğünün genellikle 10 parçadan oluşması önerilir [3]. Bununla birlikte, çalışmada Varyans Analizi Metodu kullanılması planlanıyorsa, gözlem yeterliliğine dair α (Üretici Riski) ve β (Tüketici Riski) tipi hataları da esas alan istatistiksel yaklaşımlardan yararlanılması gerekebilir. α ve β tipi hataların hatanın bilinmesi işletmeler açısından önemlidir, çünkü yapılan ölçüm hataları

¹ Kasım 1924 ve Ağustos 1932 arasında, Western Electric'in Hawthorne İşleri'nde gerçekleştirilen bir dizi endüstriyel deneylerde araştırmacılar, sistematik olarak beş montajcının çalışma şartlarını modifiye etmiş ve sonuçları yansıtmışlardır. Çalışma şartları iyileştirildikçe üretim artmıştır. Bununla birlikte, çalışma şartları kötüleştirildiğinde, üretim gelişmeye devam etmiştir. Bunun sebebi, çalışma şartlarının değişmiş olması değil, işçilerin araştırmacının (deneyin) bir parçası olmaları gibi daha pozitif bir bakış açısına sahip olmalarıdır [16].

sonucunda yanlış sınıflandırılan üretim parçalarının üretici ve tüketici için oluşturduğu risklerin bilinmesi yararlıdır [11].

Gerçek üretim değişkenliği (σ_g)²'nin ve ölçüm değişkenliği (σ_m)²'nin tanımlanması ve hesaplanmasından sonra α ve β hataları hesaplanabilir. α ve β tipi hataların belirlenmesi açısından, Ek 4'de verilen ve H.R. Singh tarafından hazırlanmış olan "Test ve Spesifikasyon Sınırlarının Çeşitli Değerleri İçin Üretici ve Tüketici Riskleri ve Ölçüm Hataları" isimli tablo kullanılabilir. Tablonun kullanılabilmesi için gerekli hesaplamalar ve varsayımlar aşağıda verilmiştir [11]:

$$k_1 = \frac{(\mu - ASS)}{\sigma_g} \quad \begin{array}{l} ASS : \text{Alt Spesifikasyon Sınırı} \\ ÜSS : \text{Üst Spesifikasyon Sınırı} \end{array}$$

$$k_2 = \frac{(\dot{ÜSS} - \mu)}{\sigma_g} \quad k_1, k_2 : \text{Spesifikasyon katsayıları}$$

Test sınırlarının spesifikasyon sınırlarından $b_1\sigma_m$ ve $b_2\sigma_m$ kadar içerde olduğu düşünülerek test sınırları ve σ_g 'nin σ_m 'ye oranını belirleyen (r) katsayısı aşağıdaki gibi olacaktır:

$$ATS = -(k_1 \cdot \sigma_g - b_1 \cdot \sigma_m) \quad \begin{array}{l} ATS : \text{Alt Test Sınırı} \\ ÜTS : \text{Üst Test Sınırı} \end{array}$$

$$UTS = -(k_2 \cdot \sigma_g - b_2 \cdot \sigma_m) \quad b_1, b_2 : \text{Test katsayıları}$$

$$r = \frac{\sigma_g}{\sigma_m}$$

α ve β risklerinin elde edilmesinden sonra, ölçüm sisteminin deney tasarımı yöntemini içeren Varyans Analizi Metodu ile analiz edilmesinde kullanılacak örnek büyüklüğünün, klasik Ölçüm Sistemi Analizinde önerilen örnek büyüklüğü ile karşılaştırılarak yeterliliğinin araştırılması ve bir kabul planı oluşturulması için üretici ve tüketici riski hatalı oranlarının tanımlanması gerekir. Üretici riski hatalı oranı, kabul edilebilir kalite düzeyi olarak tanımlanır ve genellikle p_1 ile gösterilir. Tüketici riski hatalı oranı, kabul edilemez kalite düzeyi olarak tanımlanır ve genellikle p_2 ile gösterilir [11].

α , β , p_1 ve p_2 değerlerinin belirlenmesinden sonra, ölçüm sisteminin Varyans Analizi Metodu ile analiz edilmesinde kullanılacak örnek büyüklüğünün olması gereken değerinin hesaplanması ve kabul planının oluşturulması için (n) değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [11]:

$$n = \left(\frac{z_\alpha + z_\beta}{z_{p_1} - z_{p_2}} \right)^2$$

Buradaki z değerleri Ek 3’ de verilen “z Dağılım Tablosu”ndan bulunabilir.

2.4.5. Nicelik Verileri Açısından Sistem Analizi

Nicel ölçüm cihazı çalışması, birçok sayıda değişik teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu tekniklerden en geçerli olan üç tanesi aşağıda sıralanmaktadır;

- 1) Aralık metodu,
- 2) Ortalama ve Aralık metodu (Kontrol Grafiği metodunu da içerir),
- 3) ANOVA metodu.

Aralık metodu hariç, anlatılacak diğer metotlar için veri tasarımı benzerdir. Bütün metotlar parça-İçi farklılıkları (yuvarlaklığın tutmaması, çapın gittikçe azalması, düzlüğün tutmaması, vb) yapılan analizlerde göz ardı eder. Yine, Aralık metodu hariç bütün çalışma tekniklerinde kullanılan temel ölçüm cihazı veri sayfası, parça-İçi farklılıkların tanımı ve istatistiksel ölçümleri dahil edilerek genişletilebilir. Ancak bu işler, veri toplama işini ağırlaştırdığından endüstriyel uygulamalarda genellikle yapılmaz.

Bundan dolayı, burada bahsedilen tekniklerin herhangi birinde kullanılan örnek parçalar ölçüm cihazı çalışmasından önce, maksimum parça-İçi farklılıklar (örneğin, parçanın, yuvarlaklığı için 360° döndürülmesi, çap azalması için en alt ve en üst noktalarda çapın kontrol edilmesi, vb) açısından kontrol edilerek örneklenebilirler. Eğer maksimum parça-İçi farklılıklar, kontrol edilen özellik için göz ardı edilebilecekten daha fazla ise, parçaların ölçülecek nokta/konum/pozisyonu açıkça görülebilecek şekilde işaretlenmelidir. Bu işlem, parça-İçi değişkenliğini ölçüm cihazı tekrarlanabilirlik değişkenliğinden ayırır. Aksi takdirde, ölçüm cihazı değişkenliği içinde bir kısım parça-İçi değişkenliğinin bulunduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

Bununla birlikte, bütün ölçüm sisteminin sadece ölçüm cihazını ve onun doğruluğunu vb. değil, aynı zamanda kontrol edilen parçanın değişkenliğini de içerdiğini tekrar vurgulamak gerekir. Eğer özel amaçlı bir nedeni yoksa parça-İçi farklılıkların çalışmanın dışına çıkarılmasına genellikle engel olmak gerekir. Parçadaki farklılıkların nasıl ele alınacağına belirlenmesi, parçanın kullanım amacı ve ölçüm amacının mantık çizgisine oturtulmalıdır.

2.4.5.1. Aralık Metodu

Aralık metodu, ölçüm değişkenliğini hızlı bir şekilde tahmin etmeyi sağlayan uyarlanmış bir nicel (değişken) ölçüm aleti çalışmasıdır. Bu yöntem sadece, ölçüm sisteminin

genel bir resminin çıkartılmasını sağlar. Değişkenlik, tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik şeklinde ayrıştırılmaz.

Aralık metodu çalışmasında basit olarak iki ölçümcü ve beş parça kullanır. Bu çalışmada, her iki ölçümcü her parçayı birer kere ölçer. Her parça için aralık değeri, Ölçümcü A ve Ölçümcü B' nin elde ettikleri değerlerin mutlak farkıdır. Aralıkların toplamından ortalama aralık (\bar{R}) değeri bulunur. Toplam ölçüm değişkenliği, ortalama aralık değeri, $\frac{5.15}{d_2^*}$ ile çarpılarak hesaplanır (d_2^* , m=2 ve g=parça sayısı için EK.1'de yer alan tablodan bulunur, 5.15 ölçümlerin normal dağılımının %99'unu temsil eder).

İlgilenilen diğer bir konu, süreç değişkenliğinin (veya tolerans) yüzde kaçını ölçüm değişkenliğinin oluşturduğudur (R&R' yi yüzdeye çevirmek için 100 ile çarpılıp süreç değişkenliğine (veya tolerans) bölünür).

$$\%R \& R = \frac{R \& R}{\text{Proses Varyansı}} \times 100$$

2.4.5.2. Ortalama ve Aralık Metodu

Ortalama ve Aralık metodu ($\bar{X}-R$), bir ölçüm sistemi için tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik değerlerinin tahmin edilmesini sağlayan matematiksel bir metottur. Aralık metodundan farklı olarak bu metot, ölçüm sisteminin tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik şeklinde iki ayrı bileşene ayrılmasını sağlar, fakat birbirleriyle olan etkileşimlerini vermez. ANOVA (varyans analizi) metodu ölçüm cihazı ve ölçümcü arasındaki bu etkileşimi belirlemek için kullanılabilir. Fakat Aralık ve ANOVA metotlarının her ikisi de, ölçüm sistemi ve ölçüm cihazı hatalarının sebeplerini göz önüne alarak bilgi sağlar.

Eğer tekrarlanabilirlik, tekrar yapılabilirliğe göre büyükse, nedenleri şu şekilde sıralanabilir [1, 3, 9, 10]:

- 1) Cihazların bakıma ihtiyacı vardır.
- 2) Ölçüm aletleri, daha sağlam olması için yeniden tasarlanmalıdır.
- 3) Ölçüm için gereken mengene ve lokasyon geliştirilmelidir.
- 4) Çok fazla, parça-içi farklılık vardır.

Eğer tekrar yapılabilirlik, tekrarlanabilirliğe göre daha büyükse, nedenleri şu şekilde sıralanabilir [1, 3, 9, 10]:

- 1) Ölçümcü, ölçüm aletini kullanma ve okuma konularında daha iyi eğitilmelidir
- 2) Ölçüm aleti kadranındaki kalibrasyon net değildir.
- 3) Ölçümcünün, ölçüm aletini sürekli olarak kullanmasına yardımcı olması için bazı sabit tezgahlara ihtiyaç duyulabilir.

Çalışmanın yapılması için izlenebilecek ana hatlar aşağıda yer almaktadır:

- 1) Gerçek veya beklenen süreç değişkenliğini temsil eden 10 parça elde edilir.
- 2) Ölçümcüler A, B ve C olarak adlandırılır ve parçalar 1'den 10'a kadar numaralanır. Numaraları ölçümcülerin görmemesi önemlidir.
- 3) Eğer normal ölçüm prosedürünün bir parçasıysa, ölçüm cihazı kalibre edilir. Aksi takdirde kalibrasyon zamanı gelmemiş bir cihaz için bu işlem gerekli değildir.
- 4) Ölçümcü A' nın 10 parçayı da rasgele bir sırada ölçmesi sağlanır ve başka bir gözlemci bu sonuçları Çizelge 2.1' de 1. satıra yazar. Ölçümcü B ve C' nin aynı 10 parçayı, birbirlerinin okumalarını göremeyecek şekilde, ölçmesi sağlanır. Bu sonuçlar sırasıyla 6. ve 11. Satıra yazılır.
- 5) Bu ölçümler başka rasgele bir ölçüm sırası için tekrarlanır. Veriler sırasıyla 2., 7. ve 12. satıra ve karşılık gelen kolona yazılır. Örneğin, eğer ilk örnek "Parça 7" diye ölçülmüşse, sonuç "Parça 7" adlı kolona yazılır. Eğer 3 deneme yapmak gerekiyorsa, çevrim tekrarlanır ve veriler 3., 8. ve 13. sıralara yazılır.
- 6) Parçalar büyükse veya parçalar aynı anda uygun değilse, 4. ve 5. basamakları aşağıdakiyle değiştirmek gerekir:
 - a. Ölçümcü A birinci parçayı ölçer ve sonuç 1. satıra yazılır. Ölçümcü B birinci parçayı ölçer ve sonuç 6. satıra yazılır. Ölçümcü C birinci parçayı ölçer ve sonuç 11. satıra yazılır.
 - b. Ölçümcü A birinci parça için okumayı tekrarlamalı ve sonuç 2. satıra yazılmalı, Ölçümcü B' nin sonucu 7. satıra ve Ölçümcü C' nin sonucu 12. satıra yazılmalıdır. Eğer üçüncü deneme gerekiyorsa, çevirim tekrarlanmalı ve veriler sırasıyla 3., 8. ve 13. sıralara yazılmalıdır.

- 7) Eğer ölçümcüler ayrı vardiyalarda çalışıyorlarsa, alternatif bir metot kullanılabilir. Ölçümcü A 10 parçayı ölçer ve veriler 1. satıra yazılır. Daha sonra Ölçümcü A parçaları değişik bir sırada tekrar ölçer ve sonuçlar 2. ve 3. satıra yazılır. Aynısını Ölçümcü B ve C için tekrarlanır.

Çizelge 2.1 Ölçüm Aleti Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Veri Sayfası

ÖLÇÜMCÜ/ DENEME #	PARÇA										ORTALAMA	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1. A 1												
2. 2												
3. 3												
4. Ort.												$\bar{X}_a =$
5. R												$\bar{R}_a =$
6. B 1												
7. 2												
8. 3												
9. Ort.												$\bar{X}_b =$
10. R												$\bar{R}_b =$
11. C 1												
12. 2												
13. 3												
14. Ort.												$\bar{X}_c =$
15. R												$\bar{R}_c =$
16. Parça Ort. (\bar{X}_p)												$\bar{\bar{X}} =$
												$R_p =$
17.	$[(\bar{R}_a) + (\bar{R}_b) + (\bar{R}_c)] / (\text{Ölçümcü Sayısı}) =$											$\bar{\bar{R}} =$
18.	$(\text{Max } \bar{X}) - (\text{Min } \bar{X}) =$											$\bar{X}_{DIFF} =$
19.	$(\bar{\bar{R}}) \times (D_4) =$											$UKL_R =$
20.	$(\bar{\bar{R}}) \times (D_3) =$											$AKL_R =$
2 deneme için $D_4=3.27$ ve 3 deneme için $D_4=2.58$ dir. 7 denemeye kadar $D_3=0$ dir. UKL_R , bireyin R' sinin (Aralığının) üst limitini temsil eder. Bu limitin üzerinde olanları daire içine alın, nedenini tespit edin ve düzeltin. Bu okumaları aynı ölçümcüyü ve birimi kullanarak tekrarlayın veya bu değerleri iptal edip, geri kalan gözlemlerden Ortalama Aralık ve limit değerleri tekrar hesaplayın.												
Notlar:												

A. Ortalama–Aralık Metodu Sonuçlarının Sayısal Analizi

Ölçüm cihazı Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik hesaplamaları Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de gösterilmiştir. Çizelge 2.1, bütün çalışma sonuçlarının gösterildiği veri sayfasıdır. Çizelge 2.2, girilmesi gereken bütün tanımlama bilgilerini ve verilen formüllere göre yapılan bütün hesaplamaları gösteren bir rapor sayfasıdır.

Veriler toplandıktan sonra hesaplamaların yapılma yöntemi şöyledir:

- 1) 1., 2., ve 3. satırlarda, aynı kolondaki okumaların en küçüğü en büyüğünden çıkartılır, ve sonuç 5. satıra, aynı kolona yazılır. Aynı işlem 6., 7., 8. ve 11., 12., 13. satırlar için de yapılır ve sonuçlar sırasıyla 10. ve 15. satıra girilir (Çizelge 2.1)
- 2) 5., 10. ve 15. satırlardaki girişler pozitif değerler olarak ayarlanır (Çizelge 2.1)
- 3) Birinci ölçümcünün denemelerinin aralık ortalaması \bar{R}_a ’ yi bulmak için, 5. satır toplanır ve toplam örnek parça sayısına bölünür. Aynı işlem \bar{R}_b ve \bar{R}_c ’ yi bulmak için 10. ve 15. satırlarda tekrarlanır (Çizelge 2.1)
- 4) 5, 10 ve 15. satırların ortalamaları (\bar{R}_a , \bar{R}_b , \bar{R}_c) 17. satıra aktarılır. Bunlar toplanır, ölçümcü sayısına bölünür ve sonuç $\bar{\bar{R}}$ (bütün aralıkların ortalaması) olarak yazılır (Çizelge 2.1)
- 5) $\bar{\bar{R}}$ (ortalama değer) 19. ve 20. satıra yazılır. Alt (AKL_R) ve Üst (UKL_R) kontrol sınırlarını bulmak için $\bar{\bar{R}}$, D₃ ve D₄ (Çizelge 2.1’ den veya EK.2’ de yer alan tablodan) ile çarpılır. Üst Kontrol Limitinin (UKL_R) değeri 19. satıra girilir. Yediden az denemeler için Alt Kontrol Limitinin(AKL_R) değeri sıfırdır (Çizelge 2.1)
- 6) Hesaplanan UKL_R değerinden daha büyük aralık oluşturan okumalar, aynı ölçümcü ve aynı örnek parça kullanılarak tekrarlanır veya bu değerler atılarak ortalama tekrar alınır ve bütün aralıkların ortalaması $\bar{\bar{R}}$ ve limit değeri UKL_R, düzeltilmiş yeni okumalara göre tekrar hesaplanır. Kontrol dışına çıkma durumunu yaratan özel sebepler düzeltilir. Eğer daha önce bahsedildiği gibi veriler bir Kontrol Grafiği kullanılarak çizilmiş ve analiz edilmişse, yukarıdaki durum zaten düzeltilmiştir ve oluşmayacaktır.
- 7) Satırlar (1, 2, 3, 6, 7, 8, 11, 12 ve 13) toplanır. Her satırın kendi toplamı örnek parça sayısına bölünür ve bu değerler, en sağdaki “ortalama” sütununa yazılır (Çizelge 2.1)

- 8) 1, 2 ve 3. satırlardaki ortalamalar toplanır, deneme sayısına bölünür ve elde edilen değer 4. satırda en sağ sütunda \bar{X}_a hanesine yazılır. Bu 6, 7, 8 ve 11, 12, 13. satırlar için tekrarlanır ve sonuçlar sırasıyla 9. ve 14. satırlardaki \bar{X}_b ve \bar{X}_c hanelerine yazılır (Çizelge 2.1)
- 9) 4, 9 ve 14. satırlardaki ortalama değerlerinin en küçük ve en büyüğü, 18. satırda ayrılmış olan yerlere yazılır ve farkları belirlenir. Bu fark, 18. satırın en sağındaki \bar{X}_{DIFF} hanesine yazılır. (Çizelge 2.1)
- 10) Parça ortalamalarını bulmak için, her parçanın bütün ölçümcüler tarafından elde edilen ölçüm değerleri toplanır ve ölçüm sayısına (deneme sayısı–ölçümcü sayısı çarpımına) bölünür. Sonuç 16. satırda parça ortalamaları için ayrılmış hanelere yazılır (Çizelge 2.1)
- 11) En küçük parça ortalaması en büyük parça ortalamasından çıkartılır ve sonuç 16. satırda R_p hanesine yazılır. R_p parça ortalamaları aralığıdır (Çizelge 2.1)
- 12) Hesaplanan \bar{R} , \bar{X}_{DIFF} ve R_p değerleri formun rapor kısmında ayrılmış olan boşluklara aktarılır (Çizelge 2.2)
- 13) Hesaplamalar, formun sol tarafında “Ölçüm Birim Analizi” başlıklı sütun altında gerçekleştirilir (Çizelge 2.2)
- 14) Yüzde hesaplamaları, formun sağ tarafında “% Toplam Değişkenlik” başlıklı sütun altında gerçekleştirilir (Çizelge 2.2)
- 15) Bir hata yapılmadığından emin olmak için sonuçlar kontrol edilir.

Çizelge 2.2 Ölçüm Aleti Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Raporu

Parça No ve İsmi:			Cihaz İsmi:		Ölçümcü A:	
Karakteristik:			Cihaz No:		Ölçümcü B:	
Tanım:			Cihaz Tipi:		Ölçümcü C:	
\bar{R}	\bar{X}_{DIFF}	R_p	Deneme Sayısı (r)	Parça Sayısı (n)	Ölçümcü Sayısı (k)	Tarih

Ölçüm Analizi				% Toplam Değişkenlik (TV)	
Tekrarlanabilirlik – Ekipman Değişkenliği (EV)					
EV	$= \bar{R} \times K_1$	Deneme	K₁	% EV	= 100 (EV/TV)
	=	2	4.56		=
	=	3	3.05		=
Tekrar Yapılabilirlik – Ölçümcü Değişkenliği (AV)					
AV	$= \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2 / n \cdot r)}$			% AV	= 100 (AV/TV)
	$= \sqrt{(___ \times ___)^2 - [___ / (___ \cdot ___)]}$				=
	=	Ölçümcü	2	3	=
		K ₂	3.65	2.70	
Tekrarlanabilirlik & Tekrar Yapılabilirlik (R & R)					
R & R	$= \sqrt{EV^2 + AV^2}$	Parça S	K₃	% R&R	= 100 (R&R/TV)
	$= \sqrt{___ + ___}$	2	3.65		=
	=	3	2.70		=
Parça – Parçaya Değişkenliği (PV)					
PV	$= R_p \times K_3$	4	2.30	% PV	= 100 (PV/TV)
	=	5	2.08		=
	=	6	1.93		=
	=	7	1.82		=
Toplam Değişkenlik (TV)					
TV	$= \sqrt{R \& R^2 + PV^2}$	8	1.74	Farklı Kategori Sayısı (ndc)	
	$= \sqrt{___ + ___}$	9	1.67	ndc	= 1.41 (PV/R&R)
	=	10	1.62		=

Bütün hesaplamalar 5.15 sigma tahminine dayalıdır (Normal dağılım eğrisinin altında kalan alanın % 99' u)

K₁: 5.15/d₂^{*} ye eşittir. d₂^{*}, deneme sayısına (m) ve (parça sayısı x ölçümcü sayısı)' na (g) bağlıdır ve bu değer 15' den büyük olarak kabul edilmiştir.

AV – Eğer karekök içindeki sayı negatif ise, ölçümcü değişkenliği (AV) sıfır (0) olarak alınır.

K₂: 5.15/d₂^{*} ye eşittir. d₂^{*}, ölçümcü sayısı (m) ve (g)' ye bağlıdır (sadece bir aralık hesaplaması olduğundan g=1)

K₃: 5.15/d₂^{*} ye eşittir. d₂^{*}, parça sayısı (m) ve (g)' ye bağlıdır (sadece bir aralık hesaplaması olduğundan g=1)

Ölçüm Cihazı Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Veri Sayfası ve Rapor Formu (Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2), çalışma verilerinin nümerik analizi için bir yöntem sağlar. Analizler, ölçüm sisteminin tamamı için değişkenlik ve süreç değişkenliği yüzdesi, ve onun bileşenleri olan tekrarlanabilirlik, tekrar yapılabilirlik değişkenliğini, ve Parça değişkenliğini tahmin eder. Bu bilgiler grafiksel analiz sonuçları ile karşılaştırılmalı ve sonuçları tamamlamalıdır.

Formun (Çizelge 2.2) sol tarafında, Ölçüm Birim Analizi kolonu altında, değişkenliğin her komponenti için normal dağılım eğrisinin altında kalan alanın %99' unu kapsayan 5.15 standart sapma dağılımı hesaplanır.

Tekrarlanabilirlik veya ekipman değişkenliği (EV), ortalama aralığın (\bar{R}), (K_1) katsayısıyla çarpımı ile bulunur. K_1 , ölçüm cihazı çalışmasında kullanılan deneme sayısına bağlıdır ve $\frac{5.15}{d_2^*}$ denkleminde hesaplanır. d_2^* , EK.1' de yer alan tablodan bulunur. Bu değer, deneme sayısı (m) ve parça sayısı-ölçümcü sayısı (g) çarpımına bağlıdır.

