



EGE ÜNİVERSİTESİ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NORMAL OLMAYAN VERİLER İÇİN SÜREÇ
YETERLİLİK ENDEKSLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Melis KARASEYFİOĞLU

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Burcu AYTAÇOĞLU

İstatistik Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 17.07.2017

**Bornova-İZMİR
2017**

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**NORMAL OLMAYAN VERİLER İÇİN SÜREÇ
YETERLİLİK ENDEKSLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

Melis KARASEYFİOĞLU

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Burcu AYTAÇOĞLU

İstatistik Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 17.07.2017

**Bornova-İZMİR
2017**

Melis Karaseyfioglu tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “NORMAL OLMAYAN VERİLER İÇİN SÜREÇ YETERLİLİK ENDEKSLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 17.07.2017 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı

Doç. Dr. Halim Sarıaz SAZAK

M. Sami Dıyık

Raportör Üye

Yrd. Doç. Dr. Burcu Aytacoglu

Burcu Aytacoglu

Üye

Doç. Dr. Burcu ÜZER

Burcu Üzer

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Normal Olmayan Veriler için Süreç Yeterlilik Endekslerinin Karşılaştırılması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

20 / 07 / 2017

İmzası

Adı-Soyadı

Melis KARASUOĞLU

ÖZET

NORMAL OLMAYAN VERİLER İÇİN SÜREÇ YETERLİLİK ENDEKSLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

KARASEYFİOĞLU, Melis

Yüksek Lisans Tezi, İstatistik Bölümü
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Burcu AYTAÇOĞLU
Temmuz 2017, 34 sayfa

Bu tez çalışmasında, normal olmayan süreçler altında kullanıcılara yeterlilik endeksleri hesaplamalarında kullanabilecekleri en uygun yöntemi seçmelerinde yardımcı olmak amaçlanmıştır.

Proje, normal olmayan süreç dağılımları altında, süreç yeterlilik endekslerinin hesaplanması için önerilen yöntemlerin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemler Clements Yöntemi, Exact Yöntemi, Ağırlıklandırılmış Varyans Yöntemi, Ağırlıklandırılmış Standart Sapma Yöntemi, Box-Cox Dönüşüm Yöntemi ve Kök Dönüşüm Yöntemi'dir. Simülasyon çalışmasıyla weibull ve log normal dağılıma sahip süreçler için yöntemler karşılaştırılmıştır. Yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması uygulayıcılara çalıştıkları dağılım altında yönelmeleri gereken en makul yöntemi belirleyebilmeleri açısından önem taşımaktadır. Simülasyon sonuçları Kök Dönüşüm Yöntemi'nin üstünlüğünü göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Süreç yeterlilik endeksi, Clements Yöntemi, Exact Yöntemi, Ağırlıklandırılmış Varyans Yöntemi, Ağırlıklandırılmış Standart Sapma Yöntemi, Box-Cox Dönüşüm Yöntemi ve Kök Dönüşüm Yöntemi



ABSTRACT

COMPARISON OF THE PROCESS CAPABILITY INDICES FOR NON - NORMAL DATA

KARASEYFİOĞLU, Melis

MSc in Statistics

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Burcu AYTAÇOĞLU

July 2017, 34 pages

In this thesis, it is aimed to select the most appropriate method that can be used in the capability indices calculation under non normal processes.

This project is based on the comparison of the methods for the calculation of process capability indices under non normal processes. These methods are Clements Method, Exact Method, Weighted Variance Method, Weighted Standart Deviation Method, Box-Cox Transformation Method and Root Transformation Method. For the processes having weibull and log normal distribution, methods are compared by the help of the simulation study. The comparison of the methods is important for the practitioners since they will be able to choose the most appropriate method under the process distribution they work on. Simulation results show the superiority of Root Transformation Method.

Keywords: Process Capability Indices, Clements Method, Exact Method, Weighted Variance Method, Weighted Standart Deviation Method, Box-Cox Transformation Method, Root Transformation Method.

x



TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde değerli bilgilerini paylaşmasının yanısıra manevi olarak da her zaman yanımda bulunan danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Burcu AYTAÇOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bana her zaman destek olan, başta Sayın Doç. Dr. Hakan Savaş SAZAK olmak üzere tüm bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmamızı gerçekleştirebilmemiz için bizi mali olarak destekleyen Ege Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Şube Müdürlüğüne ve Fen Fakültesi Alt Komisyonu'na teşekkürü borç bilirim.

Yaşamım boyunca maddi ve manevi olarak daima yanımda bulunan değerli annem Hülya KARASEYFİOĞLU, değerli babam Raif KARASEYFİOĞLU ve süreç içerisinde manevi olarak her zaman desteğini hissettiğim Hakan YORĞUN ilk olmak üzere tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
TABLolar DİZİNİ.....	xviii
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Tarama.....	2
2. KALİTE.....	6
2.1. Kalitenin Tarihsel Gelişimi.....	7
2.2. Kalitenin Türkiye’deki Gelişimi	7
3. KALİTEDE SÜREÇ KAVRAMI	9
3.1. Süreç Yeterlilik Analizi	12
3.1.1. Süreç Yeterlilik Endeksleri.....	12
4. NORMAL OLMAYAN DAĞILIMLAR ALTINDA SÜREÇ YETERLİLİK ANALİZİ	14
4.1. Clements Yöntemi	15
4.2. Exact Yöntemi	16
4.3. Ağırlıklandırılmış Varyans Yöntemi	16

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4. Ağırlıklandırılmış Standart Sapma Yöntemi	18
4.5. Box-Cox Dönüşüm Yöntemi	19
4.6. Kök Dönüşüm Yöntemi.....	19
5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI.....	21
6. SONUÇLAR	29
KAYNAKLAR	30
EKLER.....	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

3.1. Farklı süreç örnekleri a) Süreç kontrol altında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli b) Süreç kontrol altında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli değil c) Süreç kontrol altında değil ve spesifikasyonları karşılamada yeterli değil.....	11
3.1.1.1. Normal dağılıma sahip sürecin doğal tolerans aralığı ve spesifikasyon aralığı.....	13
4.1. Simetrik olmayan dağılıma sahip bir sürecin doğal tolerans sınırları	14
4.3.1. WVM’de asimetrik dağılımın iki yeni normal dağılıma ayrılması	17
5.1. Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin ortalamaları.....	23
5.2. Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin MSE değerleri.....	24
5.3. Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin ortalamaları	25
5.4. Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin MSE değerleri	26
5.5. Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin kutu grafikleri	27
5.6. Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin kutu grafikleri.....	27



TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. Weibull dağılımı altında yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması.....	22
5.2. Log-normal dağılım altında yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması.....	25





1.GİRİŞ

Kalitede süreç değişkenliğinin kontrolü için, süreç yeterlilik endekslerini hesaba katmanın özellikle uygulama alanında önemli bir katkı sağladığı bilinmektedir. Genellikle süreç yeterlilik analizlerinde normal dağılıma uygunluk varsayımı yapılarak yeterlilik endeks hesaplamaları yapıp, yorumlanmaktadır. Ancak gerçek hayatta bazı durumlarda normal dağılıma sahip olmayan süreçler altında çalışılabilmektedir.

Örneğin, basılmış devre levhası üzerinde yapılan delik burgulama süreçlerinde (Gunter, 1989), kimyasal işleme süreçlerinde özellikle sıcak daldırımlı çinko kaplama süreçlerinde (Pyzdek, 1995) ve yarı iletken süreçlerinde (Bittanti et al., 1998) sıklıkla çarpık dağılımlarla karşılaşılır.