Tekrar yapılabilirlik veya ölçümcü değişkenliği (AV), maksimum ortalama ölçümcü farkı (\bar{X}_{DIFF})'nin, (K_2) katsayısıyla çarpımı ile belirlenir. K_2 , ölçüm cihazı çalışmasında kullanılan ölçümcü sayısına bağlıdır ve $\frac{5.15}{d_2^*}$ denkleminde hesaplanır. d_2^* , EK.1' de yer alan tablodan bulunur ve ölçümcü sayısına (m) ve g' ye (aralık hesaplamasına göre değişir, genelde 1' dir) bağlıdır.

Ölçümcü değişkenliği, ekipman değişkenliğini de içerdiğinden, ekipman değişkenliğinin bir kısmı çıkartılarak düzeltilmelidir. Böylece, ölçümcü değişkenliği (AV) şöyle hesaplanır:

$$AV = \sqrt{\left(\bar{X}_{DIFF} \times K_2\right)^2 - \left[\frac{(EV)^2}{n \times r}\right]}$$

(n) parça sayısı ve (r) deneme sayısıdır. Eğer karekök içinde negatif bir sayı hesaplanırsa, ölçümcü değişkenliği (AV) sıfır (0) olarak kabul edilir.

Tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik (R&R) aşağıdaki şekilde, ekipman değişkenliği ve ölçümcü değişkenliğinin karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplanır:

$$R \& R = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2}$$

Parça değişkenliği (PV), parça ortalamaları aralığının (R_p), (K_3) katsayısıyla çarpımı ile belirlenir. K_3 , ölçüm cihazı çalışmasında kullanılan parça sayısına bağlıdır ve $\frac{5.15}{d_2^*}$ denkleminde hesaplanır. d_2^* , EK.1' de yer alan tablodan bulunur ve parça sayısına (m) ve g' ye (aralık hesaplamasına göre değişir, genelde 1' dir) bağlıdır.

Toplam değişkenlik (TV), tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabirlik değişkenliği (R&R) ve Parça değişkenliğinin (PV) karelerinin toplamının karekökü alınarak hesaplanır.

$$TV = \sqrt{(R \& R)^2 + (PV)^2}$$

Eğer süreç değişkenliği biliniyorsa ve değeri $6\sigma'$ ya dayandırılmışsa, ölçüm cihazı çalışması verilerinden hesaplanan toplam çalışma değişkenliği (TV) yerine kullanılabilir. Bu durumda, şu iki hesaplama yapılmalıdır:

$$TV = 5.15 \times \left(\frac{\sigma_{proses}}{6} \right)$$

$$PV = \sqrt{(TV)^2 - (R \& R)^2}$$

Her iki değer de (TV ve PV) daha önce hesaplananların yerine geçecektir.

Ölçüm cihazı çalışmasında her faktör için değişkenlik bir kez hesaplandıktan sonra, toplam değişkenlikle (TV) karşılaştırılması yapılabilir. Bu, ölçüm cihazı rapor formunun (Bkz. Çizelge 3.2) sağ tarafında "Toplam Değişkenlik %" kolonu altındaki hesaplamalar yapılarak gerçekleştirilir.

Ekipman değişkenliği yüzdesi (%EV), $\left(\frac{EV}{TV} \right) \times 100$ formülünden hesaplanır. Diğer faktörlerin toplam değişkenlik içinde yüzdeleri de benzer şekilde hesaplanır:

$$\%AV = \left(\frac{AV}{TV} \right) \times 100$$

$$\%R \& R = \left(\frac{R \& R}{TV} \right) \times 100$$

$$\%PV = \left(\frac{PV}{TV} \right) \times 100$$

Ölçüm cihazı tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirliğin (%R&R) kabulü için ana hatlar şu şekilde özetlenebilir:

- %10'un altı Ölçüm sistemi kabul edilebilir
- %10 ile %30 arası Uygulamanın önemine, ölçüm cihazının maliyetine, tamir masraflarına, vb., bağlı olarak kabul edilebilir.
- %30'un üzeri Ölçüm sisteminin geliştirilmesi gerekir. Problemleri belirlemeye ve düzeltmeye çalışın

Bütün faktörlerin yüzdeleri toplamı %100'e eşit olmayacaktır. Planlanan uygulama için ölçüm sisteminin kabul edilir olup olmadığını belirlemek amacıyla hesaplanan toplam değişkenlik yüzdeleri değerlendirilmelidir.

Eğer analiz, süreç değişkenliği yerine toleransa dayandırılmışsa, ölçüm cihazı tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik raporu formu (Çizelge 2.2), formun sağ tarafı % Toplam Değişkenlik yerine, % Tolerans gösterecek şekilde modifiye edilebilir. Bu durumda, %EV, %AV, %R&R, ve %PV, hesaplamalarda toplam değişkenlik (TV) yerine paydaya tolerans değeri koyularak hesaplanır. Bu iki yaklaşım tarzının herhangi biri veya ikisi birden ölçüm sisteminin planlanan kullanımına ve müşterinin isteklerine göre kabul edilebilir.

B. Ortalama–Aralık Metodu Sonuçlarının Grafikselleştirilmesi

Ölçüm sisteminin analizinin esas amacı, bütün sistemi anlamak olduğu için grafikselleştirme araçlarının kullanılması çok önemlidir. Bu araçlar, değişkenlik modelinin ve karşılıklı ilişkilerin anlaşılmasını sağlar. Hangi grafikselleştirme araçlarının kullanılacağı, veri toplamak için uygulanacak olan deneyin niteliğine bağlıdır.

Ölçüm sistemi analizinde elde edilen veriler, grafikselleştirme olarak kontrol grafiklerinde gösterilebilir [3]. Ölçüm sistemlerini ilgilendiren soruların, kontrol grafikleri kullanılarak çözülmesi fikri ilk olarak Western Elektrik Şirketi'nde hayat bulmuştur [10]. Aralık Kontrol Grafiği, işlemin kontrol altında olup olmadığına karar vermek için kullanılır. Ancak, ölçüm hataları ne kadar büyük olursa olsun, kontrol sınırları bu hataya izin verebileceğinden, ölçüm çalışmasının yararlı olabilmesi için, çalışmadan önce özel sebepler tespit edilmeli ve ortadan kaldırılmalıdır.

Aralık grafiği şunların belirlenmesinde yol gösterebilir:

- 1) Tekrarlanabilirliğe göre istatistiksel kontrol

2) Her parça için ölçüm işleminin, ölçümcüler arasında tutarlılığı

Ortalama ve Aralık Kontrol grafikleri kullanılırken izlenecek yol şöyledir:

- 1) Aralık (R) grafiğine, her ölçümcü/parça kombinasyonu için aralık değerleri işaretlenir.
- 2) Ortalama grafiği için, her ölçümcünün her parça üzerinde yaptığı okumaların ortalaması, ölçümcüye göre parça numaraları indeks alınarak çizilir. Eğer, ortalamaların değişim aralığı kullanılarak kontrol sınırları belirlenmişse, oluşturulan Ortalama grafiği ölçüm sisteminin “kullanılabilirliği” hakkında bilgi sağlar.
- 3) Standart kontrol sınırları hesaplanır ve grafikte işaretlenir.
- 4) Grafikleri değerlendirme:
 - a. Aralık (R) grafiğinin kontrol altında olup olmadığı belirlenir. Eğer bütün aralıklar kontrol altındaysa, ölçümcüler tutarlıdır. Eğer değilse, sebebi ölçümcü teknikleri veya ölçüm cihazı tutarsızlığı olabilir. Bir sonraki adıma geçmeden önce bu özel sebepler düzeltilmeli ve aralık grafiği kontrol altına alınmalıdır.
 - b. Ortalama (\bar{X}) grafiğinde noktaların kontrol sınırları dışında olup olmadığı kontrol edilir. Kontrol sınırları arasında kalan alan, ölçüm hatalarını temsil ettiğinden dolayı ortalamaların yarısı veya daha fazlası sınırlarının dışına düşüyorsa, ölçüm sistemi Parça farklılıkları tespit etmek için yeterlidir ve ölçüm sistemi işlemi kontrol etmek için yararlı veriler sağlayabilir. Ortalamaların yarısından azı kontrol sınırlarının dışına düşüyorsa, ölçüm sisteminin parça farklılıklarını tespit edemeyeceği sonucuna varılır. Bu da ölçüm sisteminin ilgili sürecin analizinde kullanılamayacağı anlamına gelir.

Ölçüm sistemleri analizinden elde edilen veriler kontrol grafiklerinin yanı sıra, kabul edilen referans değerlerden parçaların sapmalarını gösteren “Hata Grafikleri” kullanılarak da analiz edilebilir. Her parça için sapmalar veya hatalar ölçülen verilerin referans değerlerinin olup olmamasına bağlı olarak şöyle hesaplanır:

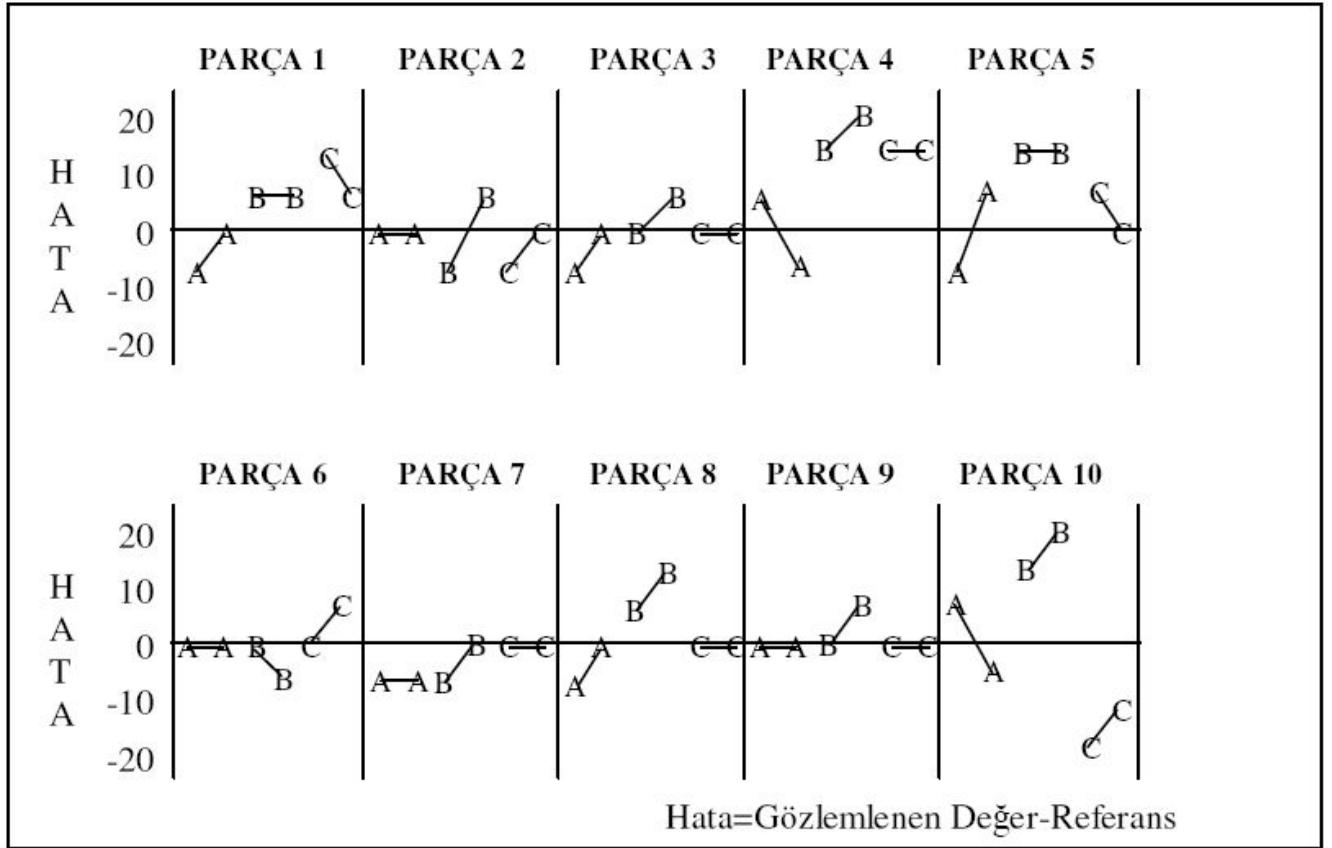
$$\text{Hata} = \text{Gözlemlenen Değer} - \text{Referans Değeri}$$

veya,

$$\text{Hata} = \text{Gözlemlenen Değer} - \text{Parçanın Ölçüm Ortalaması}$$

Değişkenliğin açık sebeplerini görebilmek için, sapmaların sistematik bir şekilde grafiğe yansıtılması diğer istatistiksel analizlerin hepsinden daha önde gelmelidir. İşaretlenen verilerin analizinden çeşitli sonuçlar çıkarılabilir. Örneğin, Şekil 2.8' den [3] çıkartılabilecek bazı sonuçlar şunlardır:

- 1) Ölçümcü B' nin ikinci ölçümleri sistematik olarak birinciden daha yüksek.
- 2) Ölçümcü B' nin ortalamaları diğer ölçümcülerin ortalamalarından daha yüksek.
- 3) 10 numaralı parçayı ölçmek sürekli olarak zor. Bu durumun nedeni belirlenmeli.



Şekil 2.8 Örnek Hata Grafikleri

2.4.5.3. Varyans Analizi Metodu (ANOVA)

Varyans analizi metodu (ANOVA), ölçüm sistemleri analizinde veri sapmasının kaynaklarının ve ölçüm hatalarının analizinde kullanılacak standart bir istatistiksel tekniktir.

ANOVA metodu Ortalama ve Aralık metoduyla karşılaştırıldığında avantajları şöyle sıralanabilir:

1. Bütün deney düzeneklerine uygulanabilir,
2. Değişkenlik daha kesin hesaplanabilir,
3. Deneysel veriden daha detaylı bilgi çıkartabilir.

Temel dezavantajı hesapların bilgisayar gerektirmesi ve sonuçların yorumlanması için belirli bir bilgi düzeyinin gerekmesidir.

ANOVA metodunda verinin toplanma metodu önem taşımaktadır. Eğer veriler rastgele toplanmadıysa bu, eğilim değerlerinin bir kaynağı olabilir. (n) adet parça, (k) adet ölçümcü ve (r) denemede yapılacak ölçümler için eğilime sebep olmayacak dengeli bir tasarım açısından izlenebilecek en basit yol; ölçümleri rastgele hale getirmektir.

Rastgele hale getirmek için izlenebilecek en genel metotlardan biri, uzunca bir kağıda A1 yazarak ilk ölçümcünün birinci parçada yaptığı ölçümü belirtmektir. Aynı ölçümcünün n. parçaya kadar yaptığı ölçümler benzer şekilde A(n) olarak adlandırılabilir. Aynı işlem bu sefer (k.) ölçümcü dahil olmak üzere bütün ölçümcüler için tekrarlanır. Aynı notasyon bu sefer ikinci ölçümcü için B1..., üçüncü ölçümcü için C1... gibi yazılacaktır. Bütün (nk) kombinasyonları yazıldıktan sonra bu ince uzun kağıtlar bir kaseye konur. Her defada bir adet kağıt seçilir. Elde edilen kombinasyonlar (A1, B2,...) ölçüm cihazı çalışmasının yapılacağı ölçüm sırasını belirlemede kullanılabilir. Bütün (nk) kombinasyonları seçildikten sonra kağıtlar tekrar kaseye konulur ve süreç tekrarlanır. İşlem (r) defa tekrarlanarak her tekrarda uygulanacak sıra belirlenir. Rasgele sayılar tablosunun kullanılması daha iyi bir metot olduğu gibi, yaygın olarak kullanılan istatistik paket programları (SPSS, MINITAB vb.) ile de artık bu işlem daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

Veriler Çizelge 4.1' deki gibi benzer bir şekilde rasgele toplanabilir. Daha önceki kısımlarda bahsedilen grafik metotlarından herhangi biri verinin grafiksel analizi için kullanılabilir. Bu metotlar sonucunda veri daha iyi anlaşılabilir. Her ölçümcünün, parçalarda yaptığı ortalama ölçümün parça numarasına göre grafikleri aşağıdaki gibi yorumlanabilir;

- Eğer tüm çizgiler birbirlerine paralel ise herhangi bir etkileşim yoktur.
- Eğer çizgiler paralel değilse (birbirlerini kesen veya çakışan çizgilerin olduğu durumlarda), etkileşim belirgindir. Kesişim açısı büyüdükçe etkileşim de artış gösterir.

Sayısal analiz Çizelge 2.3' deki formüllere göre yapılabilir. Bu metot ANOVA olarak da adlandırılmaktadır. ANOVA tablosu altı kolondan oluşmaktadır. Kaynak kolonu değişkenliğin sebebidir. "SD" kolonu kaynağın serbestlik derecesidir. "SS" yada karelerin toplamı kolonu kaynağın ortalamasının sapmasıdır. "MS" yada karelerin ortalaması kolonu, karelerin toplamının serbestlik derecesine bölüdüğü kolondur. "F" oranı kolonu sadece etkileşim için hesaplanmaktadır. Bu kolon karelerin ortalamasının ölçüm hatasının karesinin ortalamasına bölünmesinden bulunmaktadır. "EMS" yada karelerin ortalamasının (MS) beklenen değerleri, varyans bileşenlerinin lineer kombinasyonunu her kare ortalaması için belirler [12]. ANOVA tablosu değişkenliğin kaynaklarını toplam dört parçaya ayırmaktadır:

- Parçalar,
- Ölçümcüler,
- Ölçümcülerin ve parçaların etkileşimi ve
- Ölçüm cihazından kaynaklanan tekraralama hataları.

Çizelge 2.3 Kalınlık Ölçümü Varyans Analizi Tablosu

$SS_p = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i..}^2}{k \cdot r} - \frac{x_{...}^2}{n \cdot k \cdot r}$ $TSS = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r x_{ijm}^2 - \frac{x_{...}^2}{n \cdot k \cdot r}$ $SS_o = \sum_{i=1}^n \frac{x_{.j.}^2}{k \cdot r} - \frac{x_{...}^2}{n \cdot k \cdot r}$ $SS_e = TSS - [SS_o + SS_p + SS_{op}]$ $SS_{op} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k x_{ij.}^2 - \sum_{i=1}^n \frac{x_{i..}^2}{k \cdot r} - \sum_{j=1}^k \frac{x_{.j.}^2}{n \cdot r} + \frac{x_{...}^2}{n \cdot k \cdot r} \quad i = 1 \dots n \quad j = 1 \dots k \quad m = 1 \dots r$					
Kaynak	SD	SS	MS	EMS	F
Ölçümcü	k-1	SS _o	MS _o =SS _o /(k-1)	$\tau^2 + r\gamma^2 + nr\omega^2$	
Parçalar	n-1	SS _p	MS _p =SS _p /(n-1)	$\tau^2 + r\gamma^2 + kr\sigma^2$	
Ölçümcü x Parçalar	(n-1)(k-1)	SS _{op}	MS _{op} =SS _{op} /(n-1)(k-1)	$\tau^2 + r\gamma^2$	MS _{op} /MS _e
Ölçüm Cihazı (hata)	nk(r-1)	SS _e	MS _e =SS _e /nk(r-1)	τ^2	
Toplam	nkr-1	TSS		Ölçümcü ~ N(0, ω^2)	
				Parçalar ~ N(0, σ^2)	
				Ölçümcü x Parçalar ~ N(0, γ^2)	
				Ölçüm Cihazı ~ N(0, τ^2)	

Değişkenlik bileşenlerinin belirlenmesinin her kaynak için nasıl yapılacağı Çizelge 2.4' de gösterilmektedir.

Karelerin ortalaması, örnek değişkenliğine tabi tutulduğuna göre ve bu hesaplama da karelerin çıkarılması işlemini içerdiğinden dolayı, negatif varyans tahminleri olasılık dahilindedir. Bu durum problem yaratabilir, çünkü bunun anlamı ana değişkenlik bileşenlerinin sıfıra eşit veya yakın değerler taşıması veya örnek büyüklüğünün küçük olmasıdır. Analiz çalışmalarında negatif değerler sıfıra eşitlenmektedir [3].

Çizelge 2.4 Değişkenlik Bileşenlerinin Tahmini

Ölçüm Cihazı	$\tau^2 = MS_e$
Etkileşim	$\gamma^2 = \frac{MS_{op} - MS_e}{r}$
Ölçümcü	$\omega^2 = \frac{MS_o - MS_{op}}{n \cdot r}$
Parça	$\sigma^2 = \frac{MS_p - MS_{op}}{k \cdot r}$

Standart sapmanın yorumlanması varyanstan daha kolaydır, çünkü orijinal ölçülerle aynı birimi taşımaktadır. Pratikte değişkenliğin temel ölçütü olarak standart sapmanın 5.15 katı alınabilmektedir. Çizelge 2.5, 5.15 sigma dağılımını, tekrarlanabilirlik (ekipman değişkenliği olarak adlandırılmaktadır, EV) ve tekrar yapılabirlik (Ölçümcü Değişkenliği olarak adlandırılmaktadır, AV) için göstermektedir.

Parça ve ölçümcü etkileşimi belirginse, değişkenliğin tahmini onu oluşturan bileşenler cinsinden yapılabilmektedir. Yanlışlıkla etkileşimin olmadığı sonucuna varmamak için yüksek bir hassasiyet derecesi seçilmelidir. R&R' nin ne olduğuna karar verdikten sonra süreç performansına göre R&R yüzdesi hesaplanmalıdır.

Çizelge 2.5 Değişkenlik Bileşenleri 5.15 Sigma Dağılımı

EV	$= 5.15\sqrt{MS_e}$
AV	$= 5.15\sqrt{\frac{MS_o - MS_{op}}{n \cdot r}}$
Parça x Ölçümcü Etkileşimi (I)	$= 5.15\sqrt{\frac{MS_{op} - MS_e}{r}}$
R&R	$= \sqrt{EV^2 + AV^2 + I^2}$
Parça Değişkenliği (PV)	$= 5.15\sqrt{\frac{MS_p - MS_{op}}{k \cdot r}}$

2.4.6. Nitelik Verileri Açısından Sistem Analizi

Nitelik ölçüm cihazları (kontrol mastarı) her parçanın belirli bir özelliğe göre uygun olup olmadığını belirlemeye yarar. Parça bu özelliklere uyuyorsa kabul edilir, uymuyorsa reddedilir. Bu tür ölçüm cihazlarının çoğu, bir parça grubunu kabul etmek veya reddetmek için ayarlanmıştır. Değişken ölçüm cihazlarından farklı olarak, nitelik ölçüm cihazları parçanın ne kadar iyi veya ne kadar kötü olduğunu gösteremez. Bunun yerine parçanın kabul edilip edilmeyeceğini gösterir.

2.4.6.1. Kısa Metot

Kısa metot, yirmi parça seçilerek gerçekleştirilir. İki ölçümcü her parçayı, ölçümcü eğilimine izin vermeyecek şekilde ikişer defa ölçer. Bu yirmi parça seçilirken bir kısmının spesifikasyon sınırlarının altında ve üstünde olması tercih sebebidir [3].

Kontrol mastarı tüm ölçüm durumlarında (her bir parça için dört defa ölçüm) aynı sonucu veriyorsa, master kabul edilebilir. Eğer ölçüm aynı sonucu vermiyorsa kontrol mastarının iyileştirilmesi ve tekrardan değerlendirilmesi gerekmektedir. Kontrol mastarı iyileştirilemiyorsa, başka bir kabul edilebilir ölçüm sistemi kullanılmalıdır. Çizelge 2.6' da nitelik ölçüm çalışması kısa metoda tipik bir örnek verilmektedir:

Çizelge 2.6 Örnek Nitelik Ölçüm Çalışması, Kısa Metot

	ÖLÇÜMCÜ A		ÖLÇÜMCÜ B	
	1	2	1	2
1	G ²	G	G	G
2	G	G	G	G
3	NG ³	G	G	G
4	NG	NG	NG	NG
5	G	G	G	G
6	G	G	G	G
7	NG	NG	NG	NG
8	NG	NG	G	G
9	G	G	G	G
10	G	G	G	G
11	G	G	G	G
12	G	G	G	G
13	G	NG	G	G
14	G	G	G	G
15	G	G	G	G
16	G	G	G	G
17	G	G	G	G
18	G	G	G	G
19	G	G	G	G
20	G	G	G	G

2.4.6.2. Uzun Metot

Uzun metotla analizde her ölçüm sisteminde olduğu gibi, sürecin kararlılığı doğrulanmalı ve gerekiyorsa izlenmelidir. Nitelik ölçüm sistemleri için, sabit bir örnek grubunun belli zaman aralıklarında nitelik kontrol grafiklerinin hazırlanması, kararlılığın doğrulanması açısından sıkça kullanılan bir metottur.

Nitelik ölçüm cihazları için, cihazın tekrarlanabilirlik ve eğilim miktarlarını belirlemede Kontrol Mastarı Performans Eğrileri kullanılmaktadır. Analiz hem tek taraflı hem de çift taraflı kontrol mastarları için yapılabilmektedir. Çift taraflı kontrol mastarlarında, hatanın doğrusal ve

² G: Geçer

³ NG: Geçmez

benzer olduğu varsayılarak, tek limitin kontrol edilmesi yeterli olacaktır. Kolaylık açısından alt limit kullanılır.

Genelde, nitelik ölçüm çalışması, seçilen parçaların referans değerlerinin bulunmasını kapsar. (m) kez değerlendirilen ve (a) kez kabul gören bu parçaların her biri kaydedilir. Bu sonuçlardan tekrarlanabilirlik ve eğilim değerlendirilebilir.

Nitelik ölçüm çalışmasının ilk adımı parça seçimidir. Çalışmada kullanılan her parçanın referans değerinin bilinmesi gerekmektedir. Pratik olarak yaklaşık eşit aralıkta sekiz parça seçilmelidir. Maksimum ve minimum değerler süreç aralığını yansıtmalıdır. Seçme işlemi sonuçların güvenilirliğini etkilemese de, ölçüm çalışmasını tamamlamak için gerekecek olan toplam parça sayısını etkiler. Bu sekiz parça $m = 20$ kez ölçülür ve her parça için toplam kabul sayısı, (a), kaydedilir.

Tüm çalışma için en küçük parçanın $a = 0$, en büyük parçanın $a = 20$, diğer altı parçanın $1 \leq a \leq 19$ değerlerinde olması gerekmektedir. Bu şartlar sağlanmadığı takdirde, (X_T) referans değerli daha fazla parça şartlar sağlanana kadar ölçüm cihazından geçirilmelidir.

Eğer en küçük değer için $a \neq 0$ ise, $a = 0$ olana kadar daha küçük parçalar alınmalıdır ve değerlendirilmelidir. Eğer en büyük değer için $a \neq 20$ ise, $a = 20$ olana kadar daha büyük parçalar alınmalıdır. Eğer kalan altı parça $1 \leq a \leq 19$ değerine sahip değilse, aralık boyunca seçilmiş noktalarda ek parçalar alınmalıdır. Bu parçalar, çalışmada daha önce alınmış parça ölçümlerinin orta noktalarından alınır. $a=0$ ucundaki birinci aralık, $a = 0$ olduğu en büyük ölçümden başlar. $a = 20$ ucu için birinci aralık, $a = 20$ olduğu en küçük ölçümden başlar. En iyi sonuç için, $a = 0$ ve $a = 20$ uçlarının her ikisinden de örnekler alınmalı ve parça aralığının ortalarına doğru çalışılmalıdır. Eğer gerekiyorsa, şartlar sağlanana kadar prosedür tekrarlanabilir.

Veri toplanma kriterleri sağlandıktan sonra her parça için kabul edilme olasılıkları aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$P_a^1 = \begin{cases} \frac{a+0.5}{m} & \text{eğer } \frac{a}{m} < 0.5, a \neq 0 \\ \frac{a-0.5}{m} & \text{eğer } \frac{a}{m} > 0.5, a \neq 20 \\ 0.5 & \text{eğer } \frac{a}{m} = 0.5 \end{cases}$$

Bu denklemler $1 \leq a \leq 19$ şartlarını sağlayan parçalar için geçerlidir. $a = 0$ durumunda referans değeri en büyük parça dışında (P_a^1 değeri 0.025) $P_a^1=0$ kabul edilir, $a = 20$ durumunda referans değeri en küçük parça dışında (P_a^1 değeri 0.975) $P_a^1=1$ kabul edilir.

Her X_T için P_a^1 değerleri hesaplandıktan sonra Ölçüm Cihazı Performans Eğrisi çizilebilir. Ölçüm Cihazı Performans Eğrisi grafiksel olarak gösterilebilmesine rağmen, tekrarlanabilirlik ve eğilimin daha kesin tahmini için grafiğin normal dağılım kağıdına çizilmesi gerekmektedir. Hesaplanan olasılık değerleri normal dağılım kağıdına işlenir ve işaretlenen noktaların çoğunu kapsayacak şekilde bir doğru çizilir. Burada eğilim (Alt Limit) – ($P_a^1=0.5$) değerine denk gelen referans değerine eşittir.

$$\text{Eğilim} = X_T(P_a^1 = 0.5) - \text{Alt Limit}$$

Tekrarlanabilirlik, $P_a^1=0.995$ ve $P_a^1=0.005$ değerlerine denk gelen referans değerlerinin farkının 1.08 düzeltme faktörüne bölünmesiyle bulunur.

$$\text{Tekrarlanabilirlik} = \frac{X_T(P_a^1 = 0.5) - X_T(P_a^1 = 0.005)}{1.08}$$

Eğilimin sıfırdan kayda değer şekilde farklı olup olmadığını belirlemek için aşağıdaki istatistik kullanılır:

$$t = \frac{31.3 \times |\text{Eğilim}|}{\text{Tekrarlanabilirlik}}$$

Hesaplanan bu değer 2.093' den (0.025, 19) büyük ise, eğilim sıfırdan belirgin bir şekilde farklıdır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Allen, Burdick ve Larsen (2002) tarafından yayınlanan makalede; iki ölçüm sürecinde mevcut değişkenliği karşılaştırmak için iki metot üzerinde durulmuştur. Karşılaştırma, Ölçüm Sistemi Analizinde genel olarak kullanılan istatistiklere dayandırılmış ve gerek ortaya konulan sonuçların desteklenmesi, gerekse metotların karşılaştırılması amacıyla bilgisayarda simülasyon yapılmıştır [13].

Burdick ve Larsen (1997) tarafından yayınlanan makalede; Ölçüm Sistem Analizindeki değişkenlik ölçütleri (tekrarlanabilirlik, tekrar yapılabilirlik vb.) için güven aralıkları oluşturabilmek amacıyla birkaç metot önerilmiştir. Gerek hesaplanan güven aralıklarının doğruluğunu görmek, gerekse ortalama güven aralığı uzunluğunu karşılaştırmak amacıyla simülasyon yapılmıştır. Ayrıca, ölçüm analizi çalışmasında uygun parça örneklerinin, operatörlerin ve metotların seçimi ile ilgili önerilerde de bulunulmuştur [14].

Burdick ve Daniels (2005) tarafından yayınlanan makalede; operatörlerin değişmez olduğu iki faktörlü Ölçüm Sistem Analizi için güven aralığı oluşturmak amacıyla geliştirilen bir metot sunulmuştur. Genel güven aralığı yöntemini kullanan metot ile bu metodun karşılaştırılması yapılmış ve sonuçlardan daha da emin olmak için simülasyon yapılmıştır [15].

Burdick, Montgomery ve Park (2005) tarafından yayınlanan makalede; Ölçüm Sistem Analizinde hatalı ayırım oranları için güven aralığı oluşturmak amacıyla geliştirilen bir metot sunulmuştur. Güven aralıkları istatistiksel karar verme yöntemleri kullanılarak hesaplanmış ve sonuçların karşılaştırılması amacıyla simülasyon uygulanmıştır [16].

Ermer (2006(a), 2006(b)) tarafından yayınlanan ve iki kısımdan oluşan çalışmada; Otomotiv Endüstri Grubunun (AIAG) Ölçüm Sistemi El Kitabında yer alan tekrarlanabilirlik ve tekrar yapılabilirlik analizi ile ilgili metotların, ölçüm sisteminin değişik bileşenlerini analiz yeteneği incelenmiştir. Bu çalışmada, Otomotiv Endüstri Grubunun ortaya koyduğu metotlar ile neden ölçüm ekipmanının, ölçümcülerin ve parçaların standart sapmaları veya standart hataları gibi ölçüm sistemi varyasyon kaynakları açısından karşılaştırma amaçlı yüzdesel oranlar oluşturulmadığı gösterilmeye çalışılmıştır. Aynı çalışmanın ikinci kısmında ölçüm sistemi analizinin daha doğru yapılabilmesi için uygulamalı olarak yöntemler anlatılmıştır. [6, 17]

Gelipgiden (2001) tarafından sunulan Yüksek Lisans tezinde; ölçüm sistemlerinin analiz edilmesinde niteliksel veriler için uygulanan “Bayes Analizi” ve “Sapma Analizi” metotları ile niceliksel veriler için uygulanan “Aralık”, “Ortalama – Aralık” ve “Varyans Analizi” metotları incelenmiştir. Ayrıca, laboratuvar koşullarının ölçüm değerlerinde ne gibi değişikliklere sebep

olabileceği, ölçüm sistemi hataları sonucu oluşabilecek üretici ve tüketici riskleri uygulamalı olarak hesaplanarak bir kabul örnekleme de geliştirilmeye çalışılmıştır. [11]

Graham (2006(a), 2006(b)) tarafından yayınlanan ve iki kısımdan oluşan makalede; Ölçüm verilerinin neden önemli oldukları ve ölçüm verilerinin kalitesini arttırmak amacıyla hangi yöntemlerin izlenebileceği uygulamalı olarak anlatılmaya çalışılmıştır. [18, 19]

Mast ve Trip (2005) tarafından yayınlanan çalışmada; ölçülen numunelerin gerçek değerlerinin değişken olduğu veya numunelerin ölçümlerden etkilendiği durumlarda, bilinen Ölçüm Sistemi Analizi metotlarının uygulanmasının hemen hemen imkansız olabileceği veya yanlış sonuçlar vereceği belirtilerek, alternatif bir metot ortaya konulmuştur. [20]

Mast ve Wieringen (2007) tarafından yayınlanan çalışmada; niceliksel olmayan ve “Nominal” olarak adlandırılan ölçütlerin söz konusu olduğu ölçüm sistemlerinde, standart Ölçüm Sistem Analizi metotlarının uygulanamayacağından bahsedilmiş ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla bir istatistiksel model sunulmuştur. [21]

Semerci (1998) tarafından 1998 yılında sunulan Yüksek Lisans tezinde; ölçümlerdeki hata kaynaklarının incelemesi yapılarak, testlerin tekrarlanabilir ve tekrarlanamaz olmasına göre ölçüm hatalarına ait belirleyici istatistikler ortaya konulmuş ve ölçüm sistemlerinin analizine ilişkin teknikler uygulamalı olarak verilmiştir. [22]

Sweet, Tjokrodjojo ve Wijaya (2005) tarafından yayınlanan çalışmada; MSA Elkitabında niteliksel verilerin analitik analizi ile ilgili olarak verilen metot incelenmiş ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek amacıyla geliştirilen yeni bir metot anlatılmıştır. [23]

Voelkel (2003) tarafından yayınlanan makalede; iki boyutlu veriler için Ölçüm Sistem Analizi konusunda geliştirilen bir metot sunulmuştur. Tek boyut ölçümü söz konusu olduğunda yapılan ölçüm Sistem Analizi için uygulanan metotların iki boyut ölçümü söz konusu olduğunda yetersiz kalabileceği ve geliştirilen metodun özellikle koordinat ölçüm cihazlarında (CMM) uygulanabileceği belirtilmiştir. [24]

İncelenmiş olan bu çalışmaların çoğunluğu Otomotiv Grubu (AIAG) ve Ford firmasının beraber oluşturduğu Ölçüm Sistemi Analizi El Kitabı'nda yer alan yöntemlerin gerek teorik, gerekse uygulamaya dönük olarak incelenmesi ve uygulama açısından eksik görülen hususlarda yeni model geliştirilmesi veya mevcut yöntemin biraz daha iyileştirilmesine yöneliktir. Bu haliyle, kalite yönetim sistemleri içinde ölçüm sistem analizinin yaygın olarak kullanılmadığı ülkemiz cam sektörü gibi alanlarda, bu tür çalışmaların ana hatlarından yararlanılabileceği

anlaşılmaktadır. Bu şekilde, özelde cam sektöründe olmak üzere, yerli literatüre de ölçüm sistemi analizine dönük bir katkı sağlanabilecektir.

4. MATERYAL VE METOT

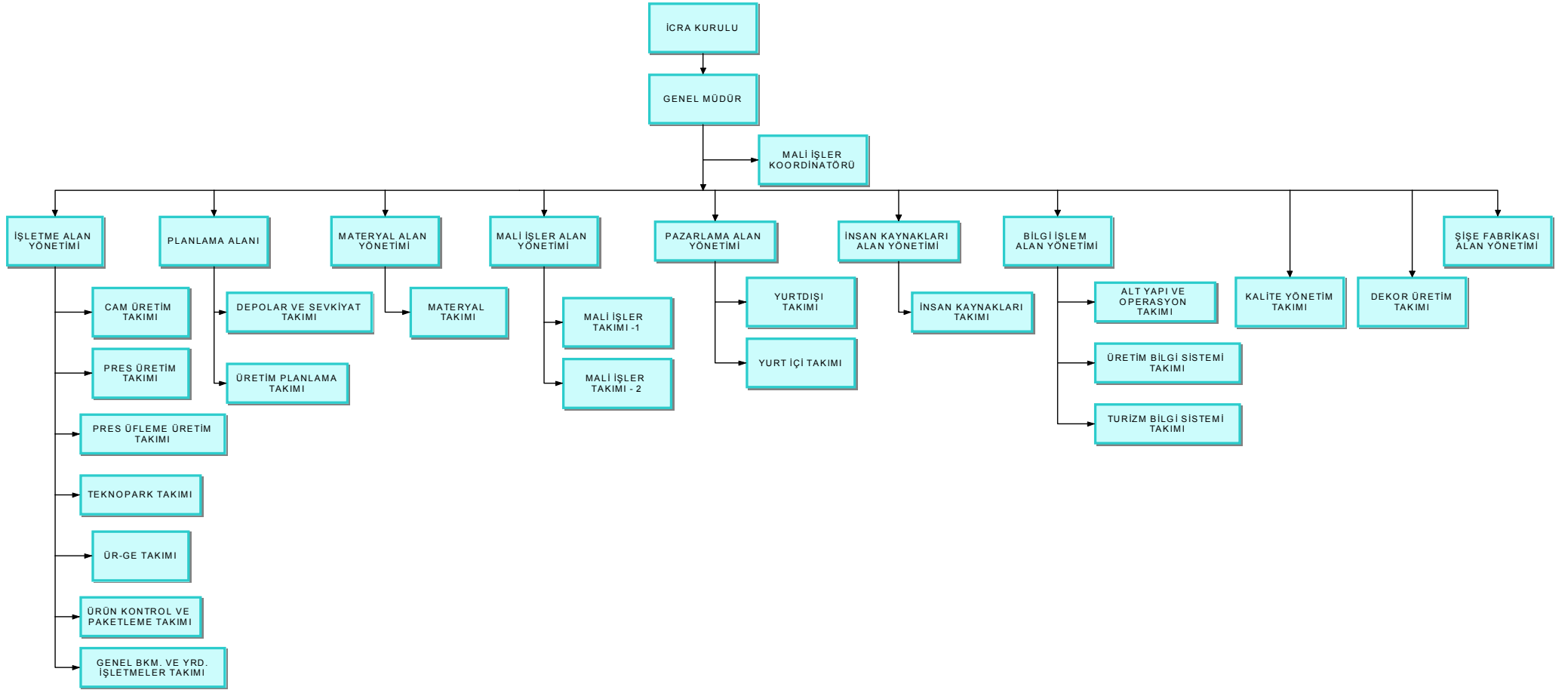
Çalışmanın bu kısmında sofracı üreticisi olan Art–Craft firmasında çalışmanın asıl konusunu oluşturan, Ölçüm R&R analizi ile ölçüm sistemindeki değişkenliğin, toplam değişkenliğe katkısı 2 süreç üzerinde yapılan uygulama ile araştırılacak ve sonuçlar yorumlanacaktır.

4.1. Gürok Turizm ve Madencilik A.Ş. Art–Craft Firmasının Tanıtımı

Bugünkü adıyla Art–Craft olan firma, soda camından otomatik makinelerle müşteri isteklerine uygun cam ev eşyası üretmek üzere 15 Eylül 1994 tarihinde Gürok Turizm ve Madencilik A.Ş. işletmesi bünyesinde kurulmuştur.

80 000 m²'lik genel ve 45 000 m²'lik kapalı alan üzerine kurulmuş olan Art–Craft yatırımına 19/12/1994 tarihinde başlanılmış, 02/08/1996 tarihinde fırın ateşlenmiş, 26/08/1996 tarihinde deneme üretimlerine başlanmış, 01/12/1996 tarihi itibarıyla de normal üretime geçilmiştir. Bu tarihten itibaren geçen süre içinde Art–Craft ürün yelpazesini genişletmiş, kaliteli ve nitelikli ürünleri ile yurt içi ve yurt dışı piyasada kendini kabul ettirmiştir. Firma 2006 yılında ISO 9001:2000 Kalite Yönetim Sistemi Sertifikasını almıştır

Hali hazırda 90 000 ton/yıl kapasitesiyle yıllık 350 milyon adet sofralık cam eşyası üretimi gerçekleştirilmektedir. Yıllık üretim miktarının ortalama %40'ı yurtdışına gönderilmektedir. İşletmenin genel organizasyon şeması Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1 Art-Craft Organizasyon Şeması

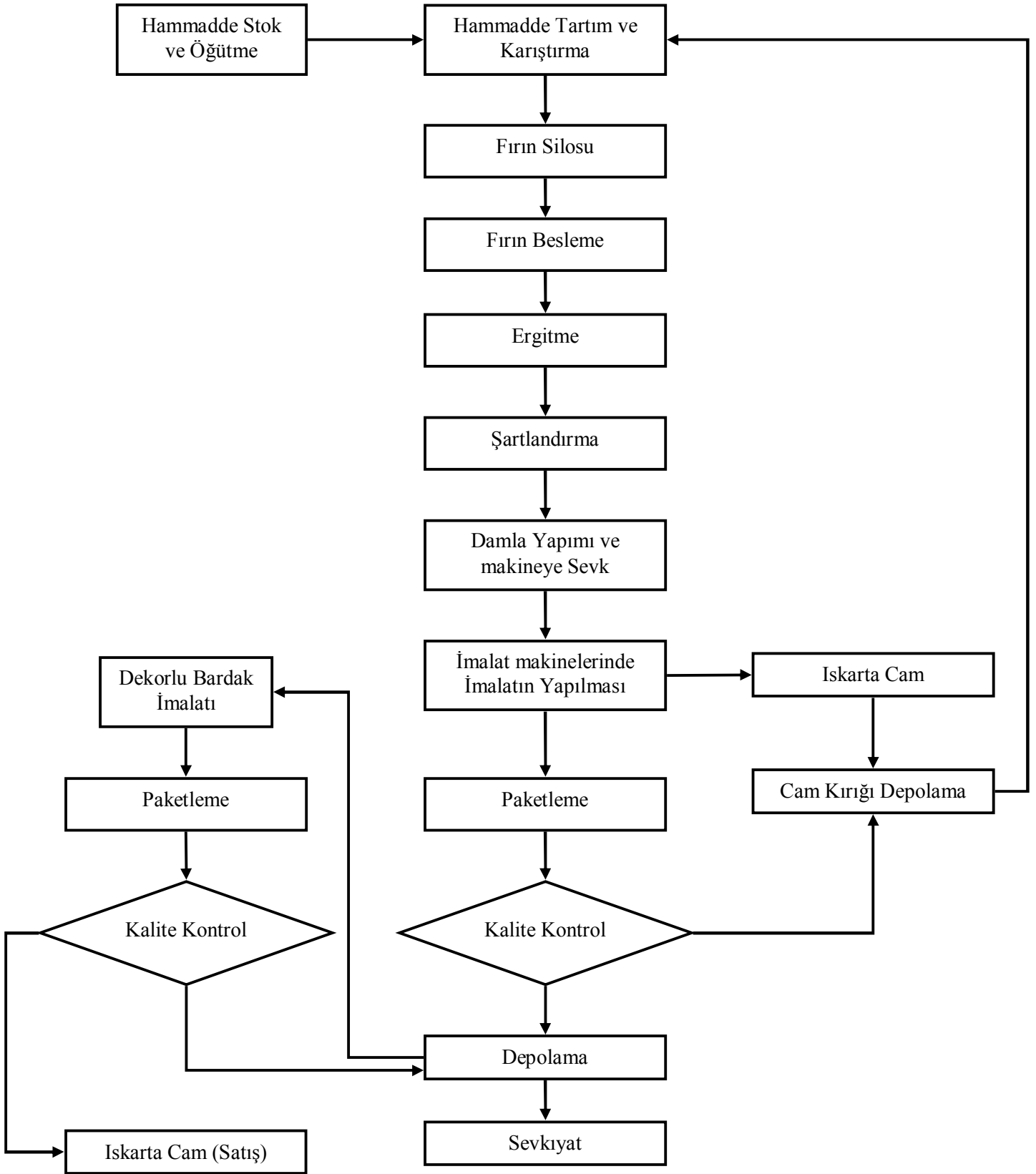
4.1.1. Üretim Süreci Özeti

Üretim tesislerinde pres ve pres üfleme teknikleri kullanılarak sofracılık camı üretimi yapılmakta olup, müşteri isteklerine bağlı olarak, istenildiğinde ürünlerin üzerine tezyin ve dekor uygulanabilmektedir.

Spesifikasyonlara uygun hammaddeler, işletme sahasında stok silolarında stoklanır. İstenilen oranlardaki miktarlar tartılarak vibro besleyicilerle karıştırılmak üzere mikserde gönderilir. Mikserde karışımları tamamlanan hammaddelere, istenilen miktardaki yardımcı maddeler karıştırılarak ilave edilir. Aynı kompozisyona cam kırığı da ilave edilerek, taşıyıcı bantlarla fırın besleme silosuna gönderilir

Ergitme, doğalgaz ile arkadan ısıtılmalı olan ve ateşe dayanıklı refrakter tuğlalarla örülmüş sürekli üretim yapan rejeneratif fırınlarda gerçekleştirilir. Ergitme fırınına soğuk yakma havası sokarak fırın atmosferini soğutmamak ve yanmış baca gazlarının ısısından faydalanmak amacıyla rejeneratör adı verilen, içinde bal peteği şeklinde örülmüş refrakter malzeme ile dolu hava kanalları kullanılır. Fırında yaklaşık 1500°C’ de ergime işlemi gerçekleşir. Ergimiş cam fırın içindeki doğal akımlarla boğaz kısmından geçerek dinlenme bölgesine gelir. Buradan damla elde etmek amacıyla ergimiş cam, her hat için şartlandırılmanın yapıldığı bölgelerden yavaş bir akımla damla yapıcı mekanizmaya gelir ve makaslar ile üretilecek mamullere göre ayarlanmış ağırlıklarda kesilerek, imalat makinelerinde şekillendirilmek üzere kalıplara aktarılır. Tüm bu işlemler otomatik olarak gerçekleştirilmektedir.