Normal dağılıma dayanan geleneksel yaklaşım ile hesaplanan süreç yeterlilik endeksleri, süreç dağılımındaki çarpıklığı göz ardı etmektedir. Dolayısıyla, normal olmayan dağılıma sahip süreçlerde yeterlilik endeksi hesaplamaları için birden fazla yöntem geliştirilmiştir.

Bu çalışma ile amaç normal olmayan süreçler altında yeterlilik endeksleri hesaplamalarında kullanılan yöntemleri karşılaştırmak ve kullanıcılara en uygun yöntemi seçmelerinde yardımcı olmaktır.

Çalışmanın 1. bölümünde literatürdeki bazı çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir. 2. bölümünde kalitenin tarihsel gelişimi ve Türkiye'deki gelişimi anlatılmıştır. 3. bölümünde kalitede süreç ve spesifikasyon kavramına yer verilmiş ve devamında süreç yeterlilik analizinin hangi koşullarda ve ne şekilde yapıldığından bahsedilerek normal dağılım altında hesaplanan yeterlilik endeksleri anlatılmıştır. 4. bölümde, normal olmayan dağılıma sahip süreçler altında yeterlilik endeks hesaplamalarında kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Yapılan simülasyon çalışması 5. bölümde verilmiş ve tablolar halinde gösterilip, yorumlanmıştır. 6. bölümde simülasyon çalışması sonuçları özetlenmiştir. Son olarak kaynaklar dizini ve ekler bölümü oluşturulmuştur.

1.1. Kaynak Tarama

Süreç yeterlilik kavramı Amerikan istatistikçiler tarafından geliştirilmiştir. Ancak Birleşik Devletler Endüstrisi tarafından Japon imalat metotlarının raporları Amerikan ticaretinde belirene kadar bu kavram yaygınlaşmamıştır (Palmer and Tsui, 1999). Dağılımın normal olduğu durumlarda süreç yeterliliği hesabı için kullanılan yeterlilik endekslerine geleneksel yeterlilik endeksleri denilmektedir. Normal dağılım altında bu endeksleri kullanmak doğru sonuçlar vermektedir. Ancak gerçek hayatta süreçle ilgili çalışmalarda izlenen kalite karakteristikleri her zaman normal dağılım göstermemektedirler.

Clements (1989) normal olmayan süreç dağılımları altında, süreç yeterlilik endekslerini hesaplayabilmek için bir yöntem önermiştir. Clements Yöntemi (CM, Clements Method) adı verilen bu yöntem, Pearsonian'ın geliştirdiği sıklık dağılımları ailesine bağlı asimetric dağılımlar altında kullanılabilen süreç yeterlilik analizi için önerilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemi uygulayabilmek için ortalama, standart sapma, çarpıklık ve basıklık tahmin değerlerinin bilinmesinin gerekli olduğunu söylemiştir. Charski (2009) yapmış olduğu özet makalesi ile, normal olmayan dağılımlar altında hesaplanan süreç yeterlilik endekslerini incelemiştir. CM kullanıldığı durumlarda yeterlilik endeksleri hesabı için adım adım hangi yolların izlenmesi gerektiğini özetlemiştir. Box ve Cox (1964) çalışmalarında normal olmayan verileri normal hale getirmek için dönüşüm tekniği uygulamışlar ve sonrasında yeterlilik endeksleri hesaplamalarında Box-Cox Dönüşüm Yöntemi (BCTM, Box-Cox Transformation Method) adını verdikleri bu yöntemi kullanmışlardır. Bai and Choi (1995), normal olmayan süreç dağılımları altında yeterlilik endeksleri hesaplamaları için Ağırlıklandırılmış Varyans Yöntemi (WVM, Weighted Variance Method) adını verdikleri yeni bir yöntem önermişlerdir. WVM'de çarpık veya asimetric dağılım, ortalamaları aynı fakat standart sapmaları farklı olan iki adet normal dağılıma ayrılmaktadır. Wu et al. (1999) yapmış oldukları çalışmalarında normal olmayan süreçler altında yeterlilik endeks hesaplamaları için WVM'yi özetlemişler, simetric ve normalden farklı dağılımlar altında ve örneklem sayısının az olduğu durumlarda simülasyon çalışması yaparak bu yöntemi CM ile karşılaştırmışlardır. Wu and Swain (2001) çalışmalarında CM ve WVM'yi ele alarak asimetric dağılım altında simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Daha yüksek standart sapmaya sahip örneklem ele alındığı durumlarda yapılan simülasyon çalışması sonucunda CM ile tahmin edilen yeterlilik endekslerinin teorik yeterlilik endeks

değerine daha yakın sonuçlar verdiğini farketmişlerdir. Sennaroğlu ve Senvar (2015) özet makalelerinde BCTM ile WVM'yi anlatmışlar, yapmış oldukları simülasyon çalışması ile de Weibull dağılımı altında yöntemleri birbiriyle karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak BCTM ile tahmin edilen yeterlilik endekslerinin teorik yeterlilik endeks değerine daha yakın sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Chang and Bai (2001) WVM'nin üzerine hesaplama açısından daha kolay olduğunu savundukları yeni bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem Ağırlıklandırılmış Standart Sapma Yöntemi (WSDM, Weighted Standart Deviation Method) olarak adlandırılmıştır.

Meloun and Militky (2004), normal olmayan dağılımları normale dönüştürmek için geriye yönelmiş (backward) dönüşüm yöntemindeki doğru (correct) ve doğru olmayan (incorrect) yaklaşımları anlatmışlar ve kullanım alanlarından bahsetmişlerdir. Kotz and Lovelace (1998), normal olmayan süreç dağılımları altında yeterlilik endeksleri hesaplayabilmek için kullanılabilecek olan yöntemlerden biri olan Exact Yöntemi (EM, Exact Method)'ni önermişler ve birçok uygulamasını yapmışlardır. Niaki and Abbasi (2007) çalışmalarında Kök Dönüşüm Yöntemi (RTM, Root Transformation Method)'ni önermişlerdir. RTM'de amaç, normal dağılıma sahip olmayan verileri normal dağılıma uygun hale dönüştürmektir. Bu dönüşüm yöntemi içerisinde ikiye bölme (bisection) yöntemi yardımıyla değişkenler normal dağılıma uygun hale getirilmiş ve normal dağılım altında uygulanan geleneksel yeterlilik endeks hesaplamaları yapılmıştır. Ayrıca çalışmalarında simülasyon çalışması da yaparak BCTM ile karşılaştırma yapmışlardır.

Thang and Than (1999), normal olmayan süreç dağılımları altında yeterlilik endeksleri hesaplamak için geleneksel endeks hesaplamalarını kullanmanın yanlış sonuçlara neden olabileceğini belirtmişlerdir. Normal olmayan süreçlerde endeks hesaplamaları için literatürde kullanılabilecek birçok yöntem olduğunu ancak bu yöntemlerin geniş kapsamlı olarak değerlendirilmediğini ve yöntemleri birbirleri ile kıyaslayan yeteri kadar çalışma yapılmadığını savunmuşlardır. Bu sebeple çalışmalarında normal olmayan süreçler altında yeterlilik endeksleri hesabı için kullanılan WVM, BCTM ve CM üzerinde durmuşlardır. Lognormal ile weibull dağılımları altında yöntemleri birbirleri ile karşılaştırmak için simülasyon çalışmaları yapmışlardır. Kutu grafiğinden yararlanarak sonuçları değerlendirmişlerdir. Kovarik and Sarga (2014) yapmış oldukları çalışmada, süreç karakteristiklerinin olasılık dağılımlarının normal olmadığı durumlarda C_p ve C_{pk}

endekslerinin geleneksel hesaplarının süreç yeterliliği açısından hatalı yorumlara neden olacağını belirtmişlerdir. Normal olmayan dağılımlar altında süreç yeterliliği hesabı için önerilmiş CM, WVM, BCTM, Burr yöntemi ve birçok grafiksel ve dönüşüm yöntemlerini içeren 9 yöntemi özetlemişler ve bu yöntemlerin aşamalarını anlatmışlardır. Log-normal dağılım altında yapılan simülasyon çalışmasında bu yöntemler ile hesaplanan süreç yeterlilik endeksleri karşılaştırılmıştır. Veriler ve sonuçlar kutu grafiği kullanılarak yorumlanmıştır. Ahmad et al., (2008) normal olmayan süreç dağılımları altında endeks hesaplamaları için önerilen yöntemlerden CM ve BCTM'nin aşamalarını özetlemişler, Weibull, Gamma ve Log-normal dağılımlar altında simülasyon çalışması yapmışlardır. CM ve BCTM kullanılarak hesaplanan yeterlilik endeksleri karşılaştırılmıştır. Charzki (2008), süreç performansını doğru yorumlayabilme açısından etkisi önemli olan süreç yeterlilik endeksleri hesabı için, normal olmayan süreç dağılımları altında önerilen CM ve EM'yi incelemiştir. Yapmış olduğu simülasyon çalışması ile asimetrik dağılımlar altında iki yöntem ile hesaplanan yeterlilik endeksleri sonuçlarının arasında büyük bir fark olmamasına dayanarak, hesaplama açısından da daha kolay olan CM'nin normal olmayan dağılımlar altında kullanılmasının yeterli olduğunu savunmuştur.

Palmer and Tusui (1999), birçok yeterlilik endeksinin ($C_p, C_{pk}, C_{pu}, C_{pl}, C_{pmk}, C_p^*, C_{pk}^*, C_{pl}^*, C_{pu}^*$) süreç koşulları değiştikçe nasıl değiştiğini incelemişler ve bu endekslerin uygulama alanlarını özetlemişlerdir. Örneğin, süreç dağılımının asimetrik olduğu durumlarda, yeterlilik endeksleri hesaplamalarında meydana gelen farklılıklara değinmişlerdir. Endekslerin karakteristik yapılarını da tartışmışlardır. Liu and Chen (2006) normal olmayan süreçler altında yeterlilik endekslerini hesaplamak için CM'yi modifiye ederek ve Burr dağılımından yararlanarak oluşturulan yeni bir yöntemi özetlemişler ve bu yöntemle yeterlilik endeksi hesaplamaları yapmışlardır. Bu yöntem literatürde Burr yöntemi olarak bilinmektedir. Log-normal ve weibull dağılımı altında Burr yöntemi ile CM'yi karşılaştırmışlardır. Yapılan tüm bu çalışmalara ilave olarak Chen and Ding (2001), C_p, C_{pk}, C_{pm} ve C_{pmk} endekslerini özetlemişler ve bu endekslerin genelleştirilmiş halleri olan CN_p, CN_{pk}, CN_{pm} ve CN_{pmk} endeksleri üzerinde durmuşlardır. Her dağılım altında uygulanabilen S_{pmk} adını verdikleri yeni bir endeks önermişlerdir. S_{pmk} süreç değişkenliğini, hedef değerin süreç ortalamasından farkını ve uygunsuzluk oranını hesaba katmıştır. Farklı dağılımlar altında S_{pmk} hesaplanmış ve CN_{pmk} endeksi ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak S_{pmk} endeksinin normal olmayan süreçler altında CN_{pmk} endeksine göre daha

üstün noktaları olduğu görülmüştür. S_{pmk} endeksinin süreç yeterliliği hesaplamalarında önemli bir endeks olduğu ifade edilmiştir. Pearn and Chen (1997) normal dağılım altında kullanılan yeterlilik endekslerinin, normal olmayan dağılımlar altında kullanıldığında yanlış sonuçlar doğurduğunu gösteren bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında normal olmayan dağılımlar altında kullanılabilecek $C_{np}(u,v)$ denilen yeni bir endeks önermişlerdir. Kotz and Johnson (2000), normal dağılım altında, süreç yeterlilik endeksleri hesaplamalarını özetlemiş, hem simetrik hem de asimetrik dağılımlarda yeterlilik endeksleri hesaplamalarının ne şekilde değiştiğinden bahsetmişlerdir. Süreç yeterliliği ile ilgili olarak doğru yorumların yapılabilmesi için yeterlilik endeksleri hesaplamalarının önemli olduğunu belirtmişler ve bu konuyla ilgili geçmişte yapılmış çalışmalara dayanarak yeterlilik endekslerinin en genel hallerini özetlemişlerdir. Ayrıca tüm bunlara ilave olarak, çoklu süreçlerde yeterlilik endeksleri hesaplamalarını özetlemişlerdir. Kane (1986) süreç yeterlilik endekslerini test edebilmek için hipotezlerin kurulduğu ve İşlem Karakteristiği (OC, Operating Characteristic) eğrisinden yararlanılarak da süreç performansı ile ilgili doğru yorumların yapılabilirdiği ifadelerine yer vermiştir. Ayrıca yeterlilik endekslerinin hedef değere bağlı veya bağlı olmaksızın ve tek yönlü ya da iki yönlü toleranslı süreçlerde nasıl ifade edilebileceğini özetlemiştir. Stoumbos (2002) süreç yeterlilik endeksleri için hipotez testlerinin nasıl kurulduğunu ve aşamalarını özetlemiştir. Hipotez testi sonuçlarının yorumlamalarında OC eğrisinden faydalanmıştır. Ayrıca C_p , C_{pk} , C_{pm} , C_{pmk} yeterlilik endekslerinin kullanımının faydaları ve elverişsiz kaldığı durumlara da çalışmasında değinmiştir. Süreç yeterlilik endeksleri üzerine yapılan kaynak taraması sonucunda yöntemlerin kapsamlı bir karşılaştırılmasının yapılmadığı görülmüştür. Genelde çalışmalarda en fazla ikili ya da üçlü karşılaştırmalar yapılmış 6 yöntemin birlikte karşılaştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca tüm çalışmalarda yeterlilik endeksi tahminlerinin ortalama ve standart sapması verilmiş ancak hata kareleri ortalaması (MSE, Mean Square Error) ile kıyaslama hiç yapılmamıştır. Bu çalışmada simülasyon ile 6 farklı yöntem (CM, BCTM, WVM, WSDM, EM, RTM) için MSE değerleri elde edilmiş ve yöntemler karşılaştırılmıştır.

2. KALİTE

Kalite en genel anlamıyla, bir ürün ya da hizmetin, müşterilerin ihtiyaç ve beklentilerini karşılayabilme derecesi olarak tanımlanmakla beraber, bir ürün ya da hizmetin belirlenen özelliklere uygunluğunu ve hatasız olma derecesini gösteren bir performans boyutu olarak da ele alınmaktadır (Şahin, 2013).