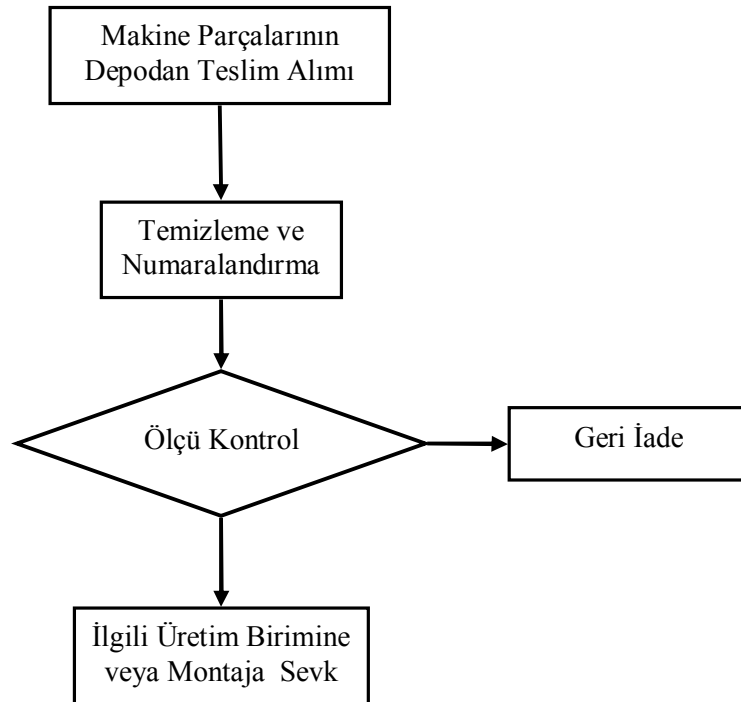
Kalıplar ile imalat makinelerinde şekillendirilen cam ürünler, her hat için ayrı olan soğutma fırınlarına beslenir ve soğutma fırınları çıkışında paketleme ve kalite kontrolü yapılır. Şekil 4.2’ de üretim sürecinin genel bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.2 Üretim Süreci Genel Akış Şeması

4.2. Metot

Bu çalışmada, cama nihai şeklin verildiği şekillendirme makineleri için temin edilen parçaların, Şekil 4.3’ de gösterildiği şekilde niceliksel ölçümünün yapıldığı Teknopark Takımına bağlı olan Ölçü Kontrol Biriminde R&R analiz çalışması yapılmıştır. İmalat makinelerinde kullanılan parçaların istenilen spesifikasyonlara uygun olması kullandıkları cam şekillendirme makinelerinin en iyi şekilde çalışabilmeleri açısından kritik bir unsur olduğundan çalışma açısından bu sürecin incelenmesi kararlaştırılmıştır. Ayrıca, ISO 9001:2000 Kalite Yönetim Sistemleri için Şartlar kısmında Madde 7.6’ da yer alan “Kullanılan ölçme cihazlarının uygunluğunu sağlamak üzere bir süreç oluşturulmalı, kalibrasyon ve doğrulama sağlanmalı” paragrafları sadece Kalibrasyon sürecini değil, aynı zamanda Ölçüm Sistem Analizini de kapsamakta olduğundan bu durum da analiz kararının alınmasında ikinci derecede etkili olmuştur.

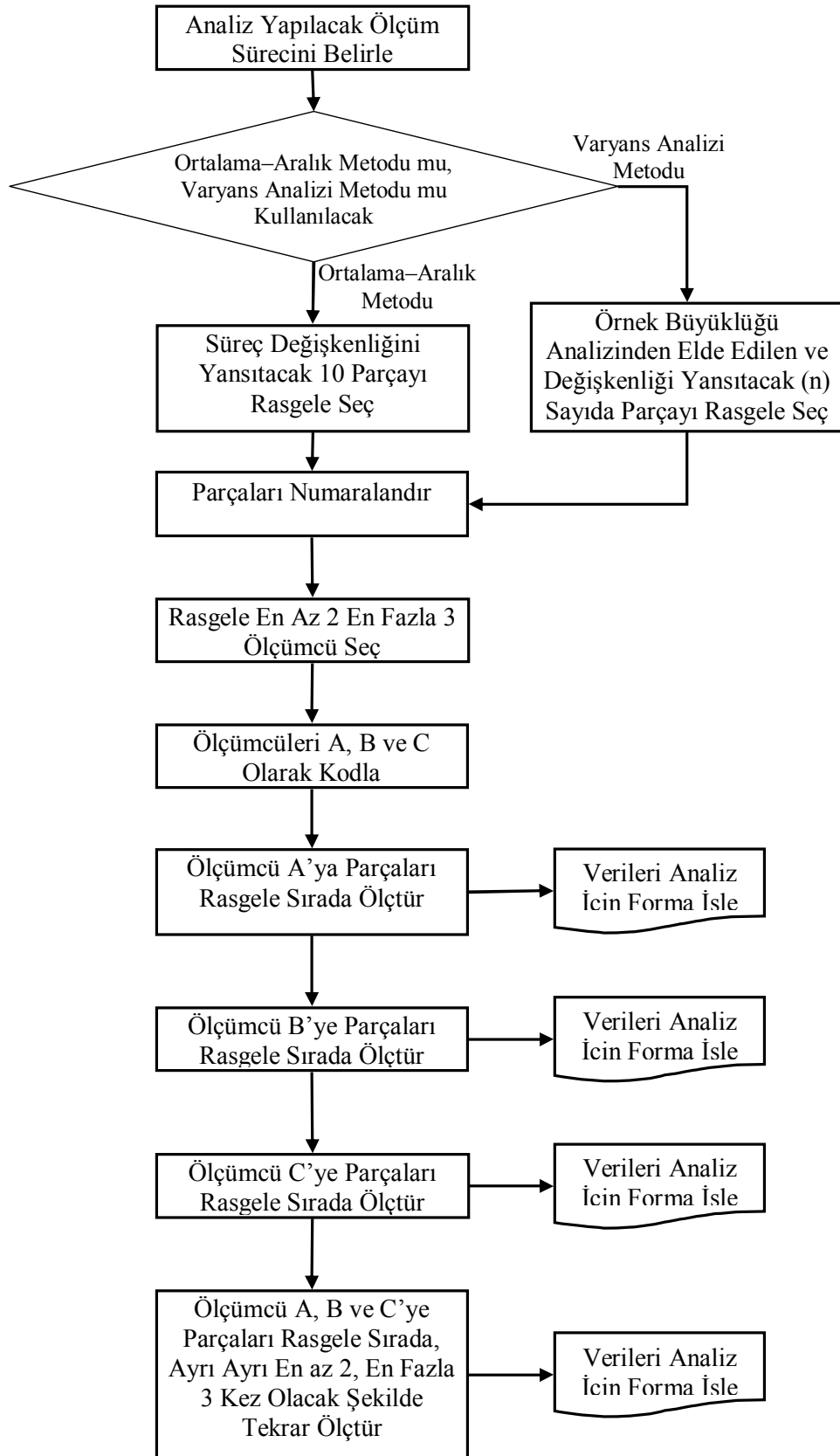


Şekil 4.3 Kontrol Süreci Genel Akış Diyagramı

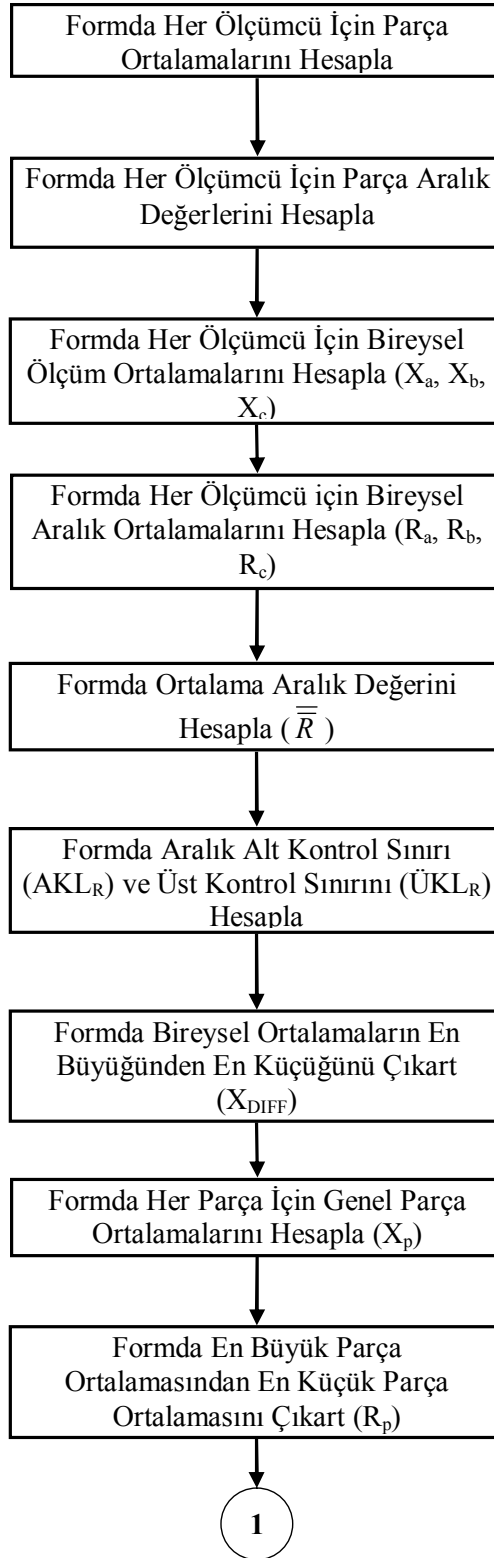
Ölçü kontrol biriminde çalışan elemanlardan üçü rastgele olarak seçilmiş ve bu üç kişiye, kontrole gelen parçalardan rastgele sayılar tablosu kullanılarak seçilen parçalar ölçtürülmüş, elde edilen okuma verileri kaydedilerek Ölçüm Sistem Analizi yapılmıştır. Analiz için veri toplama aşamasında kalibrasyonu yeni yapılmış cihazlar seçildiğinden dolayı, eğilim ve doğrusalılık halihazırda kalibrasyon süreci ile zaten kontrol edildiğinden tekrar yapılmamıştır.

Analizler, hem Ortalama–Aralık hem de Varyans Analizi (ANOVA) yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.4’de hem Ortalama–Aralık, hem de Varyans Analizi Metotlarında kullanılmak üzere verilerin nasıl toplanacağı, Şekil 4.5’de Ortalama–Aralık Metodu kullanılarak analiz çalışmasının nasıl yürütüleceği, Şekil 4.6’da Varyans Analizi Metodu ile analiz çalışmasının nasıl yürütüleceği akış şemaları halinde verilmiştir. Her ne kadar uygulama aşamasında Varyans Analizi Metodu için de genel olarak kabul gören 10 parçalık [3] örnek büyüklüğü kullanılmış ise de, bu kabulün her zaman geçerli olamayacağını göstermek amacıyla örnek büyüklüğü tespit analizi (Gözlem Yeterlilik Testi) yapılmıştır.

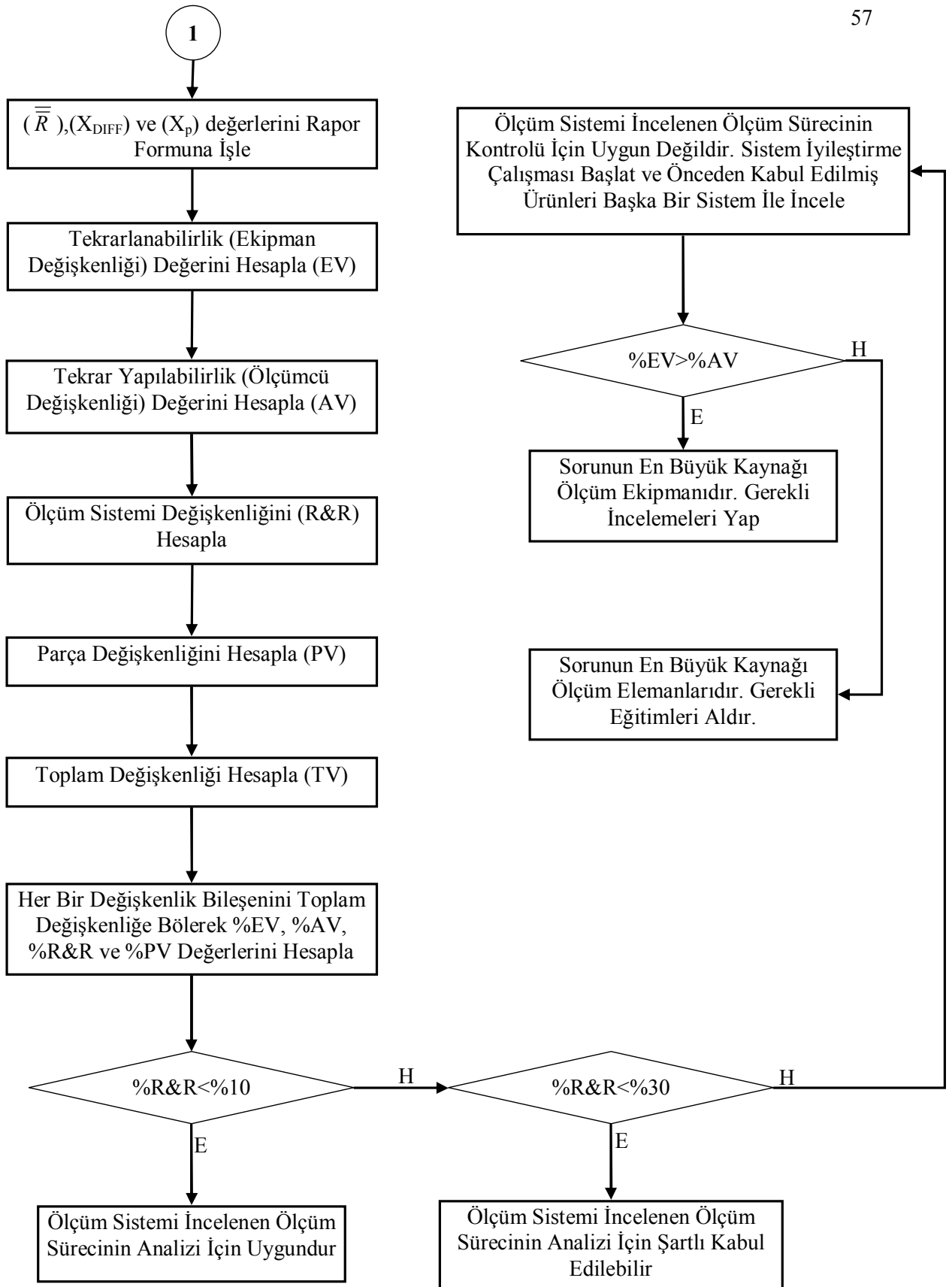
Hem grafiksel analiz için hem de varyans analizi hesaplamaları için günümüzde, bilhassa ölçüm sistemi analizinde yaygın olarak kullanılan MINITAB istatistiksel analiz paket programından yararlanılmıştır.



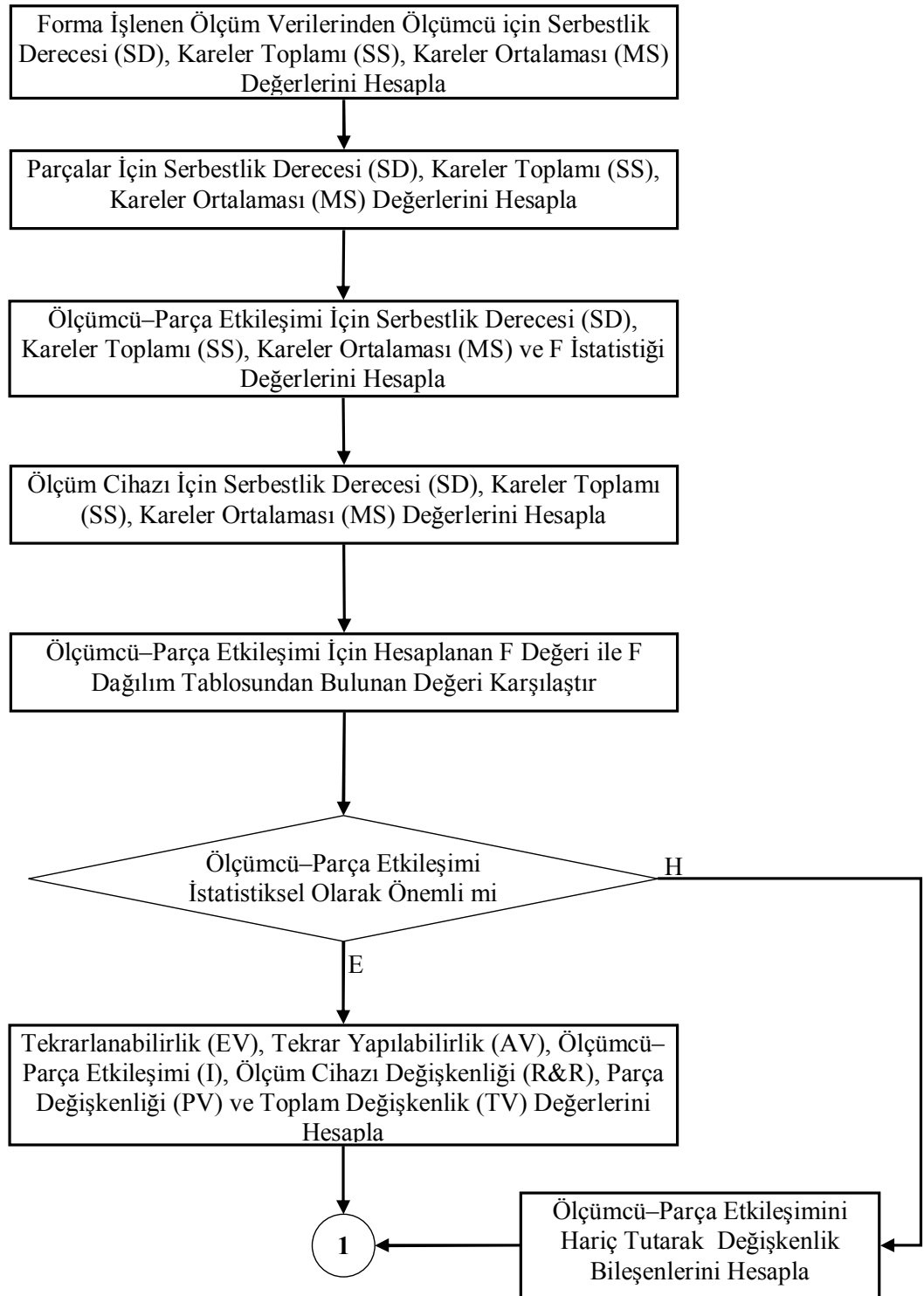
Şekil 4.4 Analiz İçin Veri Toplama Süreci



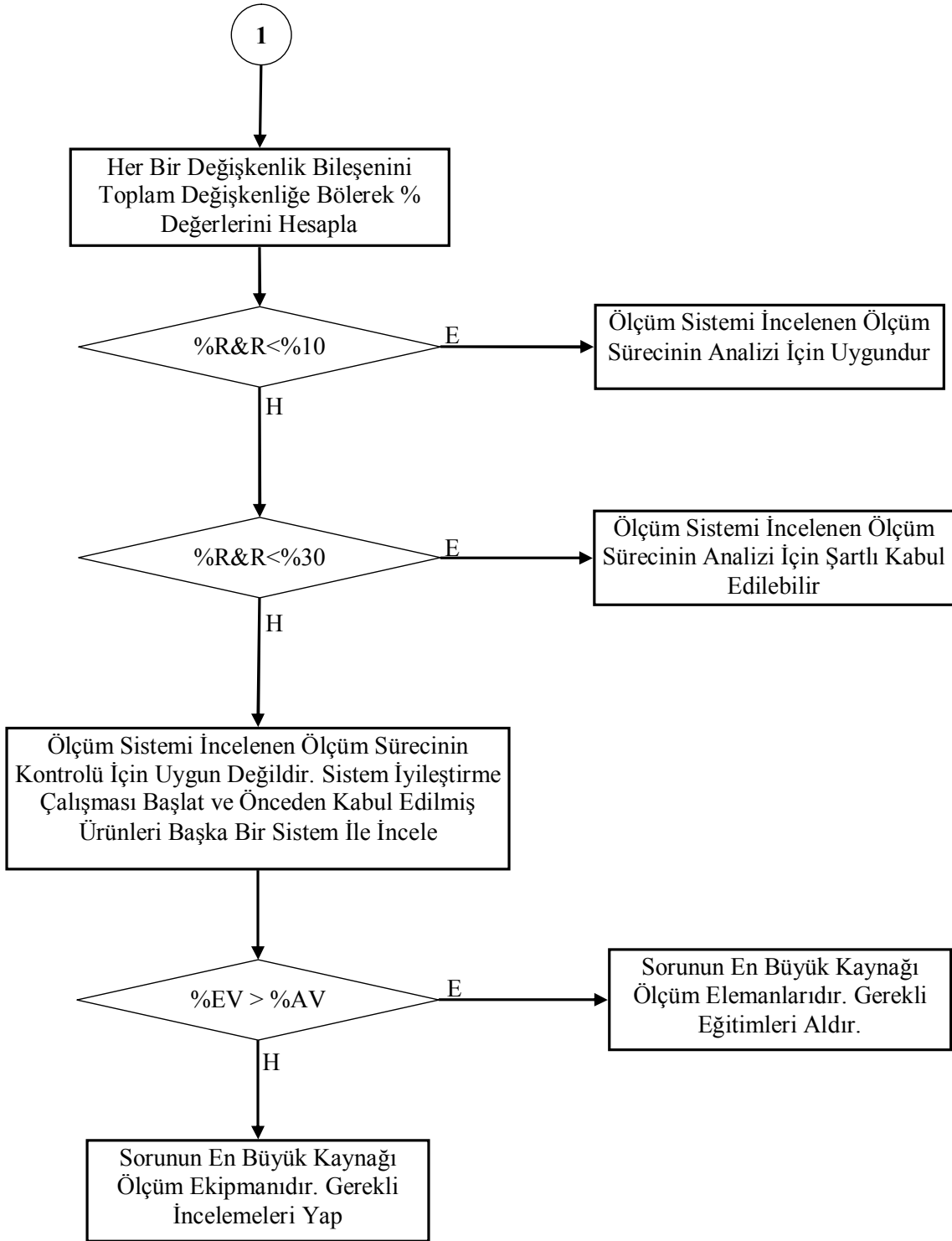
Şekil 4.5 Ortalama–Aralık Metodu ile Analiz Süreci



Şekil 4.5 Ortalama–Aralık Metodu ile Analiz Süreci (devam)



Şekil 4.6 Varyans Analizi Metodu ile Analiz Süreci



Şekil 4.6 Varyans Analizi Metodu ile Analiz Süreci (devam)

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Kalınlık Ölçüm Analizi

Değerlendirilecek birinci ölçüm cihazı kalınlık ölçümü için kullanılan mikrometredir. Sürecin değişkenliğini temsil edecek on parça ve üç ölçümcü rasgele seçilmiştir. Zaman bir sınırlama olarak getirildiği için sadece iki deneme gerçekleştirilmiştir. Veri toplama ve analiz 2. bölümde anlatılan esaslar çerçevesinde yapılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 5.1' de, bu verilerin analizi ve analiz raporu Çizelge 5.2' de verilmiştir. Bu aşamada aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

1. İlk olarak ölçüm cihazı çalışmasından toplanan verilerden bireysel ölçümlerin ortalamaları ($\bar{X}_a, \bar{X}_b, \bar{X}_c$) ve aralık ortalamaları ($\bar{R}_a, \bar{R}_b, \bar{R}_c$), her ölçümcü için hesaplanmıştır. Ayrıca, bireysel parça ortalamaları ve bunlardan yararlanılarak (\bar{X}_p) hesaplanmıştır.
2. Daha sonra, ölçümcü ortalamalarının aralığı (\bar{X}_{DIFF}), ölçümcü ortalamaları ortalaması ($\bar{\bar{X}}$), ölçümcü aralıklarının ortalaması ($\bar{\bar{R}}$) ve parça ortalamalarının aralığı (R_p) hesaplanmıştır.

$$\bar{X}_a = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^r X_{nr}}{n \times r} = \frac{0.65 + 0.60 + \dots + 0.60 + 0.70}{10 \times 2} \Rightarrow \bar{X}_a = 0.8275mm.$$

$$\bar{X}_b = \frac{0.55 + 0.55 + \dots + 0.55 + 0.50}{10 \times 2} \Rightarrow \bar{X}_b = 0.7675mm.$$

$$\bar{X}_c = \frac{0.50 + 0.55 + \dots + 0.85 + 0.80}{10 \times 2} \Rightarrow \bar{X}_c = 0.8275mm.$$

$$\bar{R}_a = \frac{0.05 + 0.00 + \dots + 0.00 + 0.10}{10} \Rightarrow \bar{R}_a = 0.045$$

$$\bar{R}_b = \frac{0.00 + 0.10 + \dots + 0.05 + 0.05}{10} \Rightarrow \bar{R}_b = 0.045$$

$$\bar{R}_c = \frac{0.05 + 0.05 + \dots + 0.00 + 0.05}{10} \Rightarrow \bar{R}_c = 0.030$$

3. R Kontrol Grafiği için üst kontrol limiti (UKL_R) ve alt kontrol limiti (AKL_R) Çizelge 5.1' de gösterildiği gibi hesaplanır. Veriler Tekrarlanabilirlik Aralık Kontrol Grafiğine çizilebilir.