Kalite, latince “qualitas” demektir ve nasıl oluştuğu anlamına gelen “qualis” sözcüğünden gelir. Bir nesnenin kalitesi onun doğasındadır ve başka bir nesneye dönüştürülmeden kalitesi değiştirilemez. Kalite zaman içinde değişen koşullara uygun olarak şekil değiştirir. Bu nedenle kalitenin tanımı çeşitli değişimlere uğramıştır. Önceleri standartlara uygunluk olarak bilinen kalite zamanla müşterilerin isteklerine uygunluk olarak ifade edilmiştir. Topluma hizmet etmek, varlığını sürdürmek ve uzun dönemde kar etmek isteyen işletmeler hedeflerine ulaşmak için artık tüketicinin istediği ölçüleri ön planda tutmuşlardır. Böylece kalite, tüketicinin istekleri ve üreticilerin amaçlarına uygun bir denge ögesi olmuştur. Ülkeler ve işletmeler arası rekabetin giderek yoğunlaştığı hızla gelişen dünyamızda kalite, işletmelerin öncelikli unsurlarından biri haline gelmiştir (Kurt, 1996).

Başka bir deyişle kalite, pek çok kişinin bildiği veya tanımlamaya çalıştığı gibi mutlak anlamda en iyi değildir. Örneğin, bir makinede hareket iletme görevi yapan milin çapı 50 ± 0.05 mm toleransla işlenmektedir. İmalatçı bu toleransı on kat arttırarak 50 ± 0.005 mm yapsa kaliteyi yükseltmiş olur mu? Soruyu cevaplamadan önce, ilk toleransa göre işlenen milin kendisinden beklenen işi yeterince yapıp yapmadığı araştırılmalıdır. Eğer 50 ± 0.05 mm tolerans yeterliyse, milin gereksiz yere daha hassas işlenmesi maliyeti arttırmaktan başka bir işe yaramaz.

Bu örnekten sonra kalitenin, ancak malın fonksiyonuna, yani hizmet ettiği amaca göre bir anlam taşıyabileceği söylenebilir. Dolayısı ile kaliteyi çok genel olarak amaca uygunluk derecesi şeklinde tanımlamak da mümkündür (Güngör, 2012).

2.1. Kalitenin Tarihsel Gelişimi

Kalite gelişiminin en önemli aşamaları ABD ve Japonya'da yaşanmıştır. Bell telefon şirketi araştırmacılarından Dr.W.A.Shewhart 6 Mayıs 1924'te ilk modern kontrol grafiğini çizmiş ve ilk olasılık çizelgesini ortaya koyarak istatistiksel kalite kontrolünün temellerini atmıştır. Bunun üzerine işletmeler ürünü kontrol etmektense ürünü üreten sistemi ya da süreci kontrol eder duruma gelmişlerdir. Shewhart istatistik metotlarını ve olasılık teorisini kalite kontrolüne kontrol grafikleri şeklinde uygulamıştır. Shewhart'ın en önemli katkısı süreçteki değişkenliği bilimsel olarak ifade edebilmesidir. Kontrol grafikleri, istatistiksel örnekleme ve muayene metotları modern kalite kontrol dönemini başlatmıştır. Shewhart tarafından temelleri atılan kalite kontrol metodu H.F.Dodge ve H.G.Roming tarafından hazırlanan ve Dodge-Roming örnekleme muayene tabloları sayesinde oldukça geniş bir alanda uygulama şansı bulmuştur (Bircan ve Özcan, 2003; Özdemir, 2000).

2. dünya savaşından sonra en önemli gelişme Japonya'da yaşanmıştır. İstatistiksel kalite kontrolü Japonya'nın 2. Dünya savaşında yenilmesi ve ABD işgal kuvvetlerinin karşılaştığı Japon telekomünikasyon sisteminin yetersizliğini giderme çalışmaları ile ortaya çıkmıştır. 1946 yılına kadar Japonların kalite kontrolü bütünüyle muayeneye dayanıyordu ve her ürün sıkı biçimde denetlenemiyordu (Özdemir, 2000). Mayıs 1946'da Japonya'da istatistiksel kalite kontrol çalışmaları başladı. İlk etapta telekomünikasyon sisteminin yetersizliğini gidermek için Deming ve Juran davet edildi. Bu uzmanlar görüşlerini Japon iş adamlarına aktarma fırsatı buldular. İş adamlarının amacı savaş sonrası Japonya'yı yeniden kurmak, dış pazara girmek ve ürünlerin kalitesini iyileştirmektir. İş adamları Deming'in öğretilerini uyguladılar. Birçok eski yönetici işten çıkarıldı yerine üretim ve pazarlama konusunda uzman, işletmenin içinden gelen insanlar getirildi. Japon kalitesinin verimliliği, rekabet gücü sürekli olarak iyileşti ve güçlendi (Ishikawa, 1977; Özdemir, 2000).

2.2. Kalitenin Türkiye'deki Gelişimi

Türkiye'de kaliteye verilen önem serbest ekonomiye geçiş ile artmaya başlamıştır. Büyük sanayi kuruluşları yabancı ürünleri tanımaya başladıkça

Türkiye’deki yerli ürünlerde de kaliteli üretimi istemeye başlamışlardır. Bunun sonucu olarak sanayi sektörü, eğitim alanındaki yatırımlarını da arttırmıştır.

Yıllar boyunca iç pazara yönelik üretim gerçekleştiren Türkiye’nin 1980 yıllarının dar boğazında dışarıya yönelmesi ile kalite kavramı önem kazanmıştır. 1990 yılında bir grup genç işadamlarının çabaları ile ülkemizin önde gelen kuruluşları tarafından KALDER (Kalite Derneği) kurulmuştur. Gümrük birliğine giriş sürecinin başlaması ile KALDER ve birçok danışmanlık şirketi büyük, orta ve küçük ölçekli işletmeleri kalite konusunda bilgilendirmiştir (Aslan, 2003; Sağlı, 2003).



3. KALİTEDE SÜREÇ KAVRAMI

Süreç, bir ürün veya hizmeti üretmek için gerek duyulan aşamaların tümüne denmektedir (Tate,1999).

Süreç aşağıda verilen başlıca 5 bileşenden oluşmaktadır.

- İşlemler
- Malzeme
- Çevre Şartları
- Operatör
- Muayene

Bu bileşenler süreç içerisindeki değişkenliğin kaynağıdır ve değişkenlik de süreç içerisinde üretilen ürünlerin kalitesini etkilemektedir. Bu sebeple süreçteki değişkenliğin dikkatlice incelenip analiz edilmesi, kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu değişkenliğin sayısal olarak ifade edilmesi, üretilen ürünün sağlaması gereken şartları doğrultusunda analizi ve büyük ölçüde azaltılarak süreçte ve dolayısıyla ürün kalitesinde gelişim sağlanması amacıyla gerçekleştirilen aktivitelerin tamamı süreç yeterlilik analizi olarak ifade edilmektedir. Aşağıda süreç yeterlilik analizi ile ilgili temel tanımlar verilmiştir.

σ (Standart Deviation) : İstatistiksel olarak kontrol altında olan bir sürecin standart sapması

μ (Mean) : İstatistiksel olarak kontrol altında olan bir sürecin ortalaması

Kalite Özelliği (Quality Characteristic) : Her ürünün, kullanıcı veya tüketicinin kalite olarak düşündüğü şeyi birlikte tanımlayan bir takım öğeleri vardır. Bu parametrelere ‘kalite özelliği’ denir (Montgomery, 2001).