4. Bir sonraki basamak parça ölçümcü ortalama grafiği için üst kontrol limiti (UKL_x) ve alt kontrol limitinin (AKL_x) hesaplanmasıdır.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}_p}{n} = \frac{0.567 + \dots + 0.667}{10} \Rightarrow \bar{\bar{X}} = 0.8075$$

$$UKL_x = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{\bar{R}} = 0.8075 + 1.880 \times 0.04$$

$$UKL_x = 0.8827$$

$$AKL_x = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{\bar{R}}$$

$$AKL_x = 0.8075 - 1.880 \times 0.04$$

$$AKL_x = 0.7323$$

Çizelge 5.1 Kalınlık Ölçüm Verileri

ÖLÇÜMCÜ/ DENEME #	PARÇA										ORTALAMA	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1. A	1	0.65	1.00	0.85	0.85	0.55	1.00	0.95	0.85	1.00	0.60	0.83
2.	2	0.60	1.00	0.80	0.95	0.45	1.00	0.95	0.80	1.00	0.70	0.825
3.	3											
4.	Ort.	0.625	1.000	0.825	0.900	0.500	1.000	0.950	0.825	1.000	0.650	$\bar{X}_a = \frac{0.827}{5}$
5.	R	0.05	0.00	0.05	0.10	0.10	0.00	0.00	0.05	0.00	0.10	$\bar{R}_a = 0.045$
6. B	1	0.55	1.05	0.80	0.80	0.40	1.00	0.95	0.75	1.00	0.55	0.785
7.	2	0.55	0.95	0.75	0.75	0.40	1.05	0.90	0.70	0.95	0.50	0.75
8.	3											
9.	Ort.	0.550	1.000	0.775	0.775	0.400	1.025	0.925	0.725	0.975	0.525	$\bar{X}_b = \frac{0.767}{5}$
10.	R	0.00	0.10	0.05	0.05	0.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	$\bar{R}_b = 0.045$
11. C	1	0.50	1.05	0.80	0.80	0.45	1.00	0.95	0.80	1.05	0.85	0.825
12.	2	0.55	1.00	0.80	0.80	0.50	1.05	0.95	0.80	1.05	0.80	0.83
13.	3											
14.	Ort.	0.525	1.025	0.800	0.800	0.475	1.025	0.950	0.800	1.050	0.825	$\bar{X}_c = \frac{0.827}{5}$
15.	R	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	$\bar{R}_c = 0.030$
16. Parça Ort. (\bar{X}_p)		0.567	1.008	0.800	0.825	0.458	1.017	0.942	0.783	1.008	0.667	$\bar{\bar{X}} = \frac{0.807}{5}$
												$R_p = 0.559$
17.		[($\bar{R}_a = 0.045$) + ($\bar{R}_b = 0.045$) + ($\bar{R}_c = 0.03$)] / (Ölçümcü Sayısı= 3) =										$\bar{\bar{R}} = 0.04$
18.		(Max $\bar{X} = 0.8275$) - (Min $\bar{X} = 0.7675$) =										$\bar{X}_{DIFF} = 0.06$
19.		($\bar{\bar{R}} = 0.04$) x ($D_4 = 3.27$) =										UKL _R = 0.13
20.		($\bar{\bar{R}} = 0.04$) x ($D_3 = 0$) =										AKL _R = 0.00

2 deneme için $D_4=3.27$ ve 3 deneme için $D_4=2.58$ ' dir. 7 denemeye kadar $D_3=0$ ' dır. UKL_R, bireyin R' sinin (Aralığının) üst limitini temsil eder. Bu limitin üzerinde olanları daire içine alın, nedenini tespit edin ve düzeltin. Bu okumaları aynı ölçümcüyü ve birimi kullanarak tekrarlayın veya bu değerleri iptal edip, geri kalan gözlemlerden Ortalama Aralık ve limit değerleri tekrar hesaplayın.

Notlar: _____

Çizelge 5.2 Kalınlık Ölçümü Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Analiz Raporu

Parça No ve İsmi: XXXX			Cihaz İsmi: Mikrometre		Ölçümcü A: X	
Karakteristik: Kalınlık			Cihaz No: XXXX		Ölçümcü B: Y	
Tanım: 0.5-1.1 mm.			Cihaz Tipi: 0.00-10.00 mm		Ölçümcü C: Z	
\bar{R}	\bar{X}_{DIFF}	R_p	Deneme Sayısı (r)	Parça Sayısı (n)	Ölçümcü Sayısı (k)	Tarih
0.04	0.06	0.559	2	10	3	Mayıs 2007

Ölçüm Analizi				% Toplam Değişkenlik (TV)			
Tekrarlanabilirlik – Ekipman Değişkenliği (EV)				% EV = 100 (EV/TV) = 100 (0.18 / 0.93) = %18.7			
EV	= $\bar{R} \times K_1$		Deneme			K₁	
	= 0.04 x 4.56		2			4.56	
	= 0.18		3	3.05			
Tekrar Yapılabilirlik – Ölçümcü Değişkenliği (AV)				% AV = 100 (AV/TV) = 100 (0.16 / 0.93) = %16.8			
AV	= $\sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2 / n \cdot r)}$		Ölçümcü			2	3
	= $\sqrt{(0.06 \times 2.70)^2 - [0.18^2 / (10 \cdot 2)]}$		K ₂			3.65	2.70
	= 0.16						
Tekrarlanabilirlik & Tekrar Yapılabilirlik (R & R)				% R&R = 100 (R&R/TV) = 100 (0.16 / 0.93) = %25.2			
R & R	= $\sqrt{EV^2 + AV^2}$		Parça S			K₃	
	= $\sqrt{0.18^2 + 0.16^2}$		2			3.65	
	= 0.24		3	2.70			
Parça – Parçaya Değişkenliği (PV)				% PV = 100 (PV/TV) = 100 (0.90 / 0.93) = %96.8			
PV	= $R_p \times K_3$		4			2.30	
	= 0.559 x 1.62		5			2.08	
	= 0.90		6			1.93	
			7	1.82			
Toplam Değişkenlik (TV)				Farklı Kategori Sayısı (ndc) ndc = 1.41 (PV/R&R) = 1.41 (0.90 / 0.24) = 5			
TV	= $\sqrt{R \& R^2 + PV^2}$		8			1.74	
	= $\sqrt{0.24^2 + 0.90^2}$		9			1.67	
	= 0.93		10	1.62			

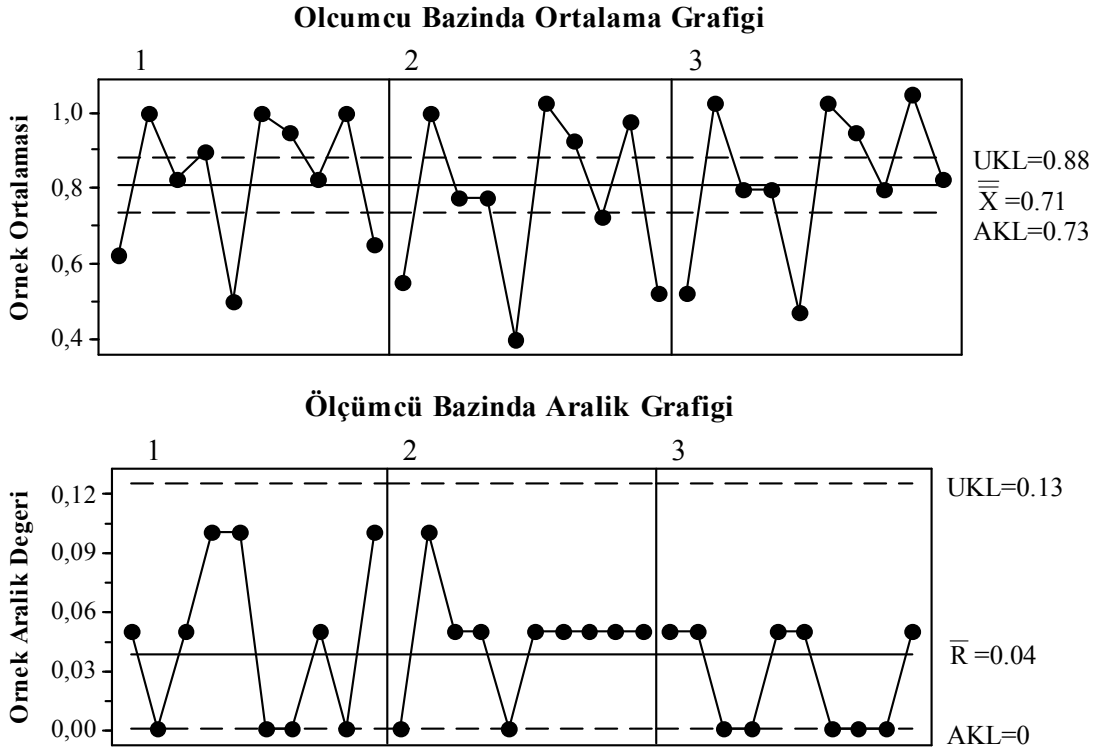
Bütün hesaplamalar 5.15 sigma tahminine dayalıdır (Normal dağılım eğrisinin altında kalan alanın % 99' u)

K₁: 5.15/d₂^{*} 'ye eşittir. d₂^{*}, deneme sayısına (m) ve (parça sayısı x ölçümcü sayısı)' na (g) bağlıdır ve bu değer 15' den büyük olarak kabul edilmiştir.

AV – Eğer karekök içindeki sayı negatif ise, ölçümcü değişkenliği (AV) sıfır (0) olarak alınır.

K₂: 5.15/d₂^{*} 'ye eşittir. d₂^{*}, ölçümcü sayısı (m) ve (g)' ye bağlıdır (sadece bir aralık hesaplaması olduğundan g=1)

K₃: 5.15/d₂^{*} 'ye eşittir. d₂^{*}, parça sayısı (m) ve (g)' ye bağlıdır (sadece bir aralık hesaplaması olduğundan g=1)



Şekil 5.1 Kalınlık Ölçüm Sonuçlarının Grafıksel Analizi

Şekil 5.1’ de ölçüm verilerinden yararlanılarak çizdirilen Ortalama–Aralık Grafiği görülmektedir. Aralık grafiğine bakıldığında, aralıkların kontrol altında olduğu görülebilir. Bu durum, bütün ölçümcülerin tutarlı olduğunu ve ölçüm cihazını hemen hemen aynı şekilde kullandıklarını gösterir.

Veriler, parça ölçümcü ortalama grafiğine (Şekil 5.1) işaretlendiğinde ve kontrol sınırları dışına düşen parça ortalamalarının sayısına bakıldığında, Kontrol Grafiği parça ortalamalarının büyük bir kısmının kontrol sınırlarının dışına düştüğünü gösterir. Bunun anlamı parça değişkenliğinin ölçüm sistemi değişkenliğine göre daha büyük olduğudur. Bu nedenle, ölçüm sistemi parça değişkenliği belirleme açısından yeterlidir. Ölçüm sisteminin süreç kontrolü için yeterli olup olmadığı, Farklı Veri Kategorileri Sayısı hesaplanarak kontrol edilebilir;

$$\frac{PV}{R \& R} \times 1.41 = \frac{0.90}{0.24} \times 1.41 \cong 5$$

Görüldüğü üzere bu çalışmada %R&R, %25.2 ve Farklı Veri Kategorileri Sayısı 5' dir. % R&R %10 ile %30 arasında yer aldığından bu ölçüm sistemi süreç değişkenliğini ölçmek için marjinal olarak kabul edilebilir. Farklı Veri Kategorileri Sayısı 5 olduğundan dolayı bu ölçüm sistemi süreç kontrolü için yeterlidir denilebilir.

Seçilen işletmede kalınlık ölçümleri açısından Ortalama ve Aralık metodu ile yapılan analiz için kullanılan veriler, ANOVA yöntemi kullanılarak tekrar değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ölçüm verileri Çizelge 5.1' de, bu veriler yardımıyla oluşturulan MINITAB ANOVA tablosu Çizelge 5.3' de, hesaplama yöntemiyle oluşturulan ANOVA tablosu Çizelge 5.4' de ve her iki yöntem (Ortalama–Aralık Metodu ve ANOVA Metodu) ile bulunan değerlerin karşılaştırıldığı tablo Çizelge 5.5' de yer almaktadır.

Sonuçlar karşılaştırıldığında, ortalama ve aralık yöntemi kullanılarak hesaplanan ekipman değişkenliği 0.18 iken, bu değer ANOVA yöntemi kullanıldığında 0.19 bulunmuştur ki her iki değer de birbirine yakındır. Burada dikkati çeken bir nokta R&R değerlerinin birbirinden olan farkıdır. Ortalama ve aralık yöntemi kullanılarak bulunan değer 0.24 iken, ANOVA yöntemi ile bulunan değer 0.34'dür. Bunun sebebi ortalama ve aralık metodunda doğal olarak hesaba alınamayan ölçümcü–parça etkileşiminin ANOVA metodunda dikkate alınmasıdır. Ölçümcü–parça etkileşimi için hesaplanan $F_{op}=4.45 > F_{0.05,18,30}=1.99$ olduğundan ölçümcü–parça etkileşimi önemlidir. Bu durum Çizelge 5.3' de yer alan “p” değerine bakılarak da görülebilir. Hesaplanan “p=0” değeri, analiz için kabul edilen “ $\alpha=0.05$ ” güven değerinden küçük olduğundan etkileşim önemlidir.

Buradan çıkarılacak sonuç bu üç ölçümcünün kalınlık ölçümleri ve mikrometre kullanımı üzerine bir eğitimden geçirilmesi gerektiğidir. Ayrıca bu ölçüm sistemi kullanılarak kabul edilmiş olan parçalar aynı işleve sahip başka bir mikrometre ile tekrar kontrol edilmelidir. Bu ölçüm sistemi ile kabul gören parçaların cam şekillendirme makinelerinde kullanılması makine çalışmasını olumsuz etkileyecek arızalara, dolayısıyla duruşlara ve üretim kaybına sebep olabilecektir. Eğer Varyans Analizi Yöntemi kullanılmamış olsaydı bu tür bir iyileştirme fırsatı gözden kaçırılabilirdi.

Çizelge 5.3 Kalınlık Ölçüm Sistemi MINITAB Varyans Analizi Tablosu

Source	DF	SS	MS	F	P
Parça	9	2.05871	0.228745	39.7178	0.000
Ölçümcü	2	0.04800	0.024000	4.1672	0.033
Parça * Ölçümcü	18	0.10367	0.005759	4.4588	0.000
Repeatability	30	0.03875	0.001292		
Total	59	2.24913			
Gage R&R					
Source	VarComp	%Contribution(of VarComp)			
Total Gage R&R	0.0044375	10.67			
Repeatability	0.0012917	3.10			
Reproducibility	0.0031458	7.56			
Ölçümcü	0.0009120	2.19			
Ölçümcü*Parça	0.0022338	5.37			
Part-To-Part	0.0371644	89.33			
Total Variation	0.0416019	100.00			
Source	StdDev(SD)	5.15*SD	(%SV)		
Total Gage R&R	0.066615	0.34306	32.66		
Repeatability	0.035940	0.18509	17.62		
Reproducibility	0.056088	0.28885	27.50		
Ölçümcü	0.030200	0.15553	14.81		
Ölçümcü*Parça	0.047263	0.24340	23.17		
Part-To-Part	0.192781	0.99282	94.52		
Total Variation	0.203965	1.05042	100.00		

Çizelge 5.4 Kalınlık Ölçüm Sistemi Varyans Analizi Tablosu

Kaynak	SD	SS	MS	F	EMS
Ölçümcü	2	0.04800	0.02400		$\tau^2 + 2\gamma^2 + 20\omega^2$
Parçalar	9	2.05871	0.22875		$\tau^2 + 2\gamma^2 + 6\sigma^2$
Ölçümcü x Parça	18	0.10367	0.00575	4.45	$\tau^2 + 2\gamma^2$
Ölçüm Cihazı	30	0.03875	0.00129		τ^2
Toplam	59	2.2491			

Değişkenlik Tahmini	Standart Sapma (σ)	5.15 (σ)	% Çalışma Değişkenliği	% Katkı
EV İçin $\tau^2 = 0.00129$	0.0359	EV = 0.19	%17.6	%3.1
AV İçin $\omega^2 = 0.00091$	0.0302	AV = 0.16	%14.8	%2.2
Etkileşim (I) İçin $\gamma^2 = 0.00223$	0.0472	I = 0.24	%23.2	%5.4
R&R İçin $\tau^2 + \gamma^2 + \omega^2 = 0.00443$	0.0666	R&R=0.34	%32.7	%10.7
PV İçin $\sigma^2 = 0.0371641$	0.1928	PV = 0.99	%94.5	%89.3

$$TV = \sqrt{R \& R^2 + PV^2} = \sqrt{0.34^2 + 0.99^2} \Rightarrow TV = 1.05$$

$$\%Ç.Değ. = 100 \times \left(\frac{5.15\sigma}{TV} \right)$$

$$\%Katkı = 100 \times \left(\frac{5.15\sigma}{TV} \right)^2$$

Çizelge 5.5 Kalınlık Ölçümü İçin ANOVA ve Ortalama–Aralık Metodu Karşılaştırma Tablosu

Metot	EV	AV	I	R&R	PV	TV	%R&R	%EV	%AV	%PV
Ortalama–Aralık	0.18	0.16	-	0.24	0.90	0.93	%25.2	%18.7	%16.8	%96.8
ANOVA	0.19	0.16	0.24	0.34	0.99	1.05	%32.7	%17.6	%14.8	%94.5

Varyans Analizi Metodu kullanılarak yapılan analiz için örnek büyüklüğünün yeterliliğini değerlendirmek istenilirse, işlem şu şekilde gerçekleştirilir:

1. Söz konusu ürün için süreç değişkenliği, ölçüm sistemi değişkenliği ve bu ikisinden faydalanılarak gerçek değişkenlik hesaplanır. Ölçü Kontrol Birimi'nde daha önce yapılmış olan kontrollerden faydalanılarak bu ürün için süreç değişkenliği 0.04 olarak bulunmuştur:

$$\sigma_{\bar{x}} = 0.2$$

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = 0.04$$

$$\sigma_m^2 = 0.00443$$

$$\sigma_m = 0.0666$$

$$\sigma_g^2 = \sigma_{\bar{x}}^2 - \sigma_m^2 = 0.04 - 0.00443 \Rightarrow \sigma_g^2 = 0.0356$$

$$\sigma_g = 0.189$$

2. Hesaplanan gerçek değişkenlik ve ölçüm sistemi değişkenliği yardımıyla r oranı bulunur:

$$r = \frac{\sigma_g}{\sigma_m} = \frac{0.189}{0.0666} \Rightarrow r \cong 3$$

3. Alt Spesifikasyon Sınırı (ASS), Üst Spesifikasyon Sınırı (ÜSS) ve nominal değer (μ) yardımıyla k_1 ve k_2 hesaplanır. Bu parça için belirlenmiş olan ASS=0.5 mm, ÜSS=1.1 mm ve $\mu=0.8$ mm'dir.

$$k_1 = \frac{(\mu - ASS)}{\sigma_g} = \frac{(0.8 - 0.5)}{0.189} \Rightarrow k_1 \cong 1.5$$

$$k_2 = \frac{(\bar{USS} - \mu)}{\sigma_g} = \frac{(1.1 - 0.8)}{0.189} \Rightarrow k_2 \cong 1.5$$

$$k_1 = k_2 = k$$

4. Art–Craft firmasında test sınırları spesifikasyon sınırları ile aynı olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla $b=0$ olacaktır. Bulunan tüm değerler yardımıyla EK 4’de yer alan tablodan $\alpha=0.0558$ ve $\beta=0.0268$ olarak bulunur.
5. Art–Craft firmasında bu parça için kabul edilebilir hatalı oranı $p_1=0.01$ ve kabul edilemez hatalı oranı $p_2=0.10$ olarak belirlenmiştir.
6. p_1 , p_2 , α ve β değerleri için z değerleri Ek 3’de yer alan “ z Dağılımı Tablosu”ndan sırasıyla 2.33, 1.28, 1.59 ve 1.93 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla örnek büyüklüğü (n) aşağıdaki gibi bulunur:

$$n = \left(\frac{z_\alpha + z_\beta}{z_{p_1} - z_{p_2}} \right)^2 = \left(\frac{1.59 + 1.93}{2.33 - 1.28} \right)^2 \Rightarrow n \cong 11$$

Ölçüm Sistem Analizinde genel olarak kullanılan örnek büyüklüğü olan 10 ile büyük bir fark olmadığından bu analizde kullanılan örnek büyüklüğü yeterli bulunmuştur.

5.2. Uzunluk Ölçüm Analizi

Ölçü Kontrol Biriminde tedarikçiden temin edilen başka bir parçanın kritik boyutunun (uzunluk) ölçülmesi amacıyla rasgele seçilen 10 parça, yine rasgele seçilen 3 ölçümcüye, 0.01 hassasiyetli dijital kumpas ile 3 defa ölçtürülmüştür. Elde edilen ölçüm sonuçları Çizelge 5.6’ da verilmiştir. Ölçüm sonuçları yardımıyla yapılan hesaplamaların yer aldığı rapor sayfası Çizelge 5.7’ de verilmiştir.

Yapılan çalışmada, toplanan veriler yardımıyla bireysel ölçümlerin ortalamaları (\bar{X}_a , \bar{X}_b , \bar{X}_c) ve aralık ortalamaları (\bar{R}_a , \bar{R}_b , \bar{R}_c) her ölçümcü için hesaplanır. Daha sonra,

- Ölçümcü ortalamalarının aralığı (\bar{X}_{DIFF}),
- Ölçümcü ortalamalarının ortalamaları ($\bar{\bar{X}}$),
- Ölçümcü aralıklarının ortalaması ($\bar{\bar{R}}$),

- Parça ortalamalarının aralığı (R_p) hesaplanır.

Burada ölçülen parçalar için alt ve üst spesifikasyon sınırları bilindiğinden dolayı R&R % hesaplamaları iki şekilde yapılabilir:

- Toplam değişkenlik yardımıyla,
- Tolerans yardımıyla.

$$\bar{X}_a = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r X_{nr}}{n \times r} = \frac{92.45 + 90.81 + \dots + 107.15 + 107.88}{10 \times 3} \Rightarrow \bar{X}_a = 100.0263 \text{mm.}$$

$$\bar{X}_b = \frac{91.14 + 92.17 + \dots + 107.15 + 107.01}{10 \times 3} \Rightarrow \bar{X}_b = 99.6747 \text{mm.}$$

$$\bar{X}_c = \frac{90.86 + 91.00 + \dots + 106.97 + 107.30}{10 \times 2} \Rightarrow \bar{X}_c = 99.3433 \text{mm.}$$

$$\bar{R}_a = \frac{1.64 + 0.92 + \dots + 0.73}{10} \Rightarrow \bar{R}_a = 1.41$$

$$\bar{R}_b = \frac{1.09 + 0.98 + \dots + 0.20}{10} \Rightarrow \bar{R}_b = 0.78$$

$$\bar{R}_c = \frac{1.31 + 0.23 + \dots + 0.33}{10} \Rightarrow \bar{R}_c = 0.93$$

$$\bar{\bar{R}} = \frac{\bar{R}_a + \bar{R}_b + \bar{R}_c}{k} = \frac{1.41 + 0.78 + 0.93}{3} \Rightarrow \bar{\bar{R}} = 1.0370$$

Bir sonraki basamak parça ölçümcü ortalama grafiği için üst kontrol limiti (UCL_x) ve alt kontrol limitinin (LCL_x) hesaplanmasıdır.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}_p}{n} = \frac{91.63 + \dots + 107.26}{10} \Rightarrow \bar{\bar{X}} = 99.6814$$

$$UCL_x = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{\bar{R}} = 99.6814 + 1.023 \times 1.0370$$

$$UCL_x = 100.74$$

$$LCL_x = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{\bar{R}}$$

$$LCL_x = 99.6814 - 1.023 \times 1.0370$$

$$LCL_x = 98.62$$

Çizelge 5.6 Uzunluk Ölçüm Verileri

ÖLÇÜMCÜ/ DENEYE #	PARÇA										ORTALAMA	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1. A	1	92.45	99.96	97.65	105.79	108.74	87.21	96.63	99.84	105.30	107.39	100.10
2.	2	90.81	99.83	98.60	107.30	109.44	87.52	97.66	99.21	105.49	107.15	100.30
3.	3	91.88	99.04	96.35	106.25	108.01	85.54	96.22	99.01	106.64	107.88	99.68
4.	Ort.	91.71	99.61	97.53	106.45	108.73	87.76	96.84	99.35	105.81	107.47	$\bar{X}_a = 100.0263$
5.	R	1.64	0.92	2.25	1.51	1.43	1.98	1.44	0.83	1.34	0.73	$\bar{R}_a = 1.41$
6. B	1	91.14	99.53	97.80	105.70	107.36	86.50	96.59	98.19	105.34	107.21	99.54
7.	2	92.17	99.23	97.76	106.89	107.55	86.22	96.61	97.77	104.09	107.15	99.54
8.	3	92.23	100.21	97.81	107.57	108.66	86.26	96.52	98.43	104.74	107.01	99.94
9.	Ort.	91.85	99.66	97.79	106.72	107.86	86.33	96.57	98.13	104.72	107.12	$\bar{X}_b = 99.6747$
10.	R	1.09	0.98	0.05	1,87	1.30	0.28	0.09	0.66	1.25	0.20	$\bar{R}_b = 0.78$
11. C	1	90.86	98.57	97.86	106.09	108.32	87.19	96.79	97.83	105.17	107.28	99.60
12.	2	91.00	98.34	96.03	105.70	107.66	85.84	96.51	98.70	105.46	106.97	99.22
13.	3	92.17	98.39	96.44	106.03	106.65	86.35	96.18	97.84	104.78	107.30	99.21
14.	Ort.	91.34	98.43	96.78	105.94	107.54	86.46	96.49	98.12	105.14	107.18	$\bar{X}_c = 99.3433$
15.	R	1.31	0.23	1.83	0.39	1.67	1.35	0.61	0.87	0.68	0.33	$\bar{R}_c = 0.93$
16. Parça Ort. (\bar{X}_p)		91.63	99.23	97.37	106.37	108.04	86.51	96.63	98.54	105.22	107.26	$\bar{\bar{X}} = 99.6814$ $R_p = 21.53$
17.		[($\bar{R}_a = 1.41$) + ($\bar{R}_b = 0.78$) + ($\bar{R}_c = 0.93$)] / (Ölçümcü Sayısı= 3) =										$\bar{\bar{R}} = 1.0370$
18.		(Max $\bar{X} = 100.0263$) - (Min $\bar{X} = 99.3433$) =										$\bar{X}_{DIFF} = 0.683$
19.		($\bar{\bar{R}} = 1.0370$) x ($D_4 = 2.58$) =										$UCL_R = 2.6755$
20.		($\bar{\bar{R}} = 1.0370$) x ($D_3 = 0$) =										$LCL_R = 0$
2 deneme için $D_4=3.27$ ve 3 deneme için $D_4=2.58$ ' dir. 7 denemeye kadar $D_3=0$ ' dir. UCLR, bireyin R' sinin (Aralığının) üst limitini temsil eder. Bu limitin üzerinde olanları daire içine alın, nedenini tespit edin ve düzeltin. Bu okumaları aynı ölçümcüyü ve birimi kullanarak tekrarlayın veya bu değerleri iptal edip, geri kalan gözlemlerden Ortalama Aralık ve limit değerleri tekrar hesaplayın.												
Notlar:												

Çizelge 5.7 Uzunluk Ölçümü Tekrarlanabilirlik ve Tekrar Yapılabilirlik Raporu

Parça No ve İsmi: xxx			Cihaz İsmi: Kumpas		Ölçümcü A: xxx	
Karakteristik: xxx			Cihaz No:		Ölçümcü B: xxx	
Tanım: 101±15			Cihaz Tipi: 0–150mm. (0.01mm)		Ölçümcü C: xxx	
\bar{R}	\bar{X}_{DIFF}	R_p	Deneme Sayısı (r)	Parça Sayısı (n)	Ölçümcü Sayısı (k)	Tarih
1.0370	0.683	21.53	3	10	3	Haziran 2007

Ölçüm Analizi				% Toplam Değişkenlik (TV)		
Tekrarlanabilirlik – Ekipman Değişkenliği (EV)				% EV = 100 (EV/TV) = 100 (3.1628 / 35.0655) = %9		
EV	= $\bar{R} \times K_1$ = 1.0370 x 3.05 = 3.1628	Deneme	K₁			
		2	4.56			
		3	3.05			
Tekrar Yapılabilirlik – Ölçümcü Değişkenliği (AV)				% AV = 100 (AV/TV) = 100 (1.7514 / 35.0655) = %5		
AV	= $\sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - (EV^2 / n \cdot r)}$ = $\sqrt{(0.683 \times 2.70)^2 - [10.0033 / (10 \cdot 3)]}$ = 1.7514	Ölçümcü	2			3
		K_2	3.65			2.70
Tekrarlanabilirlik & Tekrar Yapılabilirlik (R & R)				% R&R = 100 (R&R/TV) = 100 (3.6153 / 35.0655) = %10.3		
R & R	= $\sqrt{EV^2 + AV^2}$ = $\sqrt{3.1628^2 + 1.7514^2}$ = 3.6153	Parça S	K₃			
		2	3.65			
		3	2.70			
Parça – Parçaya Değişkenliği (PV)				% PV = 100 (PV/TV) = 100 (34.8786 / 35.0655) = %99.5		
PV	= $R_p \times K_3$ = 21.53 x 1.62 = 34.8786	4	2.30			
		5	2.08			
		6	1.93			
		7	1.82			
Toplam Değişkenlik (TV)				Farklı Kategori Sayısı (ndc) ndc = 1.41 (PV/R&R) = 1.41 (34.8786 / 3.6153) = 14		
TV	= $\sqrt{R \& R^2 + PV^2}$ = $\sqrt{3.6153^2 + 34.8786^2}$ = 35.0655	8	1.74			
		9	1.67			
		10	1.62			

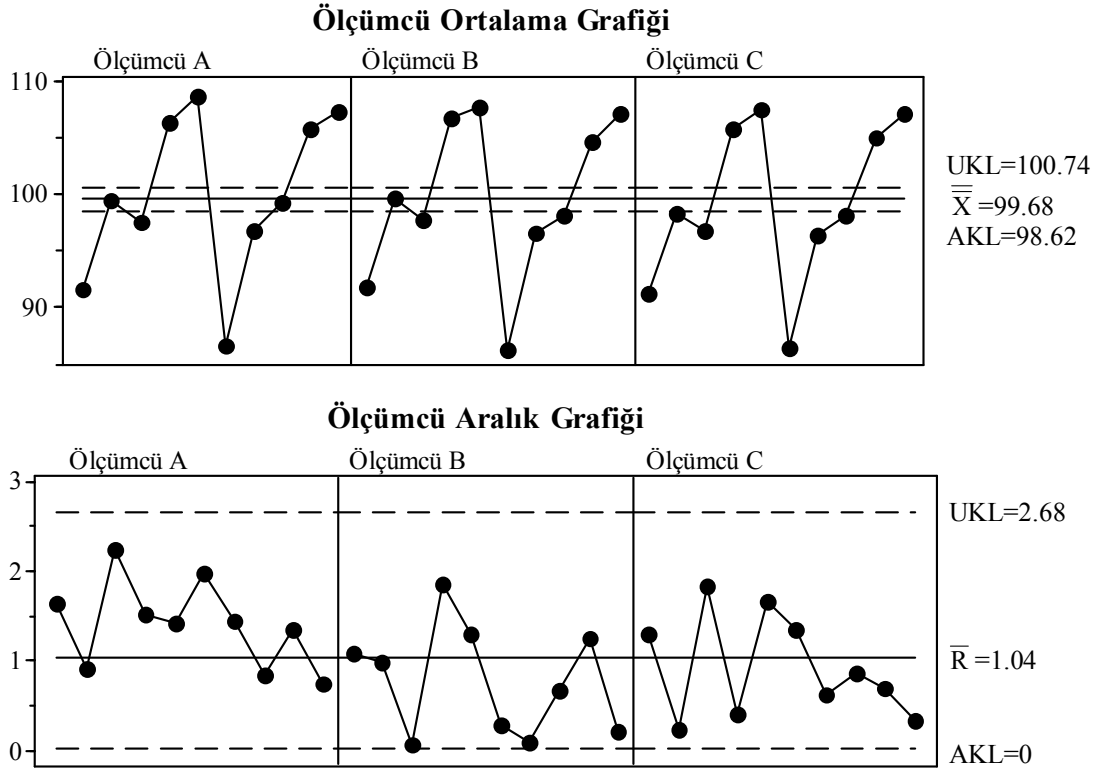
Bütün hesaplamalar 5.15 sigma tahminine dayalıdır (Normal dağılım eğrisinin altında kalan alanın % 99' u)

K_1 : $5.15/d_2^*$ 'ye eşittir. d_2^* , deneme sayısına (m) ve (parça sayısı x ölçümcü sayısı)' na (g) bağlıdır ve bu değer 15' den büyük olarak kabul edilmiştir.

AV – Eğer karekök içindeki sayı negatif ise, ölçümcü değişkenliği (AV) sıfır (0) olarak alınır.

K_2 : $5.15/d_2^*$ 'ye eşittir. d_2^* , ölçümcü sayısı (m) ve (g)' ye bağlıdır (sadece bir aralık hesaplaması olduğundan g=1)

K_3 : $5.15/d_2^*$ 'ye eşittir. d_2^* , parça sayısı (m) ve (g)' ye bağlıdır (sadece bir aralık hesaplaması olduğundan g=1)



Şekil 5.2 Uzunluk Ölçüm Sonuçları Grafikselsel Analizi

Şekil 5.2' de yer alan Ortalama grafiğine bakıldığında, ölçümcü ortalamalarının büyük çoğunluğunun kontrol sınırları dışında olduğu görülmektedir. Bu, parça değişkenliğinin ölçüm sistemi değişkenliğinden daha büyük olduğunu ve bu sebeple de bu ölçüm sisteminin parça değişkenliğindeki değişimleri kolaylıkla belirleyebileceğini gösterir.

Aralık Grafiğine bakıldığında, aralık değerlerinin kontrol altında olduğu (yani, UKL_R ve AKL_R arasında) görülmektedir. Bu, bütün ölçümcülerin tutarlı olduğunu gösterir. Fakat grafikler daha detaylı incelendiğinde 1. ölçümcünün diğerlerinden biraz daha farklı olduğu görülebilir. 1. ölçümcünün ölçtüğü parça aralığı çoğunlukla ortalamanın üstünde kalmaktadır.

Görüldüğü üzere bu çalışmada %R&R, %10 ve Farklı Veri Kategorileri Sayısı 14' dür. Bu nedenle ölçüm sistemi süreç değişkenliğini ölçmek için kabul edilebilir ve süreç kontrolü için yeterlidir denilebilir.

Eğer % değerler hesaplanılırken Toplam Değişkenlik (TV) değerleri değil de Tolerans değeri kullanılsaydı sonuçlar şu şekilde olacaktı:

$$\text{Tolerans} = \text{USL} - \text{ASL} = 127 - 76.2 = 50.8$$

$$\%EV = 100 (EV / \text{Tolerans}) = 100 (3.1628 / 50.8)$$

$$\%EV = \%6$$

$$\%AV = 100 (AV / \text{Tolerans}) = 100 (1.7514 / 50.8)$$

$$\%AV = \%3$$

$$\%R\&R = 100 (R\&R / \text{Tolerans}) = 100 (3.6153 / 50.8)$$

$$\%R\&R = \%7$$

$$\%PV = 100 (PV / \text{Tolerans}) = 100 (34.8786 / 50.8)$$

$$\%PV = \%69$$

Hangi yöntemin kullanılacağı uygulamada daha çok müşterinin hangi yöntemle analizin yapılmasını istediğine bağlıdır. Ayrıca, ölçüm cihazının güvenilirliğinin tespit edilmesi açısından Tolerans yönteminin kullanılması istatistiksel olarak daha avantajlıdır. Fakat her iki yöntem de geçerlidir.

Yukarıda Ortalama ve Aralık metodu ile yapılan analiz, ANOVA metodu kullanılarak tekrarlanmıştır. Ölçüm verileri Çizelge 5.6' da, ölçüm verileri kullanılarak oluşturulan MINITAB ANOVA Tablosu Çizelge 5.8' de, hesaplama yöntemi ile oluşturulan ANOVA Tablosu Çizelge 5.9' da ve Çizelge 5.10' da, her iki yöntem ile elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı tablo Çizelge 5.11' de verilmiştir.

Sonuçlar birbiriyle karşılaştırıldığında görülmektedir ki, Varyans Analizinde ölçümcü–parça etkileşimi istatistiksel olarak göz ardı edilebileceğinden, etkileşim sonuçlara dahil edilmemiş ve her iki analiz yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın çıkmıştır.

Çizelge 5.8 Uzunluk Ölçüm Sistemi MINITAB Varyans Analizi Tablosu

Source	DF	SS	MS	F	P
Parça	9	4113.63	457.071	1232.53	0.000
Ölçümcü	2	7.00	3.500	9.44	0.002
Parça * Ölçümcü	18	6.68	0.371	0.96	0.515
Repeatability	60	23.17	0.386		
Total	89	4150.47			
Two-Way ANOVA Table Without Interaction					
Source	DF	SS	MS	F	P
Parça	9	4113.63	457.071	1194.72	0.000
Ölçümcü	2	7.00	3.500	9.15	0.000
Repeatability	78	29.84	0.383		
Total	89	4150.47			
Gage R&R					
Source	VarComp	%Contribution(of VarComp)			
Total Gage R&R	0.4865	0.95			
Repeatability	0.3826	0.75			
Reproducibility	0.1039	0.20			
Ölçümcü	0.1039	0.20			
Part-To-Part	50.7431	99.05			
Total Variation	51.2296	100.00			
Source	StdDev(SD)	5.15*SD	%SV		
Total Gage R&R	0.69748	3.5920	9.74		
Repeatability	0.61853	3.1854	8.64		
Reproducibility	0.32234	1.6601	4.50		
Ölçümcü	0.32234	1.6601	4.50		
Part-To-Part	7.12342	36.6856	99.52		
Total Variation	7.15748	36.8610	100.00		

Çizelge 5.9 Uzunluk Ölçüm Sistemi Varyans Analizi Tablosu

Kaynak	SD	SS	MS	F	EMS
Ölçümcü	9	4113.63	457.071		$\tau^2 + 3\gamma^2 + 30\omega^2$
Parçalar	2	7.00	3.500		$\tau^2 + 3\gamma^2 + 9\sigma^2$
Ölçümcü x Parça	18	6.68	0.371	0.96	$\tau^2 + 9\gamma^2$
Ölçüm Cihazı	60	23.17	0.386		τ^2
Toplam	89	4150.47			

Ölçümcü–Parça Etkileşimi için hesaplanan F değeri, F dağılımı tablosundaki değer ile karşılaştırıldığında, $F_{op}=0.96 < F_{0.05,18,60}=1.81$ olduğundan dolayı bu etkileşimin aslında istatistiksel olarak önemli olmadığı ve ihmal edilebileceği görülebilir. Aynı sonuca Çizelge 5.8’ de yer alan “ $p=0.515$ ” değeri “ $\alpha=0.05$ ” güven seviyesi karşılaştırılarak da varılabilir. Dolayısıyla tablo ölçümcü–parça etkileşimi göz ardı edilerek yeniden düzenlenebilir. Düzenlenen tablo Çizelge 5.10’ da verilmiştir.

Çizelge 5.10 Ölçümcü-Parça Etkileşimi Hariç ANOVA Tablosu

Kaynak	SD	SS	MS	F	EMS
Ölçümcü	9	4113.63	457.071		$\tau^2 + 3\gamma^2 + 30\omega^2$
Parçalar	2	7.00	3.500		$\tau^2 + 3\gamma^2 + 9\sigma^2$
Ölçüm Cihazı	78	29.84	0.383		τ^2
Toplam	89	4150.47			

Değişkenlik Tahmini	Standart Sapma (σ)	5.15 (σ)	% Çalışma Değişkenliği	% Katkı
EV İçin $\tau^2 = 0.3826$	0.6185	EV = 3.1853	%8.6	%0.75
AV İçin $\omega^2 = 0.1039$	0.3223	AV = 1.6598	%4.5	%0.2
Etkileşim (I) İçin $\gamma^2 = 0.1039$ (Ölçümcü)	0.3223	I = 1.6598	%4.5	%0.2
R&R İçin $\tau^2 + \gamma^2 + \omega^2 = 0.4865$	0.6975	R&R = 3.5921	%9.7	%0.95
PV İçin $\sigma^2 = 50.7431$	7.1234	PV = 36.6855	%99.5	%99.05

$$TV = \sqrt{R \& R^2 + PV^2} = \sqrt{3.5921^2 + 36.6855^2} \Rightarrow TV = 36.8609$$

$$\%Ç.Değ. = 100 \times \left(\frac{5.15\sigma}{TV} \right)$$

$$\%Katkı = 100 \times \left(\frac{5.15\sigma}{TV} \right)^2$$

Farklı Veri Kategorisi Sayısı: $ndc = 1.41$ (PV / R&R) = 1.41 (36.6855 / 3.5921) = 14

Çizelge 5.11 Uzunluk Ölçümü İçin ANOVA ve Ortalama–Aralık Metodu Karşılaştırma Tablosu

Metot	EV	AV	I	R&R	PV	TV	%R&R	%EV	%AV	%PV
Ortalama–Aralık	3.1628	1.7514	-	3.6153	34.8786	35.0655	10.3	9	5	99.5
ANOVA	3.1853	1.6598	1.6598	3.5921	36.6855	36.8609	9.7	8.6	4.5	99.5

Varyans Analizi Metodu kullanılarak yapılan analiz için örnek büyüklüğünün yeterliliği değerlendirilecek olursa:

1. Söz konusu ürün için süreç değişkenliği, ölçüm sistemi değişkenliği ve bu ikisinden faydalanılarak gerçek değişkenlik hesaplanır. Ölçü Kontrol Birimi'nde daha önce yapılmış olan kontrollerden faydalanılarak bu ürün için değişkenlik 5.7014 olarak bulunmuştur:

$$\sigma_{\bar{x}} = 5.7014$$

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = 32.5060$$

$$\sigma_m^2 = 0.4865$$

$$\sigma_m = 0.6975$$

$$\sigma_g^2 = \sigma_{\bar{x}}^2 - \sigma_m^2 = 32.5060 - 0.4865 \Rightarrow \sigma_g^2 = 32.0195$$

$$\sigma_g = 5.6586$$

2. Hesaplanan gerçek üretim değişkenliği ve ölçüm sistemi değişkenliği yardımıyla r oranı bulunur:

$$r = \frac{\sigma_g}{\sigma_m} = \frac{5.6586}{0.6975} \Rightarrow r \cong 8$$

3. Alt Spesifikasyon Sınırı (ASS), Üst Spesifikasyon Sınırı (ÜSS) ve nominal değer (μ) yardımıyla k_1 ve k_2 hesaplanır. Bu parça için belirlenmiş olan ASS=86 mm, ÜSS=116 mm ve $\mu=101$ mm'dir.

$$k_1 = \frac{(\mu - ASS)}{\sigma_g} = \frac{(101 - 86)}{5.6586} \Rightarrow k_1 \cong 2.5$$

$$k_2 = \frac{(\bar{U}SS - \mu)}{\sigma_g} = \frac{(116 - 101)}{5.6586} \Rightarrow k_2 \cong 2.5$$

$$k_1 = k_2 = k$$

4. Art–Craft firmasında test sınırları spesifikasyon sınırları ile aynı olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla $b=0$ olacaktır. Bulunan tüm değerler yardımıyla EK 4’de yer alan tablodan $\alpha=0.0021$ ve $\beta=0.0015$ olarak bulunur.
5. Art–Craft firmasında bu parça için kabul edilebilir hatalı oranı $p_1=0.01$ ve kabul edilemez hatalı oranı $p_2=0.15$ olarak belirlenmiştir.
6. p_1 , p_2 , α ve β değerleri için z değerleri Ek 3’de yer alan “ z Dağılımı Tablosu”ndan sırasıyla 2.33, 1.04, 2.87 ve 2.97 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla örnek büyüklüğü (n) aşağıdaki gibi bulunur:

$$n = \left(\frac{z_\alpha + z_\beta}{z_{p_1} - z_{p_2}} \right)^2 = \left(\frac{2.87 + 2.97}{2.33 - 1.04} \right)^2 \Rightarrow n \cong 20$$

Bu ölçüm sistemi Varyans Analizi Metodu kullanılarak analiz edildiğinde seçilmesi gereken örnek büyüklüğü 20 olmalıdır. Görüldüğü üzere, genel olarak kabul gören 10 adetlik örnek büyüklüğü, Varyans Analizi Metodunun kullanımı söz konusu olduğunda her zaman yeterli olmayabilir. Bu sebeple, 10 parçalık bir örnek daha alınmış ve Varyans Analizi Metodu ile ölçüm sistemi analizi tekrarlanmıştır. 20 parçanın ölçüm sonuçları Çizelge 5.12’de ve değişkenlik bileşenleri açısından MINITAB analiz çıktısı Çizelge 5.13’de verilmiştir.