Spesifikasyon : Bir ürünün belirli özelliklerini hataya meydan vermeyecek açıklıkta tanımlayan değerlere ‘Spesifikasyon’ denir (Şahin, 2013).

Alt Spesifikasyon Sınırı (LSL, Lower Specification Limit) : Müşteri veya tasarımcı tarafından verilen alt spesifikasyon değeri

Üst Spesifikasyon Sınırı (USL, Upper Specification Limit) : Müşteri veya tasarımcı tarafından verilen üst spesifikasyon değeri

Spesifikasyon Aralığı : $USL - LSL$

Doğal Alt Tolerans Sınırı (LNTL, Lower Natural Tolerance Limit) : Süreç ortalamasından süreç standart sapmasının üç katı çıkartılarak elde edilen alt kontrol limit değeri

Doğal Üst Tolerans Sınırı (UNTL, Upper Natural Tolerance Limit) : Süreç ortalamasına süreç standart sapmasının üç katı eklenerek elde edilen üst kontrol limit değeri

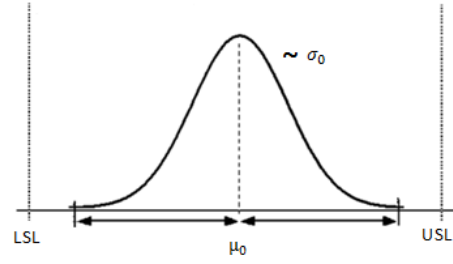
Doğal Tolerans Aralığı : $UNTL - LNTL$

Kalitede sürecin değişkenliğini arttıran birçok neden bulunmaktadır. Bu nedenler, ortam sıcaklığı, nem, toz gibi nedenler olabileceği gibi genellikle öngörülemeyen operatör hataları, malzeme uygunsuzlukları, makine ve ölçüm sistemi arızaları vb. olarak da çoğaltılabilir. Öngörülemeyen nedenlerin ortadan kaldırıldığı süreçler, istatistiksel olarak kontrol altındadır denilebilmektedir (Erginel, 2005).

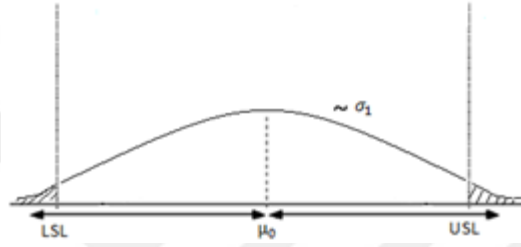
Süreçler aşağıda gösterilen durumlardan birine sahip olabilir (Garrity, 1990). Şekil 3.1’de bu durumlara örnek süreçler verilmiştir.

- Süreç kontrol altında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli.
- Süreç kontrol altında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli değil.
- Süreç kontrol dışında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli.
- Süreç kontrol dışında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli değil.

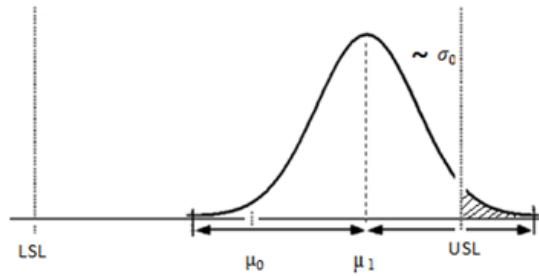
a)



b)



c)



Şekil 3.1. Farklı süreç örnekleri a) Süreç kontrol altında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli b) Süreç kontrol altında ve spesifikasyonları karşılamada yeterli değil c) Süreç kontrol altında değil ve spesifikasyonları karşılamada yeterli değil

Şekil 3.1 a'da sürecin ortalama ve standart sapması geçerli (nominal) seviyededir. Süreç müşteri veya tasarımcı tarafından verilen spesifikasyon sınırları içerisinde seyretmektedir. Şekil 3.1 b'de süreç standart sapması σ_1 olup σ_0 (geçerli düzey)'dan büyüktür. Süreç müşteri veya tasarımcı tarafından verilen spesifikasyon sınırlarını aşmıştır. Şekil 3.1 c'de süreç ortalaması μ_1 olacak şekilde

μ_0 (geçerli düzey)'dan sağa doğru sapmaktadır. Süreç ortalamasında kayma meydana gelmiştir ve süreç üst spesifikasyon sınırını aşmıştır.

Süreç yeterlilik analizi için öncelikle sürecin kontrol altında olması gerekmektedir.

3.1. Süreç Yeterlilik Analizi

Süreç yeterliliği, istatistiksel bir ölçüt olup müşteri beklentilerine veya ürünün tasarım gereklerine göre bir sürecin ne kadar değişkenlik gösterdiğini özetler (Montgomery, 2001).

İstatistiksel süreç kontrolü içerisinde sürecin yeterlilik analizi yapılabilmektedir. Süreç yeterlilik analizi, spesifikasyonlara uygunluğun tespit edilmesi, sürecin ilerleyişi yönünde tasarımcılara ve müşterilere yol göstermesi gibi birçok aşamada yol gösterici olmaktadır.

Yeterlilik endeksleri yardımıyla süreç yeterliliği hesaplanabilmektedir.

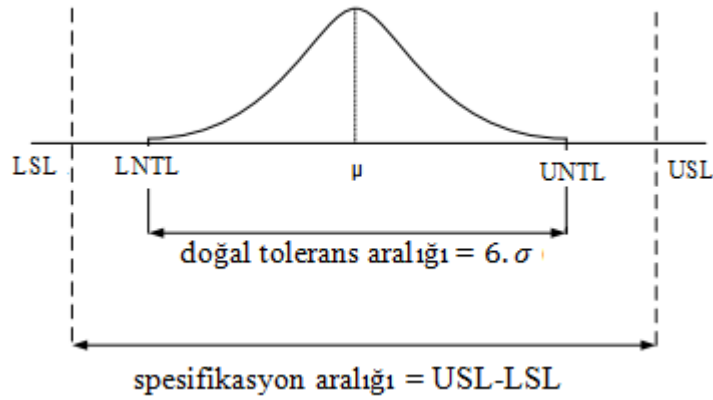
3.1.1. Süreç Yeterlilik Endeksleri

C_p endeksi, spesifikasyon aralığı ile süreç değişkenliğine bağlı olan doğal tolerans aralığını karşılaştırır. Geleneksel süreç yeterlilik endeksleri, kalite özelliğinin normal dağıldığı varsayımına dayanarak hesaplanır (Montgomery, 2001).

Kane (1986), C_p endeksi için aşağıdaki tanımlamayı yapmıştır.

$$C_p = \frac{\text{spesifikasyon aralığı}}{\text{doğal tolerans aralığı}} = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

Şekil 3.1.1.1'de normal dağılıma sahip bir süreç üzerinde doğal tolerans aralığı (6σ) ve spesifikasyon aralığı (USL-LSL) gösterilmiştir.



Şekil 3.1.1.1 Normal Dağılıma Sahip Sürecin Doğal Tolerans Aralığı ve Spesifikasyon Aralığı

Bazı süreçlerde tek spesifikasyon sınırı olabilir. Eğer süreçte sadece USL varsa C_{pu} endeksi, sadece LSL var ise C_{pl} endeksi kullanılır. C_{pu} ve C_{pl} aşağıdaki formüllerle hesaplanır.

$$C_{pu} = \frac{USL - \mu}{3 \cdot \sigma} \quad C_{pl} = \frac{\mu - LSL}{3 \cdot \sigma}$$

Süreç ortalamasında bir sapma olması durumunda aslında süreç yetersiz hale gelebilmekte ve hatalı oranı yükselmektedir. Sadece C_p endeksi kullanarak bu durumu tespit etmek olanaksızdır. Dolayısıyla C_p endeksine ilave olarak süreç ortalamasındaki sapmayı da dikkate alan C_{pk} endeksi kullanılır. C_{pu} ve C_{pl} endekslerinin küçük olanı C_{pk} endeksi değerini verir.

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl})$$

4. NORMAL OLMAYAN DAĞILIMLAR ALTINDA SÜREÇ YETERLİLİK ANALİZİ

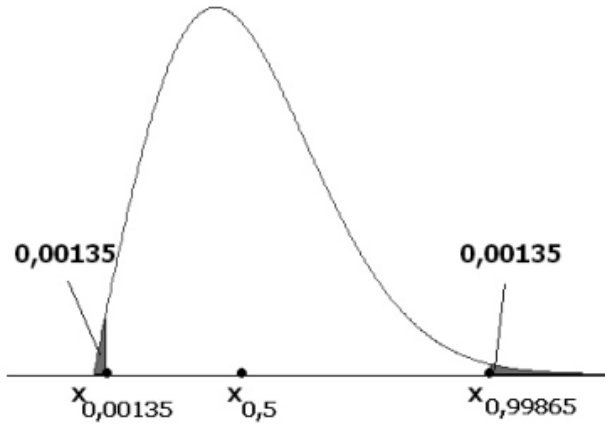
Gerçek hayat verilerinde her zaman normal dağılıma uygunluk olmadığı gibi dağılım asimetrik de olabilir. Dağılımın normal olmadığı durumlarda süreç yeterlilik analizi yapmak gerekebilir.

Normal dağılıma sahip olmayan kalite özelliği X ile gösterilirse X 'in dağılımının doğal tolerans aralığı $T_n = x_{0.99865} - x_{0.00135}$ şeklinde yazılır. Öyle ki,

$$P(X < x_{0.00135}) = 0.00135,$$

$$P(X < x_{0.99865}) = 0.99865 \text{ olacaktır.}$$

Şekil 4.1'de simetrik olmayan bir dağılımın doğal tolerans sınırları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Simetrik Olmayan Dağılıma Sahip Bir Sürecin Doğal Tolerans Sınırları

Günümüze kadar normal olmayan dağılıma sahip sürecin yeterlilik analizi için önerilen birçok yöntem olmuştur.

Bu yöntemlerin önde gelenleri aşağıdaki gibidir.

- Clements Yöntemi (CM)
- Exact Yöntemi (EM)

- Ağırlıklandırılmış Varyans Yöntemi (WVM)
- Ağırlıklandırılmış Standart Sapma Yöntemi (WSDM)
- Box-Cox Dönüşüm Yöntemi (BCTM)
- Kök Dönüşüm Yöntemi (RTM)

4.1. Clements Yöntemi

Clements (1989), pearson ailesi dağılımlarından faydalananarak herhangi bir şekle sahip dağılım için C_p ve C_{pk} endekslerini hesaplamaya yönelik bir yöntem önermiştir. Bu yöntem ile endeks hesaplamak için aşağıdaki adımlar izlenir.

- Ürün kalite özelliğinin spesifikasyon sınırları müşteri ya da tasarımcı tarafından verilir.
- Sürece ait ortalama ($\bar{X}$), standart sapma (S), çarpıklık ve basıklık istatistikleri hesaplanır.
- Clements (1989) tarafından verilen tablodan 0.135 yüzdeler (L_p), medyan (M) ve 99.865 yüzdeler (U_p) standart değerleri bulunur. Bu tablo farklı çarpıklık ve basıklık değerlerine karşılık gelen Pearson ailesine ait dağılımların standart yüzdeler değerlerini vermektedir.
- Süreç dağılımının 0.135 yüzdeler, medyan ve 99.865 yüzdeler değerleri aşağıdaki gibi tahmin edilir. Bunlar sırasıyla L_p^* , M^* ve U_p^* şeklinde gösterilir.

$$L_p^* = \bar{X} - S \cdot L_p$$

$$M^* = \bar{X} + S \cdot M$$

$$U_p^* = \bar{X} + S \cdot U_p$$

- Yeterlilik endeksleri hesaplanır.

$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{U_p^* - L_p^*}, \quad \hat{C}_{pu} = \frac{USL - M^*}{U_p^* - M^*}, \quad \hat{C}_{pl} = \frac{M^* - LSL}{M^* - L_p^*},$$

$$\hat{C}_{pk} = \min(\hat{C}_{pu}, \hat{C}_{pl}) \text{ değeridir.}$$

4.2. Exact Yöntemi

Kotz and Lovelace (1998), normal olmayan dağılımlar altında önermiş oldukları EM ile hesaplanan yeterlilik endeksinin, geleneksel yeterlilik endeksi ile tek farkının, normal dağılımda dikkate alınan 6σ 'lık süreç değişkenliğinin yerine normal olmayan dağılımlarda, dağılımın 99.865 ve 0.135'inci yüzdelik değerlerinin farkının hesaba katılması olduğunu vurgulamışlardır.

EM'nin aşamaları aşağıdaki şekildedir.

- Ürün kalite özelliğinin spesifikasyon sınırları müşteri ya da tasarımcı tarafından verilir.
- Normal olmayan dağılıma sahip süreç verilerinin 99.865 yüzdelik ($X_{0,99865}^*$), medyan ($X_{0,5}^*$) ve 0.135 yüzdelik ($X_{0,00135}^*$) değerleri hesaplanır.
- Süreç yeterlilik endeks değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

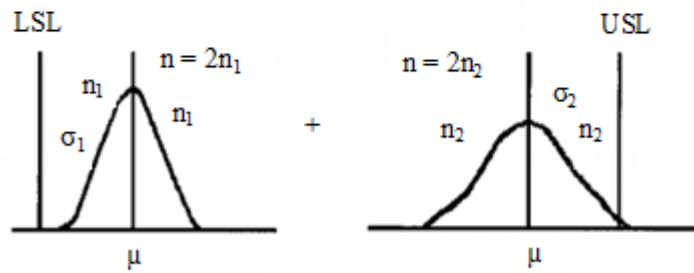
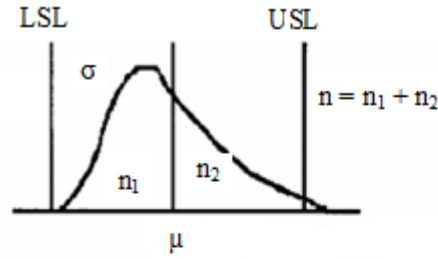
$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{X_{0,99865}^* - X_{0,00135}^*}, \quad \hat{C}_{pu} = \frac{USL - X_{0,5}^*}{X_{0,99865}^* - X_{0,5}^*}, \quad \hat{C}_{pl} = \frac{X_{0,5}^* - LSL}{X_{0,5}^* - X_{0,00135}^*},$$

$$\hat{C}_{pk} = \min(\hat{C}_{pu}, \hat{C}_{pl})$$

4.3. Ağırlıklandırılmış Varyans Yöntemi

WVM ilk defa Choobineh ve Ballard (1987) tarafından çarpık dağılımlar için kontrol şeması oluşturmakta kullanılmıştır. Daha sonra Choi ve Bai (1997) WVM'nin çarpık dağılımlar için yeterlilik endeksi hesabında kullanılmasını önermişlerdir. WVM çarpık olan dağılımı ortalamasından ikiye bölerek iki yeni normal dağılım elde etmeyi hedefler. Orjinal dağılımdan elde edilen bu yeni normal dağılımların ortalamaları aynı ancak standart sapmaları farklıdır.