10 adet örnek alınarak yapılan analizde ölçümcü–parça etkileşimi istatistiksel olarak önemsiz çıkmışken, 20 adet örnek alınarak yapılan analizde aynı etkileşim istatistiksel olarak önemli çıkmış ve analize dahil edilmiştir. % R&R, $n=10$ için % 9.7 iken, $n=20$ olduğunda % 9.87, % EV $n=10$ için % 8.6 iken, $n=20$ için % 9.19, % AV $n=10$ için % 4.5 iken, $n=20$ için % 3.61 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.12 Uzunluk Ölçüm Verileri (n=20)

Ölçümcü	A			B			C		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	92.45	90.81	91.88	91.14	92.17	92.23	90.86	91.00	92.17
2	99.96	99.83	99.04	99.53	99.23	100.21	98.57	98.34	98.39
3	97.65	98.60	96.35	97.80	97.76	97.81	97.86	96.03	96.44
4	105.79	107.30	106.25	105.70	106.89	107.57	106.09	105.70	106.03
5	108.74	109.44	108.01	107.36	107.55	108.66	108.32	107.66	106.65
6	87.21	87.52	85.54	86.50	86.22	86.26	87.19	85.84	86.35
7	96.63	97.66	96.22	96.59	96.61	96.52	96.79	96.51	96.18
8	99.84	99.21	99.01	98.19	97.77	98.43	97.83	98.70	97.84
9	105.30	105.49	106.64	105.34	104.09	104.74	105.17	105.46	104.78
10	107.39	107.15	107.88	107.21	107.15	107.01	107.28	106.97	107.30
11	92.07	92.17	91.00	90.81	91.15	91.88	92.17	92.45	91.98
12	99.23	98.39	98.34	99.83	99.89	99.04	99.23	99.96	99.14
13	97.76	96.54	96.03	98.60	97.34	96.35	97.76	97.65	96.25
14	106.89	106.13	105.70	107.30	106.80	106.25	106.89	105.89	106.15
15	107.55	106.75	107.66	109.44	107.75	108.01	107.55	108.74	108.10
16	86.22	86.35	85.84	87.52	87.25	85.54	86.22	87.21	85.75
17	96.61	96.18	96.51	97.66	96.85	96.22	96.61	96.63	96.05
18	97.77	97.84	98.70	99.21	98.84	99.01	97.77	99.84	99.10
19	104.09	104.78	105.46	105.49	105.38	106.64	104.09	105.30	106.24
20	107.15	107.30	106.97	107.15	106.83	107.88	107.15	107.39	107.98

Çizelge 5.13 Uzunluk Ölçümü MINITAB Varyans Analizi Tablosu (n=20)

Gage R&R			
Source	VarComp	%Contribution(of VarComp)	
Total Gage R&R	0.4737	0.97	
Repeatability	0.4104	0.84	
Reproducibility	0.0633	0.13	
Ölçümcü	0.0051	0.01	
Ölçümcü*Parça	0.0583	0.12	
Part-To-Part	48.1682	99.03	
Total Variation	48.6419	100.00	
Source	StdDev(SD)	5.15*SD	(%SV)
Total Gage R&R	0.68827	3.5446	9.87
Repeatability	0.64061	3.2991	9.19
Reproducibility	0.25167	1.2961	3.61
Ölçümcü	0.07121	0.3667	1.02
Ölçümcü*Parça	0.24139	1.2432	3.46
Part-To-Part	6.94033	35.7427	99.51
Total Variation	6.97437	35.9180	100.00

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Üretim süreci istatistiksel olarak kararlı bir şekilde işlerken üretilen ürünlerin spesifikasyon sınırları içerisinde oluşma derecesini belirlemek için, ürünlerin kalite karakteristiklerinin ölçülmesi gerekli olmaktadır. Yapılan ölçümlerden, elde edilen veriler ile sürecin spesifikasyonları sağlama derecesi, süreç yeterlilik indeksleri ile belirlenebilir. Süreç yeterlilik indekslerinin güvenilir sonuçlar vermesi için, ölçümlerden elde edilen verilerin de güvenilir olması gereklidir. Ölçüm sonuçlarının güvenilir olması için de, ölçüm sisteminin analiz edilmesi önemli bir ögeyi oluşturmaktadır. Ölçüm sisteminin analizi için belirli bir sıklık önerilmemekle birlikte, incelenecek cihaz için, cihazın bir önceki kalibrasyonu ile takip eden kalibrasyonu arasında rutin olarak yapılabilir. Eğer, ölçüm sistemi ile elde edilen sonuçlardan ciddi bir kuşku söz konusu ise analiz rutinden bağımsız olarak mutlaka yapılmalıdır.

Ölçüm sistemlerinin değerlendirilmesi, mutlaka söz konusu ölçüm sisteminin kullandığı ürünün ölçülecek kalite karakteristiğine bağlı olarak yapılmalıdır. Çünkü bir parçanın herhangi bir kalite karakteristiği için yeterli olabilen bir ölçüm sistemi, bir başka parçanın farklı bir kalite karakteristiği için uygun olmayabilir.

Bu tez çalışmasında, Ölçüm Sistem Analizi ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalardan faydalanılarak sofracı üreticisi olan Art-Craft firmasında, Ölçü Kontrol Birimi'nde uygulanan ve problem oluşturabileceği düşünülen iki ölçüm sürecinin analizi için bir model oluşturulmuştur.

Çalışmada, Ölçüm Sistem Analizi için tavsiye edilen 10 adet parça kullanılmıştır. Fakat, analiz Varyans Analizi Metodu kullanılarak yapılacak ise her zaman 10 adet parça seçilmesinin, değişkenliğin doğru tespit edilebilmesi için yeterli olmayabileceği bilhassa ikinci uygulamada kendini göstermiştir. Her ne kadar uzunluk ölçümü çalışmasında genel olarak kabul gören ve tavsiye edilen örnek büyüklüğü kullanılmış ise de daha sonra yapılan yeterlilik analizi sonucunda en az 20 adet parça seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu da göstermektedir ki Varyans Analizi Metodu kullanılacaksa, ölçüm sistemi analizine başlamadan önce bu çalışmada anlatılan veya benzeri bir yöntemle örnek büyüklüğünün ne olması gerektiği saptanmalıdır. Ayrıca, sık kullanılan α , β , p_1 ve p_2 değerlerine göre hesaplanmış örnek büyüklükleri EK 5'de bir çizelge halinde verilmiştir.

Çalışmada ilk değerlendirme kalınlık ölçümü için kullanılan mikrometre ile yapılmıştır. Elde edilen ölçüm verileri hem Ortalama-Aralık metodu, hem de Varyans Analizi metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında, ortalama ve aralık yöntemi

kullanılarak hesaplanan ekipman değişkenliği 0.18 iken, bu değer ANOVA yöntemi kullanıldığında 0.19 bulunmuştur ki her iki değer de birbirine yakındır. Ölçümcü değişkenliği her iki yöntem ile 0.16 olarak bulunmuştur. Burada dikkati çeken bir nokta R&R değerlerinin birbirinden olan farkıdır. Ortalama ve aralık yöntemi kullanılarak bulunan değer 0.24 iken, ANOVA yöntemi ile bulunan değer 0.34'dür. Bunun sebebi ortalama ve aralık metodunda doğal olarak hesaba alınamayan ölçümcü–parça etkileşiminin ANOVA metodunda dikkate alınmasıdır. Ölçümcü–parça etkileşimi için hesaplanan $F_{op}=4.45 > F_{0.05,18,30}=1.99$ olduğundan ölçümcü–parça etkileşimi önemlidir. Bu durum Çizelge 5.3' de yer alan “p” değerine bakılarak da görülebilir. Hesaplanan “p=0” değeri, analiz için kabul edilen “ $\alpha=0.05$ ” güven değerinden küçük olduğundan etkileşim önemlidir.

Her iki metot da ölçüm sisteminde iyileştirme yapılması gereği sonucunu ortaya çıkarmıştır, fakat Ortalama–Aralık Metodu sistemin marjinal olarak kullanılabilmesi sonucunu vermiştir. Varyans analizi sonuçlarına bakıldığında sistemin kabul edilemez olduğu ve kesinlikle iyileştirme yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Ayrıca, ölçüm cihazı değişkenliği (EV=0.19), ölçümcü değişkenliğine (AV=0.16) göre büyük olduğundan uygunsuzluğun en büyük sebebi ölçüm cihazıdır denilebilir. Bu sebeple ve ISO 9001:2000 Madde 7.6'da yer alan “İzleme ve ölçme cihazlarının şartlara uygun olmadığı anlaşıldığında, önceden yapılmış ölçüm sonuçlarının geçerliliği değerlendirilmeli, sonuçlar kayıt edilmeli ve uygun tedbirler alınmalıdır” paragrafının getirdiği sorumluluktan dolayı; aynı özelliklere sahip başka bir ölçüm cihazı ile daha önceden kabul edilmiş parçalar arasından rastgele olarak seçilen örneklerde yapılan kontrollerde, analizi yapılan ölçüm cihazı ile kabul edilen parçaların bir kısmının aslında belirlenen spesifikasyonlara uygun olmadığı tespit edilmiştir. Böylece spesifikasyonlara uygun olmayan malzeme yüzünden yaşanabilecek daha büyük arıza ve duruş kaybı dolayısıyla oluşabilecek maliyetlerin önüne geçilmiştir. Ek olarak ölçüm yapan elemanlara ölçüm ekipmanı kullanımı ve bakımı ile ilgili eğitim verilmiştir.

İkinci değerlendirme kumpas ile uzunluk ölçümü üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada da her iki niceliksel analiz metodu kullanılmıştır. Ekipman değişkenliği (EV), Ortalama–Aralık Metodu ile 3.1628, Varyans Analizi Metodu ile 3.1853 olarak hesaplanmıştır. Ölçümcü değişkenliği (AV), Ortalama–Aralık Metodu ile 1.7514, Varyans Analizi Metodu ile 1.6598 olarak bulunmuştur. Farklı Veri Kategorileri Sayısının 5'den büyük olması ile bu sistemin süreç kontrolü için de kullanılabilmesi sonucu ortaya çıkmıştır.

Varyans Analizi Metodu kullanılarak yapılan analizde, ölçümcü–parça etkileşimi (I) için hesaplanan F değeri, F dağılımı tablosundaki değer ile karşılaştırıldığında, $F_{op}=0.96 <$

$F_{0.05,18,60}=1.81$ olduğundan dolayı ölçümcü–parça etkileşiminin göz ardı edilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır. % R&R değeri Ortalama–Aralık Metodu kullanılarak yapılan analizde % 10.3, Varyans Analizi Metodu ile yapılan analizde ise % 9.7 çıkmıştır. Varyans Analizi Metodu açısından yapılan örnek yeterlilik analizi sonucu olması gereken örnek büyüklüğü 20 olarak tespit edildiğinden, 20 parça üzerinde analiz tekrarlanmış ve % R&R değeri % 9.87, Ekipman Değişkenliği % 9.19 ve Ölçümcü Değişkenliği % 3.61 olarak bulunmuştur. Ölçümcü–parça etkileşimi 10 parça kullanılarak yapılan analizde göz ardı edilebilir çıkarken, 20 parça ile tekrarlanan analizde ise önemli olarak çıkmıştır. % R&R değeri dikkate alındığında, incelenen ölçüm sisteminin süreç değişkenliğini doğru olarak tespit edebileceğinden dolayı uzunluk ölçümünde kullanılabileceği söylenebilir.

Bu tür bir analiz çalışması, tezde ele alınan şirket gibi daha önce ölçüm sistem analizi yapmamış bir firmada uygulanmış ise bir sonraki adım, kalite yönetim sistemi içinde çalışmanın hangi aşamalarda yapılacağını anlatan yazılı dokümanların ve formların oluşturulması ve uygulamanın sürekliliğinin sağlanması olmalıdır. Bunun yanında, işletme tedarikçilerini de benzeri bir ölçüm sistem analizi uygulamasına teşvik etmelidir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Pyzdek T., 2003, Quality Engineering Handbook, Mercel Dekker Inc, 714 p.
- [2] NIST, 2006, Engineering Statistics Handbook, www.itl.nist.gov/div898/handbook, 3118p.
- [3] Ford Motor Company, General Motors Corporation and Daimler Chrysler Corporation, 2002, MSA Reference Manual, 3rd Ed., 225 p.
- [4] ISO, 1993, Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement, International Organization for Standardization, 113p.
- [5] Deming W. E., 1982, Quality Productivity and Competitive Position, MIT Press, 373 p.
- [6] Ermer D. S., 2006(b), Appraiser Variation in Gage R&R Measurement, Quality Progress, 75–78.
- [7] Chambers J., Cleveland W., Kleiner B. and Tukey P., 1983, Graphical Methods for Data Analysis, Wadsworth, 336 p.
- [8] Montgomery D. C., 2005, Introduction to Statistical Quality Control, 5th ed., John Wiley and Sons, 776 p.
- [9] Juran J. M. and Godfrey A. B., 1999, Juran's Quality Handbook, 5th ed. McGraw–Hill, 1730p.
- [10] Duncan A. J., 1986, Quality Control and Industrial Statistics, 5th ed., Irwin, 1123p.
- [11] Gelipgiden B., 2001, QS–9000 Kalite Güvence Sisteminin Referans Konularından Ölçüm Sistemleri Analizinin İstatistiksel Olarak İncelenmesi ve Bir İşletmede Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik Ana Bilim Dalı, 262 s.
- [12] Hoaglin D. C. and Mosteller F., Tukey J. W., 1991, Fundamentals of Exploratory Analysis of Variance, John Wiley and Sons, 448 p.
- [13] Allen E. A., Burdick R. K. and Larsen G. A., 2002, Comparing Variability of Two Measurement Processes Using R&R Studies, Journal of Quality Technology, Vol. 34, No. 1, 97–105.
- [14] Burdick R. K. and Larsen G. A., 1997, Confidence Intervals on Measures of Variability in R&R Studies, Journal of Quality Technology Vol. 29 No. 3, 261–273.
- [15] Burdick R. K. and Daniels L., 2005, Confidence Intervals in Gauge R&R Study with Fixed Operators, Journal of Quality Technology, Vol. 37 No. 3, 179–185.
- [16] Burdick R. K., Montgomery D. C. and Park Y. J., 2005, Confidence Intervals for Misclassification Rates in a Gauge R&R Study, Journal of Quality Technology, Vol. 37 No. 4, 294–303.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [17] Ermer D. S., 2006(a), Improved Gage R&R Measurement Studies, *Quality Progress*, 77–79.
- [18] Graham R. M., 2006(a), Four Steps to Ensure Measurement Data Quality Part 1 *Quality Progress*, 80–82.
- [19] Graham R. M., 2006(b), Four Steps to Ensure Measurement Data Quality Part 2 *Quality Progress*, 82–85.
- [20] Mast J. and Trip A., 2005, Gauge R&R Studies for Destructive Measurements, *Journal of Quality Technology*, Vol. 37 No. 1, 40–49.
- [21] Mast J. and Wieringen W. N., 2007, Measurement System Analysis for Categorical Measurements: Agreement and Kappa Type Indices, *Journal of Quality Technology*, Vol. 39 No. 3, 191–202.
- [22] Semerci H., 1998, Kalite Güvence Sistemlerinde Ölçüm Hatalarının Ayırıştırılmasında Kullanılan İstatistiksel Yaklaşımlar Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Ekonometri Ana Bilim Dalı, 134 p.
- [23] Sweet A. L., Tjokrodjojo S. and Wijaya P., 2005, An Investigation of the Measurement Systems Analysis “Analytic Method” for Attribute Gages, *Quality Engineering*, 17:219–226.
- [24] Voelkel J. G., 2003, Gauge R&R Analysis for Two Dimensional Data with Circular Tolerances, *Journal of Quality Technology*, Vol. 35 No. 2, 153–167.
- [25] Montgomery D. C. and Runger G. C., 2003, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 3rd ed., John Wiley and Sons, 822p.
- [26] Breyfogle III F. W., 2003, *Implementing Six Sigma*, 2nd ed., John Wiley and Sons, 1229p.
- [27] Brownlee K. A., 1984, *Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering*, 2nd Ed., Krieger Pub. Co., 590 p.
- [28] Burdick R. K., Borror C. M. and Montgomery D. C., 2003, A Review of Methods for Measurement System Capability Analysis, *Journal of Quality Technology*, Vol. 35 No. 4, 115–135.
- [29] Draper N. R. and Smith H., 1998, *Applied Regression Analysis*, 3rd Ed., Wiley–Interscience, 736 p.
- [30] Gillespie R., 1993, *Manufacturing Knowledge: A History of the Hawthorne Experiments*, Cambridge University Press, 292 p.
- [31] Guttentag M. and Struening E. L., 1975, *Handbook of Evaluation Research*, Vol. 1, Sage Publications Inc, 696 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [32] Hamada M. and Weerahandi S, 2000, Measurement System Assessment via Generalized Inference, Journal of Quality Technology Vol. 32, No. 3, 241–253.
- [33] Mosteller F. and Tukey J., 1977, Data Analysis and Regression, Addison-Wesley, 608 p.

EKLER

EK 1

 d_2^* değerleri [1]

	m													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.41	1.91	2.24	2.48	2.67	2.83	2.96	3.08	3.18	3.27	3.35	3.42	3.49	3.55
2	1.28	1.81	2.15	2.40	2.60	2.77	2.91	3.02	3.13	3.22	3.30	3.38	3.45	3.51
3	1.23	1.77	2.12	2.38	2.58	2.75	2.89	3.01	3.11	3.21	3.29	3.37	3.43	3.50
4	1.21	1.75	2.11	2.37	2.57	2.74	2.88	3.00	3.10	3.20	3.28	3.36	3.43	3.49
5	1.19	1.74	2.10	2.36	2.56	2.73	2.87	2.99	3.10	3.19	3.28	3.35	3.42	3.49
6	1.18	1.73	2.09	2.35	2.56	2.73	2.87	2.99	3.10	3.19	3.27	3.35	3.42	3.49
7	1.17	1.73	2.09	2.35	2.55	2.72	2.87	2.99	3.10	3.19	3.27	3.35	3.42	3.48
g 8	1.17	1.72	2.08	2.35	2.55	2.72	2.87	2.98	3.09	3.19	3.27	3.35	3.42	3.48
9	1.16	1.72	2.08	2.34	2.55	2.72	2.86	2.98	3.09	3.18	3.27	3.35	3.42	3.48
10	1.16	1.72	2.08	2.34	2.55	2.72	2.86	2.98	3.09	3.18	3.27	3.34	3.42	3.48
11	1.16	1.71	2.08	2.34	2.55	2.72	2.86	2.98	3.09	3.18	3.27	3.34	3.41	3.48
12	1.15	1.71	2.07	2.34	2.55	2.72	2.85	2.98	3.09	3.18	3.27	3.34	3.41	3.48
13	1.15	1.71	2.07	2.34	2.55	2.71	2.85	2.98	3.09	3.18	3.27	3.34	3.41	3.48
14	1.15	1.71	2.07	2.34	2.54	2.71	2.85	2.98	3.08	3.18	3.27	3.34	3.41	3.48
15	1.15	1.71	2.07	2.34	2.54	2.71	2.85	2.98	3.08	3.18	3.26	3.34	3.41	3.48
>15	1.128		2.059		2.534		2.847		3.078		3.258		3.407	
		1.693		2.326		2.704		2.970		3.173		3.336		3.472

EK 2

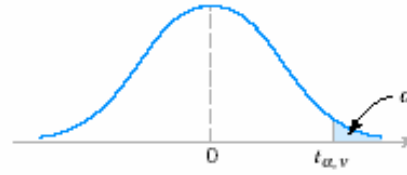
Nicel Kontrol Grafikleri Sabitleri [25]

n	\bar{X} Grafiği			R Grafiği		S Grafiği
	A1	A2	d2	D3	D4	c4
2	3.760	1.880	1.128	0	3.267	0.7979
3	2.394	1.023	1.693	0	2.575	0.8862
4	1.880	0.729	2.059	0	2.282	0.9213
5	1.596	0.577	2.326	0	2.115	0.9400
6	1.410	0.783	2.534	0	2.004	0.9515
7	1.277	0.419	2.704	0.076	1.924	0.9594
8	1.175	0.373	2.847	0.136	1.864	0.9650
9	1.094	0.337	2.970	0.184	1.816	0.9693
10	1.028	0.308	3.078	0.223	1.777	0.9727
11	0.973	0.285	3.173	0.256	1.744	0.9754
12	0.925	0.266	3.258	0.284	1.716	0.9776
13	0.884	0.249	3.336	0.308	1.692	0.9794
14	0.848	0.235	3.407	0.329	1.671	0.9810
15	0.816	0.223	3.472	0.348	1.652	0.9823
16	0.788	0.212	3.532	0.364	1.636	0.9835
17	0.762	0.203	3.588	0.379	1.621	0.9845
18	0.738	0.194	3.640	0.392	1.608	0.9854
19	0.717	0.187	3.689	0.404	1.596	0.9862
20	0.697	0.180	3.735	0.414	1.586	0.9869
21	0.679	0.173	3.778	0.425	1.575	0.9876
22	0.662	0.167	3.819	0.434	1.566	0.9882
23	0.647	0.162	3.858	0.443	1.557	0.9887
24	0.632	0.157	3.895	0.452	1.548	0.9892
25	0.619	0.153	3.931	0.459	1.541	0.9896

EK 3
DAĞILIM TABLOLARI

Çizelge 1. z dağılımı tablosu [25]

<i>z</i>	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.500000	0.503989	0.507978	0.511967	0.515953	0.519939	0.523922	0.527903	0.531881	0.535856
0.1	0.539828	0.543795	0.547758	0.551717	0.555760	0.559618	0.563559	0.567495	0.571424	0.575345
0.2	0.579260	0.583166	0.587064	0.590954	0.594835	0.598706	0.602568	0.606420	0.610261	0.614092
0.3	0.617911	0.621719	0.625516	0.629300	0.633072	0.636831	0.640576	0.644309	0.648027	0.651732
0.4	0.655422	0.659097	0.662757	0.666402	0.670031	0.673645	0.677242	0.680822	0.684386	0.687933
0.5	0.691462	0.694974	0.698468	0.701944	0.705401	0.708840	0.712260	0.715661	0.719043	0.722405
0.6	0.725747	0.729069	0.732371	0.735653	0.738914	0.742154	0.745373	0.748571	0.751748	0.754903
0.7	0.758036	0.761148	0.764238	0.767305	0.770350	0.773373	0.776373	0.779350	0.782305	0.785236
0.8	0.788145	0.791030	0.793892	0.796731	0.799546	0.802338	0.805106	0.807850	0.810570	0.813267
0.9	0.815940	0.818589	0.821214	0.823815	0.826391	0.828944	0.831472	0.833977	0.836457	0.838913
1.0	0.841345	0.843752	0.846136	0.848495	0.850830	0.853141	0.855428	0.857690	0.859929	0.862143
1.1	0.864334	0.866500	0.868643	0.870762	0.872857	0.874928	0.876976	0.878999	0.881000	0.882977
1.2	0.884930	0.886860	0.888767	0.890651	0.892512	0.894350	0.896165	0.897958	0.899727	0.901475
1.3	0.903199	0.904902	0.906582	0.908241	0.909877	0.911492	0.913085	0.914657	0.916207	0.917736
1.4	0.919243	0.920730	0.922196	0.923641	0.925066	0.926471	0.927855	0.929219	0.930563	0.931888
1.5	0.933193	0.934478	0.935744	0.936992	0.938220	0.939429	0.940620	0.941792	0.942947	0.944083
1.6	0.945201	0.946301	0.947384	0.948449	0.949497	0.950529	0.951543	0.952540	0.953521	0.954486
1.7	0.955435	0.956367	0.957284	0.958185	0.959071	0.959941	0.960796	0.961636	0.962462	0.963273
1.8	0.964070	0.964852	0.965621	0.966375	0.967116	0.967843	0.968557	0.969258	0.969946	0.970621
1.9	0.971283	0.971933	0.972571	0.973197	0.973810	0.974412	0.975002	0.975581	0.976148	0.976705
2.0	0.977250	0.977784	0.978308	0.978822	0.979325	0.979818	0.980301	0.980774	0.981237	0.981691
2.1	0.982136	0.982571	0.982997	0.983414	0.983823	0.984222	0.984614	0.984997	0.985371	0.985738
2.2	0.986097	0.986447	0.986791	0.987126	0.987455	0.987776	0.988089	0.988396	0.988696	0.988989
2.3	0.989276	0.989556	0.989830	0.990097	0.990358	0.990613	0.990863	0.991106	0.991344	0.991576
2.4	0.991802	0.992024	0.992240	0.992451	0.992656	0.992857	0.993053	0.993244	0.993431	0.993613
2.5	0.993790	0.993963	0.994132	0.994297	0.994457	0.994614	0.994766	0.994915	0.995060	0.995201
2.6	0.995339	0.995473	0.995604	0.995731	0.995855	0.995975	0.996093	0.996207	0.996319	0.996427
2.7	0.996533	0.996636	0.996736	0.996833	0.996928	0.997020	0.997110	0.997197	0.997282	0.997365
2.8	0.997445	0.997523	0.997599	0.997673	0.997744	0.997814	0.997882	0.997948	0.998012	0.998074
2.9	0.998134	0.998193	0.998250	0.998305	0.998359	0.998411	0.998462	0.998511	0.998559	0.998605
3.0	0.998650	0.998694	0.998736	0.998777	0.998817	0.998856	0.998893	0.998930	0.998965	0.998999
3.1	0.999032	0.999065	0.999096	0.999126	0.999155	0.999184	0.999211	0.999238	0.999264	0.999289
3.2	0.999313	0.999336	0.999359	0.999381	0.999402	0.999423	0.999443	0.999462	0.999481	0.999499
3.3	0.999517	0.999533	0.999550	0.999566	0.999581	0.999596	0.999610	0.999624	0.999638	0.999650
3.4	0.999663	0.999675	0.999687	0.999698	0.999709	0.999720	0.999730	0.999740	0.999749	0.999758
3.5	0.999767	0.999776	0.999784	0.999792	0.999800	0.999807	0.999815	0.999821	0.999828	0.999835
3.6	0.999841	0.999847	0.999853	0.999858	0.999864	0.999869	0.999874	0.999879	0.999883	0.999888
3.7	0.999892	0.999896	0.999900	0.999904	0.999908	0.999912	0.999915	0.999918	0.999922	0.999925
3.8	0.999928	0.999931	0.999933	0.999936	0.999938	0.999941	0.999943	0.999946	0.999948	0.999950
3.9	0.999952	0.999954	0.999956	0.999958	0.999959	0.999961	0.999963	0.999964	0.999966	0.999967

Çizelge 2. t dağılımı tablosu ($t_{\alpha,v}$) [25]

α										
v	.40	.25	.10	.05	.025	.01	.005	.0025	.001	.0005
1	.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	.289	.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	23.326	31.598
3	.277	.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	.271	.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	.267	.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	.265	.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	.263	.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	.262	.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	.261	.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	.260	.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	.260	.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	.259	.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	.259	.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	.258	.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	.258	.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	.258	.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	.257	.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	.257	.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	.257	.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	.257	.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	.257	.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	.256	.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	.256	.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	.256	.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	.256	.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	.256	.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	.256	.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	.256	.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	.256	.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
30	.256	.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.030	3.385	3.646
40	.255	.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	2.971	3.307	3.551
60	.254	.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	2.915	3.232	3.460
120	.254	.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	2.860	3.160	3.373
∞	.253	.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

v = degrees of freedom.