Şekil 4.3.1 WVM'nin ana fikrini resmetmek amacıyla verilmiştir.



Şekil 4.3.1 WVM’de asimetrik dağılımın iki yeni normal dağılıma ayrılması

Şekil 4.3.1’de asimetrik dağılım, ortalaması aynı ancak standart sapmaları farklı olan iki normal dağılıma ayrılmıştır.

WVM’nin adımları aşağıdaki gibidir.

- Ürün kalite özelliğinin spesifikasyon sınırları müşteri ya da tasarımcı tarafından verilir.
- Normal olmayan dağılıma sahip süreç verilerinin ortalamasına eşit veya daha küçük olan gözlemlerin sayısı (n_1) ve ortalamadan büyük gözlemlerin sayısı (n_2) belirlenir.
- Süreçten elde edilen verilere ait istatistikler ($\bar{X}$, S_1^2 , S_2^2) ve sonrasında yeterlilik endeksleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad S_1^2 = 2 \cdot \sum_{i=1}^{n_1} \frac{(x_i - \bar{X})^2}{2n_1 - 1}, \quad S_2^2 = 2 \cdot \sum_{i=1}^{n_2} \frac{(x_i - \bar{X})^2}{2n_2 - 1}$$

$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{3.(S_1 + S_2)}, \hat{C}_{pu} = \frac{USL - \bar{X}}{3.S_2}, \hat{C}_{pl} = \frac{\bar{X} - LSL}{3.S_1},$$

$$\hat{C}_{pk} = \min(\hat{C}_{pu}, \hat{C}_{pl})$$

4.4. Ağırlıklandırılmış Standart Sapma Yöntemi

Chang ve Bai (2001), WVM'nin üzerine hesaplama açısından daha kolay olduğu savunulan WSDM yöntemini ilk olarak Normal dağılıma sahip olmayan süreçlerde kontrol şeması kurmak için önermişlerdir. Sonrasında Chang et al (2002), WSDM'yi çarpık dağılımlarda süreç yeterlilik endeksi hesabı için de kullanmıştır.

WSDM'nin adımları aşağıdaki gibidir.

- Ürün kalite özelliğinin spesifikasyon sınırları müşteri ya da tasarımcı tarafından verilir.
- Süreçten elde edilen verilere ait istatistikler ($\bar{X}$, S) hesaplanır.
- Süreç ortalamasına eşit veya daha küçük gözlem sayısının, toplam gözlem sayısına bölünmesiyle elde edilen değer $\hat{P}_x$ olarak yazılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\hat{P}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I(\bar{X} - X_i) \text{ ve } I(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

- Yeterlilik endeksleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{6.S} \cdot \min\left(\frac{1}{2\hat{P}_x}, \frac{1}{2(1-\hat{P}_x)}\right), \quad \hat{C}_{pu} = \frac{USL - \bar{X}}{6.\hat{P}_x.S}, \quad \hat{C}_{pl} = \frac{\bar{X} - LSL}{6.(1-\hat{P}_x).S}$$

$$\hat{C}_{pk} = \min(\hat{C}_{pu}, \hat{C}_{pl})$$

4.5. Box-Cox Dönüşüm Yöntemi

Box ve Cox (1964) çalışmalarında normal olmayan verileri, normal hale getirmek için dönüşüm tekniği önermişlerdir. Önerilen bu dönüşüm yöntemi normal dağılıma sahip olmayan verilerde süreç yeterlilik endeksi hesabında da kullanılmıştır.

BCTM aşağıdaki adımları izler.

- Ürün kalite özelliğinin spesifikasyon sınırları müşteri ya da tasarımcı tarafından verilir.
- Belli aralıklarla λ değerleri seçilir.
- Seçilen her λ değeri için Box- Cox dönüşümü aşağıdaki şekilde yapılır.

$$x^\lambda = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} & \text{eğer } \lambda \neq 0 \\ \ln x & \text{eğer } \lambda = 0 \end{cases}$$

- Her λ değeri için aşağıdaki olabilirlik fonksiyonu hesaplanır. Olabilirlik fonksiyonu maksimum yapan λ değeri verilerin dönüşümünde kullanılır.

$$L(\lambda) = -\frac{n}{2} \cdot \ln(\hat{\sigma}^2) + (\lambda - 1) \sum_{i=1}^n \ln(x_i), \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j^\lambda - \bar{x}^\lambda)^2$$

- Dönüşümü gerçekleştirmiş değerler ile süreç yeterlilik endeksi hesabı, geleneksel yeterlilik endeksi hesabındaki gibi yapılabilmektedir.

4.6. Kök Dönüşüm Yöntemi

Normal dağılıma sahip olmayan süreçlerde yeterlilik analizi için önerilen dönüşüm yöntemlerden diğeri RTM'dir. RTM'de amaç, normal dağılıma sahip olmayan verileri normal dağılıma uygun hale dönüştürmektir (Niaki and Abbasi, 2007).

RTM'nin adımları aşağıdaki gibidir.

- Ürün kalite özelliğinin spesifikasyon sınırları müşteri ya da tasarımcı tarafından verilir.
- Normal dağılıma sahip olmayan verilerin X^r dönüşümü yapıldığında çarpıklık değerini 0'a en çok yaklaştıran r kök değeri ikiye bölme yöntemi (Bisection Method) ile bulunur. İkiye Bölme yöntemi Ek 1'de detaylı olarak anlatılmıştır.
- Bulunan r değeri kullanılarak verilere X^r dönüşümü uygulanır.
- Dönüşümü gerçekleşmiş değerler ile süreç yeterlilik endeksi hesabı, geleneksel yeterlilik endeksi hesabındaki gibi yapılabilmektedir.

5. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Yapılan simülasyon çalışmasında Weibull ve Log-normal dağılımları altında çalışılmıştır.

Eğer X rassal değişkeni α ve β parametrelerine bağlı (α şekil, β ölçek parametresi) weibull rassal değişkeni ise, X 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f(x;\alpha,\beta) = \begin{cases} \alpha\beta^{-\alpha}x^{\alpha-1}\exp(-\beta^{-\alpha}x^{\alpha}); & 0 < x < \infty, \alpha > 0, \beta > 0 \\ 0 & \text{d. d.} \end{cases}$$

X 'in birikimli dağılım fonksiyonu ise;

$$F(x) = 1 - \exp(-(\frac{x}{\beta})^{\alpha}) \text{ şeklindedir.}$$

Eğer X rasgele değişkenine ilişkin $\ln X$ 'in dağılımı normal ise, X 'in olasılık dağılımı log-normal dağılım şeklinde adlandırılır. Bu durumda X 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp[-\frac{1}{2}(\frac{\ln x - \mu}{\sigma})^2] \quad x \geq 0, -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0$$

Weibull dağılımı şekil parametresine bağlı olarak olasılık yoğunluk fonksiyonu farklı şekiller alan oldukça esnek bir dağılımdır ve bu sebeple gerçek hayatta birçok kalite özelliğinin dağılımı Weibull dağılımı ile ifade edilebilmektedir. Bu sebeple Weibull dağılımına sahip süreçlerde yeterlilik endeks hesaplamalarına ilişkin literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Aynı şekilde Log-normal dağılıma sahip süreçler altında da literatürde birçok çalışma olduğundan, simülasyon çalışmasında bu iki dağılım dikkate alınmıştır. Örneklem büyüklüğü (n) 100 olarak alınmış, matlab programı kullanılarak C_{pu} tahmin edilmiş ve bu 50 defa tekrar edilmiştir.