Çizelge 3. F dağılımı tablosu ($\alpha = 0.10$) [25]

		Degrees of freedom for the numerator (v_1)																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
v_2	1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.22	61.74	62.00	62.26	62.53	62.79	63.06	63.33
	2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.47	9.48
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.22	5.20	5.18	5.17	5.17	5.16	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.79	3.78	3.76
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.14	3.12	3.10
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.87	2.84	2.82	2.80	2.78	2.76	2.74	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.63	2.59	2.58	2.56	2.54	2.51	2.49	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.46	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.34	2.30	2.28	2.25	2.23	2.21	2.18	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.24	2.20	2.18	2.16	2.13	2.11	2.08	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.03	2.00	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.10	2.06	2.04	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	2.01	1.96	1.94	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.97	1.92	1.90	1.87	1.85	1.82	1.79	1.76
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.94	1.89	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72
17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.91	1.86	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.88	1.89	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.86	1.81	1.79	1.76	1.73	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.84	1.79	1.77	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.82	1.83	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.84	1.80	1.80	1.74	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.61	1.57	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52
26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.76	1.71	1.68	1.65	1.61	1.58	1.54	1.50
27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.75	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.53	1.49
28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.74	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.48
29	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.73	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55	1.51	1.47
30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.03	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.72	1.67	1.64	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.66	1.61	1.57	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.60	1.54	1.51	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29
120	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.60	1.55	1.55	1.48	1.45	1.41	1.37	1.32	1.26	1.19
∞	2.71	2.30	2.08	1.94	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.49	1.42	1.38	1.34	1.30	1.24	1.17	1.00

Degrees of freedom for the denominator (v_2)

Çizelge 4. F dağılımı tablosu ($\alpha = 0.05$) [25]

ν_1	Degrees of freedom for the numerator (ν_1)																				ν_2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞		
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	19.50	
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	8.53	
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	5.63	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	4.36	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	3.67	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	3.23	
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	2.93	
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	2.71	
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	2.54	
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	2.40	
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	2.30	
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	2.21	
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	2.13	
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	2.07	
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	2.01	
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01	1.96	
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	1.92	
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	1.88	
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	1.84	
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	1.81	
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	1.78	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	1.76	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	1.73	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	1.71	
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	1.69	
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	1.67	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	1.65	
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	1.64	
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	1.62	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	1.61	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	1.51	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	1.39	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25	1.25	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.12	1.12	

Degrees of freedom for the denominator (ν_2)

Çizelge 5. F dağılımı tablosu ($\alpha = 0.025$) [25]

		Degrees of freedom for the numerator (v_1)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	100	120	∞
v_2	1	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	956.7	963.3	968.6	976.7	984.9	993.1	997.2	1001	1006	1010	1014	1018	1018
	2	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.39	39.40	39.41	39.41	39.43	39.45	39.46	39.46	39.47	39.48	39.49	39.50
3	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17	14.12	14.08	14.04	13.99	13.95	13.95	13.90	
4	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.75	8.66	8.56	8.51	8.46	8.41	8.36	8.31	8.26	8.26	
5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.28	6.23	6.18	6.12	6.07	6.02	6.02	
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.12	5.07	5.01	4.96	4.90	4.85	4.85	
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.42	4.36	4.31	4.25	4.20	4.14	4.14	
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.20	4.10	4.00	3.95	3.89	3.84	3.78	3.73	3.67	3.67	
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.61	3.56	3.51	3.45	3.39	3.33	3.33	
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.37	3.31	3.26	3.20	3.14	3.08	3.08	
11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.17	3.12	3.06	3.00	2.94	2.88	2.88	
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.02	2.96	2.91	2.85	2.79	2.72	2.72	
13	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.89	2.84	2.78	2.72	2.66	2.60	2.60	
14	6.30	4.86	4.24	3.89	3.66	3.50	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.79	2.73	2.67	2.61	2.55	2.49	2.49	
15	6.20	4.77	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.70	2.64	2.59	2.52	2.46	2.40	2.40	
16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.50	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.63	2.57	2.51	2.45	2.38	2.32	2.32	
17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.25	2.25	
18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.10	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.26	2.19	2.19	
19	5.92	4.51	3.90	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.45	2.39	2.33	2.27	2.20	2.13	2.13	
20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.41	2.35	2.29	2.22	2.16	2.09	2.09	
21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.80	2.73	2.64	2.53	2.42	2.37	2.31	2.25	2.18	2.11	2.04	2.04	
22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.70	2.60	2.50	2.39	2.33	2.27	2.21	2.14	2.08	2.00	2.00	
23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.90	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.30	2.24	2.18	2.11	2.04	1.97	1.97	
24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.54	2.44	2.33	2.27	2.21	2.15	2.08	2.01	1.94	1.94	
25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.30	2.24	2.18	2.12	2.05	1.98	1.91	1.91	
26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.22	2.16	2.09	2.03	1.95	1.88	1.88	
27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.19	2.13	2.07	2.00	1.93	1.85	1.85	
28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.17	2.11	2.05	1.98	1.91	1.83	1.83	
29	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.89	1.81	1.81	
30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.20	2.14	2.07	2.01	1.94	1.87	1.79	1.79	
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	2.01	1.94	1.88	1.80	1.72	1.64	1.64	
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.88	1.82	1.74	1.67	1.58	1.48	1.48	
120	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.76	1.69	1.61	1.53	1.43	1.31	1.31	
∞	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.94	1.83	1.71	1.64	1.57	1.48	1.39	1.27	1.00	1.00	

Degrees of freedom for the denominator (v_2)

EK 4

Test ve Spesifikasyon Sınırlarının Çeşitli Değerleri İçin Üretici ve Tüketici Riskleri ve Ölçüm Hataları [11]

$r \backslash b$	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
(i) $k_1 = 1.5, k_2 = 1.5$									
1	.0374	.0606	.0941	.1403	.2011	.2769	.3710	.4792	.6004
	<u>.0940</u>	<u>.0826</u>	<u>.0704</u>	<u>.0580</u>	<u>.0459</u>	<u>.0338</u>	<u>.0251</u>	<u>.0170</u>	<u>.0104</u>
2	.0149	.0240	.0370	.0551	.0791	.1097	.1475	.1926	.2453
	<u>.0749</u>	<u>.0641</u>	<u>.0531</u>	<u>.0426</u>	<u>.0330</u>	<u>.0245</u>	<u>.0175</u>	<u>.0119</u>	<u>.0078</u>
4	.0062	.0102	.0156	.0229	.0325	.0445	.0591	.0764	.0962
	<u>.0503</u>	<u>.0422</u>	<u>.0343</u>	<u>.0270</u>	<u>.0205</u>	<u>.0150</u>	<u>.0106</u>	<u>.0071</u>	<u>.0046</u>
8	.0029	.0047	.0071	.0103	.0145	.0197	.0259	.0331	.0413
	<u>.0297</u>	<u>.0245</u>	<u>.0196</u>	<u>.0153</u>	<u>.0115</u>	<u>.0083</u>	<u>.0058</u>	<u>.0039</u>	<u>.0025</u>
(ii) $k_1 = 1.5, k_2 = 2.0$									
1	.0294	.0480	.0754	.1136	.1648	.2301	.3120	.4088	.5198
	<u>.0635</u>	<u>.0558</u>	<u>.0478</u>	<u>.0394</u>	<u>.0313</u>	<u>.0233</u>	<u>.0173</u>	<u>.0120</u>	<u>.0078</u>
2	.0110	.0178	.0277	.0415	.0598	.0835	.1131	.1489	.1912
	<u>.0511</u>	<u>.0438</u>	<u>.0364</u>	<u>.0293</u>	<u>.0227</u>	<u>.0169</u>	<u>.0121</u>	<u>.0082</u>	<u>.0054</u>
4	.0045	.0074	.0113	.0167	.0237	.0325	.0434	.0562	.0710
	<u>.0348</u>	<u>.0292</u>	<u>.0238</u>	<u>.0187</u>	<u>.0143</u>	<u>.0104</u>	<u>.0074</u>	<u>.0049</u>	<u>.0032</u>
8	.0021	.0034	.0051	.0074	.0105	.0142	.0187	.0239	.0298
	<u>.0207</u>	<u>.0172</u>	<u>.0137</u>	<u>.0107</u>	<u>.0081</u>	<u>.0058</u>	<u>.0041</u>	<u>.0027</u>	<u>.0017</u>
(iii) $k_1 = 1.5, k_2 = 2.5$									
1	.0238	.0390	.0613	.0928	.1353	.1900	.2595	.3428	.4396
	<u>.0516</u>	<u>.0454</u>	<u>.0388</u>	<u>.0319</u>	<u>.0253</u>	<u>.0188</u>	<u>.0141</u>	<u>.0098</u>	<u>.0063</u>
2	.0088	.0143	.0221	.0331	.0478	.0668	.0906	.1195	.1537
	<u>.0414</u>	<u>.0354</u>	<u>.0294</u>	<u>.0237</u>	<u>.0183</u>	<u>.0136</u>	<u>.0097</u>	<u>.0066</u>	<u>.0043</u>
4	.0036	.0059	.0090	.0133	.0189	.0260	.0346	.0448	.0567

$r \backslash b$	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
8	.0017	.0027	.0040	.0060	.0083	.0113	.0149	.0191	.0238
	<u>.0167</u>	<u>.0138</u>	<u>.0110</u>	<u>.0086</u>	<u>.0065</u>	<u>.0047</u>	<u>.0033</u>	<u>.0022</u>	<u>.0014</u>
(iv) $k_1=1.5, k_2=3.0$									
1	.0207	.0339	.0532	.0802	.1167	.1635	.2232	.2947	.3784
	<u>.0480</u>	<u>.0422</u>	<u>.0360</u>	<u>.0297</u>	<u>.0235</u>	<u>.0174</u>	<u>.0130</u>	<u>.0091</u>	<u>.0060</u>
2	.0079	.0127	.0197	.0294	.0423	.0589	.0796	.1046	.1316
	<u>.0383</u>	<u>.0328</u>	<u>.0272</u>	<u>.0219</u>	<u>.0169</u>	<u>.0126</u>	<u>.0090</u>	<u>.0061</u>	<u>.0040</u>
4	.0033	.0053	.0081	.0120	.0170	.0233	.0310	.0401	.0506
	<u>.0258</u>	<u>.0217</u>	<u>.0176</u>	<u>.0139</u>	<u>.0105</u>	<u>.0077</u>	<u>.0054</u>	<u>.0036</u>	<u>.0023</u>
8	.0015	.0024	.0037	.0054	.0075	.0102	.0135	.0173	.0215
	<u>.0153</u>	<u>.0126</u>	<u>.0101</u>	<u>.0079</u>	<u>.0059</u>	<u>.0043</u>	<u>.0030</u>	<u>.0020</u>	<u>.0013</u>
(v) $k_1=2.0, k_2=2.0$									
1	.0214	.0353	.0567	.0869	.1284	.1831	.2526	.3378	.4383
	<u>.0330</u>	<u>.0290</u>	<u>.0251</u>	<u>.0208</u>	<u>.0166</u>	<u>.0127</u>	<u>.0093</u>	<u>.0065</u>	<u>.0043</u>
2	.0072	.0117	.0184	.0278	.0405	.0573	.0787	.1052	.1372
	<u>.0273</u>	<u>.0236</u>	<u>.0197</u>	<u>.0159</u>	<u>.0124</u>	<u>.0092</u>	<u>.0067</u>	<u>.0046</u>	<u>.0030</u>
4	.0028	.0046	.0070	.0104	.0149	.0205	.0276	.0360	.0459
	<u>.0193</u>	<u>.0162</u>	<u>.0133</u>	<u>.0105</u>	<u>.0080</u>	<u>.0059</u>	<u>.0042</u>	<u>.0028</u>	<u>.0018</u>
8	.0013	.0020	.0031	.0045	.0063	.0086	.0114	.0146	.0183
	<u>.0118</u>	<u>.0098</u>	<u>.0077</u>	<u>.0061</u>	<u>.0046</u>	<u>.0034</u>	<u>.0023</u>	<u>.0016</u>	<u>.0010</u>
(vi) $k_1=2.0, k_2=2.5$									
1	.0158	.0263	.0426	.0661	.0989	.1430	.2001	.2716	.3579
	<u>.0211</u>	<u>.0186</u>	<u>.0161</u>	<u>.0133</u>	<u>.0106</u>	<u>.0082</u>	<u>.0060</u>	<u>.0042</u>	<u>.0027</u>
2	.0050	.0081	.0128	.0194	.0286	.0406	.0562	.0757	.0997
	<u>.0176</u>	<u>.0152</u>	<u>.0127</u>	<u>.0103</u>	<u>.0080</u>	<u>.0060</u>	<u>.0043</u>	<u>.0030</u>	<u>.0019</u>
4	.0019	.0031	.0047	.0071	.0101	.0140	.0188	.0246	.0315
	<u>.0125</u>	<u>.0106</u>	<u>.0086</u>	<u>.0068</u>	<u>.0052</u>	<u>.0039</u>	<u>.0027</u>	<u>.0018</u>	<u>.0012</u>

$r \backslash d$	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
8	.0009	.0013	.0020	.0030	.0042	.0058	.0076	.0099	.0123
	<u>.0077</u>	<u>.0064</u>	<u>.0052</u>	<u>.0040</u>	<u>.0030</u>	<u>.0022</u>	<u>.0015</u>	<u>.0010</u>	<u>.0007</u>
(vii) $k_1=2.0, k_2=3.0$									
1	.0127	.0212	.0344	.0535	.0803	.1165	.1638	.2236	.2966
	<u>.0175</u>	<u>.0154</u>	<u>.0133</u>	<u>.0111</u>	<u>.0088</u>	<u>.0067</u>	<u>.0049</u>	<u>.0035</u>	<u>.0023</u>
2	.0040	.0066	.0103	.0157	.0230	.0327	.0452	.0608	.0800
	<u>.0146</u>	<u>.0126</u>	<u>.0105</u>	<u>.0085</u>	<u>.0066</u>	<u>.0049</u>	<u>.0036</u>	<u>.0024</u>	<u>.0016</u>
4	.0016	.0025	.0038	.0057	.0082	.0113	.0152	.0200	.0255
	<u>.0103</u>	<u>.0087</u>	<u>.0071</u>	<u>.0056</u>	<u>.0043</u>	<u>.0032</u>	<u>.0022</u>	<u>.0015</u>	<u>.0010</u>
8	.0007	.0011	.0017	.0024	.0034	.0047	.0062	.0080	.0101
	<u>.0063</u>	<u>.0052</u>	<u>.0042</u>	<u>.0033</u>	<u>.0025</u>	<u>.0018</u>	<u>.0013</u>	<u>.0009</u>	<u>.0006</u>
(viii) $k_1=2.5, k_2=2.5$									
1	.0101	.0174	.0286	.0453	.0694	.1028	.1476	.2054	.2774
	<u>.0092</u>	<u>.0082</u>	<u>.0071</u>	<u>.0059</u>	<u>.0047</u>	<u>.0036</u>	<u>.0027</u>	<u>.0018</u>	<u>.0010</u>
2	.0027	.0045	.0072	.0111	.0166	.0240	.0337	.0463	.0621
	<u>.0077</u>	<u>.0068</u>	<u>.0057</u>	<u>.0047</u>	<u>.0037</u>	<u>.0028</u>	<u>.0020</u>	<u>.0014</u>	<u>.0009</u>
4	.0010	.0016	.0025	.0037	.0053	.0074	.0101	.0133	.0172
	<u>.0058</u>	<u>.0049</u>	<u>.0040</u>	<u>.0032</u>	<u>.0024</u>	<u>.0018</u>	<u>.0013</u>	<u>.0009</u>	<u>.0006</u>
8	.0005	.0007	.0010	.0015	.0021	.0029	.0039	.0050	.0063
	<u>.0037</u>	<u>.0030</u>	<u>.0024</u>	<u>.0019</u>	<u>.0015</u>	<u>.0010</u>	<u>.0007</u>	<u>.0005</u>	<u>.0003</u>
(ix) $k_1=2.5, k_2=3.0$									
1	.0071	.0122	.0204	.0327	.0508	.0764	.1113	.1574	.2161
	<u>.0056</u>	<u>.0050</u>	<u>.0043</u>	<u>.0036</u>	<u>.0029</u>	<u>.0022</u>	<u>.0016</u>	<u>.0012</u>	<u>.0007</u>
2	.0018	.0030	.0047	.0074	.0110	.0160	.0227	.0314	.0425
	<u>.0048</u>	<u>.0042</u>	<u>.0035</u>	<u>.0029</u>	<u>.0023</u>	<u>.0017</u>	<u>.0012</u>	<u>.0008</u>	<u>.0005</u>
	.0006	.0010	.0016	.0024	.0034	.0048	.0065	.0086	.0111

$r \backslash b$	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
8	.0003	.0004	.0006	.0010	.0014	.0019	.0025	.0034	.0040
	<u>.0023</u>	<u>.0019</u>	<u>.0015</u>	<u>.0012</u>	<u>.0009</u>	<u>.0007</u>	<u>.0005</u>	<u>.0003</u>	<u>.0002</u>
(x) $k_1=3.0, k_2=3.0$									
1	.0040	.0071	.0122	.0202	.0323	.0500	.0750	.1093	.1549
	<u>.0020</u>	<u>.0018</u>	<u>.0016</u>	<u>.0013</u>	<u>.0011</u>	<u>.0008</u>	<u>.0006</u>	<u>.0004</u>	<u>.0003</u>
2	.0008	.0014	.0023	.0036	.0054	.0081	.0117	.0165	.0229
	<u>.0018</u>	<u>.0016</u>	<u>.0013</u>	<u>.0011</u>	<u>.0008</u>	<u>.0006</u>	<u>.0005</u>	<u>.0003</u>	<u>.0002</u>
4	.0003	.0004	.0007	.0010	.0015	.0021	.0029	.0039	.0051
	<u>.0014</u>	<u>.0011</u>	<u>.0009</u>	<u>.0008</u>	<u>.0006</u>	<u>.0004</u>	<u>.0003</u>	<u>.0002</u>	<u>.0001</u>
8	.0001	.0002	.0003	.0004	.0006	.0008	.0010	.0014	.0017
	<u>.0009</u>	<u>.0007</u>	<u>.0006</u>	<u>.0005</u>	<u>.0004</u>	<u>.0003</u>	<u>.0002</u>	<u>.0001</u>	<u>.0001</u>

EK 5

Sık Kullanılan α , β , p_1 ve p_2 Değerlerine Göre Hesaplanmış Örnek Büyüklüğü Dağılımları

α	β	p_1	p_2	n
0.01	0.01	0.01	0.1	20
0.01	0.05	0.01	0.1	14
0.01	0.1	0.01	0.1	12
0.01	0.2	0.01	0.1	9
0.01	0.01	0.025	0.1	47
0.01	0.05	0.025	0.1	35
0.01	0.1	0.025	0.1	29
0.01	0.2	0.025	0.1	22
0.01	0.01	0.05	0.1	165
0.01	0.05	0.05	0.1	120
0.01	0.1	0.05	0.1	99
0.01	0.2	0.05	0.1	77
0.01	0.01	0.01	0.15	13
0.01	0.05	0.01	0.15	10
0.01	0.1	0.01	0.15	8
0.01	0.2	0.01	0.15	6
0.01	0.01	0.025	0.15	26
0.01	0.05	0.025	0.15	19
0.01	0.1	0.025	0.15	16
0.01	0.2	0.025	0.15	12
0.01	0.01	0.05	0.15	60
0.01	0.05	0.05	0.15	43
0.01	0.1	0.05	0.15	36
0.01	0.2	0.05	0.15	28
0.05	0.01	0.01	0.1	15
0.05	0.05	0.01	0.1	10
0.05	0.1	0.01	0.1	8
0.05	0.2	0.01	0.1	6
0.05	0.01	0.025	0.1	35
0.05	0.05	0.025	0.1	24
0.05	0.1	0.025	0.1	19

α	β	p_1	p_2	n
0.05	0.2	0.025	0.1	13
0.05	0.01	0.05	0.1	120
0.05	0.05	0.05	0.1	83
0.05	0.1	0.05	0.1	65
0.05	0.2	0.05	0.1	48
0.05	0.01	0.01	0.15	10
0.05	0.05	0.01	0.15	7
0.05	0.1	0.01	0.15	6
0.05	0.2	0.01	0.15	4
0.05	0.01	0.025	0.15	19
0.05	0.05	0.025	0.15	11
0.05	0.1	0.025	0.15	11
0.05	0.2	0.025	0.15	8
0.05	0.01	0.05	0.15	43
0.05	0.05	0.05	0.15	30
0.05	0.1	0.05	0.15	24
0.05	0.2	0.05	0.15	17
0.1	0.01	0.01	0.1	12
0.1	0.05	0.01	0.1	8
0.1	0.1	0.01	0.1	6
0.1	0.2	0.01	0.1	5
0.1	0.01	0.025	0.1	29
0.1	0.05	0.025	0.1	19
0.1	0.1	0.025	0.1	15
0.1	0.2	0.025	0.1	10
0.1	0.01	0.05	0.1	99
0.1	0.05	0.05	0.1	65
0.1	0.1	0.05	0.1	50
0.1	0.2	0.05	0.1	35
0.1	0.01	0.01	0.15	8
0.1	0.05	0.01	0.15	6
0.1	0.1	0.01	0.15	4
0.1	0.2	0.01	0.15	3
0.1	0.01	0.025	0.15	16
0.1	0.05	0.025	0.15	11

α	β	p_1	p_2	n
0.1	0.1	0.025	0.15	8
0.1	0.2	0.025	0.15	6
0.1	0.01	0.05	0.15	36
0.1	0.05	0.05	0.15	24
0.1	0.1	0.05	0.15	18
0.1	0.2	0.05	0.15	13
0.2	0.01	0.01	0.1	10
0.2	0.05	0.01	0.1	6
0.2	0.1	0.01	0.1	5
0.2	0.2	0.01	0.1	3
0.2	0.01	0.025	0.1	22
0.2	0.05	0.025	0.1	14
0.2	0.1	0.025	0.1	10
0.2	0.2	0.025	0.1	7
0.2	0.01	0.05	0.1	77
0.2	0.05	0.05	0.1	48
0.2	0.1	0.05	0.1	35
0.2	0.2	0.05	0.1	22
0.2	0.01	0.01	0.15	6
0.2	0.05	0.01	0.15	4
0.2	0.1	0.01	0.15	3
0.2	0.2	0.01	0.15	2
0.2	0.01	0.025	0.15	12
0.2	0.05	0.025	0.15	8
0.2	0.1	0.025	0.15	6
0.2	0.2	0.025	0.15	4
0.2	0.01	0.05	0.15	28
0.2	0.05	0.05	0.15	17
0.2	0.1	0.05	0.15	13
0.2	0.2	0.05	0.15	8