Bu çalışmada hedef C_{pu} 1 olarak alınmıştır. Weibull dağılımının şekil parametresi 2, ölçek parametresi 1, Log normal dağılımın parametreleri $\mu=0$, $\sigma^2=0.1$ şeklinde seçilmiştir.

Yapılan simülasyonun adımları aşağıda verilmiştir.

- 1) C_{pu} değeri, belirlenen hedef değer olan 1'e eşit olduğunda Normal dağılımda elde edilen hatalı ürün oranı elde edilecek şekilde Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) ve Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0.1$) dağılımları için de USL değeri bulunur. Dolayısıyla hedef C_{pu} değerini sağlayan USL değeri aşağıdaki gibi bulunur.

$$C_{pu} = \frac{\phi^{-1}(\int^{\text{USL}} f(x) dx)}{3} = \frac{\phi^{-1}(F_x(\text{USL}))}{3} \rightarrow \text{USL} = F_x^{-1}[\phi(3C_{pu})]$$

Öyle ki $f(x)$ ve F_x normal dağılıma sahip olmayan verilerin sırasıyla olasılık yoğunluk fonksiyonunu ve birikimli dağılım fonksiyonunu göstermektedir.

- 2) Normal olmayan dağılımdan (Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) ve Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0.1$)) $n=100$ olacak şekilde veri üretilir.
- 3) Her yöntem için 4. bölümde anlatıldığı gibi tek taraflı yeterlilik endeksi ($\hat{C}_{pu}$) hesabı yapılır ve 50 tekrar olana kadar 2. adıma geri dönülür.

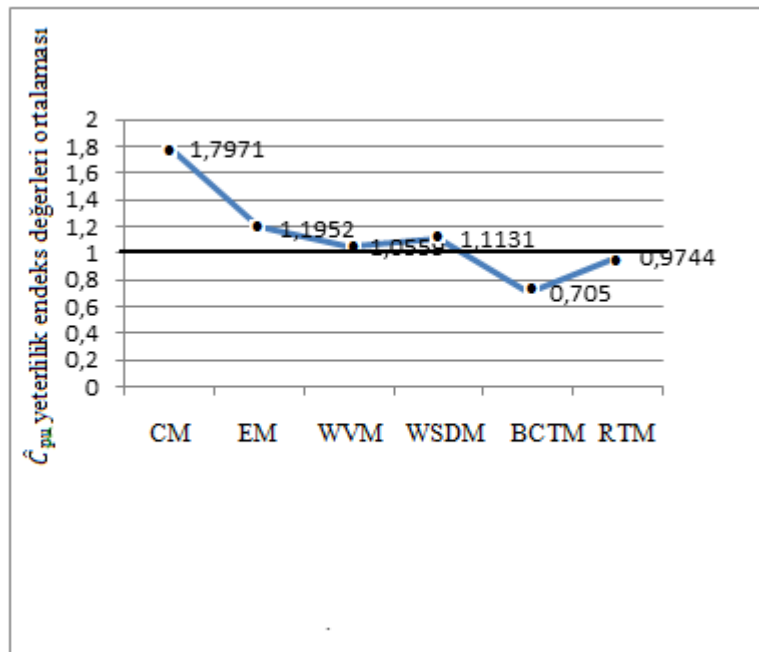
Her yöntem için elde edilen 50 $\hat{C}_{pu}$ değerinin ortalaması, standart sapması ve hata kareler ortalaması (MSE) Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de raporlanmıştır. Ayrıca $\hat{C}_{pu}$ değerlerinin kutu grafikleri de bu bölüm içerisinde verilmiştir.

Tablo 5.1 Weibull dağılımı altında yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması

Hedef C_{pu}	Yöntemler	Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$)		
1		Ortalama	Standart Sapma	MSE
	CM	1,7971	0,1623	0,2642
	EM	1,1952	0,2265	0,0894
	WVM	1,0559	0,1221	0,0180
	WSDM	1,1131	0,1242	0,0282
	BCTM	0,7050	0,2589	0,1541
	RTM	0,9744	0,1184	0,0147

Tablo 5.1’de tüm yöntemler Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında karşılaştırılmıştır. RTM ile tahmin edilen yeterlilik endekslerinin ortalaması, C_{pu} hedef değerine en yakın değer olarak çıkmıştır. Bu yöntemle elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endekslerinin standart sapması ve MSE değeri de diğer yöntemlerinkine göre düşüktür.

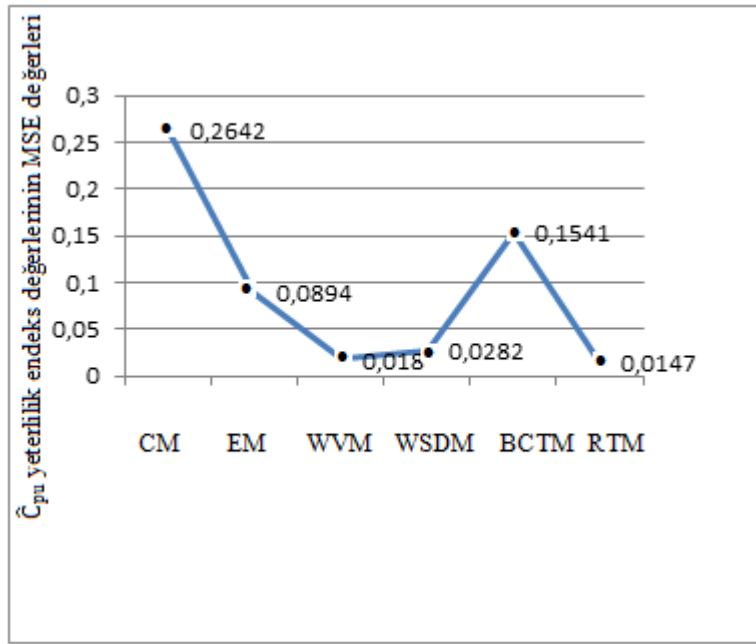
Şekil 5.1’de Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında her yöntem için hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 5.1 Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin ortalamaları

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında gerçekleştirilen simülasyonda, hedef C_{pu} değerine en yakın değer RTM ile elde edilmiştir. Bu yöntemi sırasıyla WVM ve WSDM izlemiştir. CM ile yapılan tahmin de hedef C_{pu} değerinden oldukça uzaktır.

Şekil 5.2’de Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında farklı yöntemlerle elde edilen yeterlilik endeksi tahmin edicilerinin ($\hat{C}_{pu}$) MSE değerleri verilmiştir.



Şekil 5.2 Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin MSE değerleri

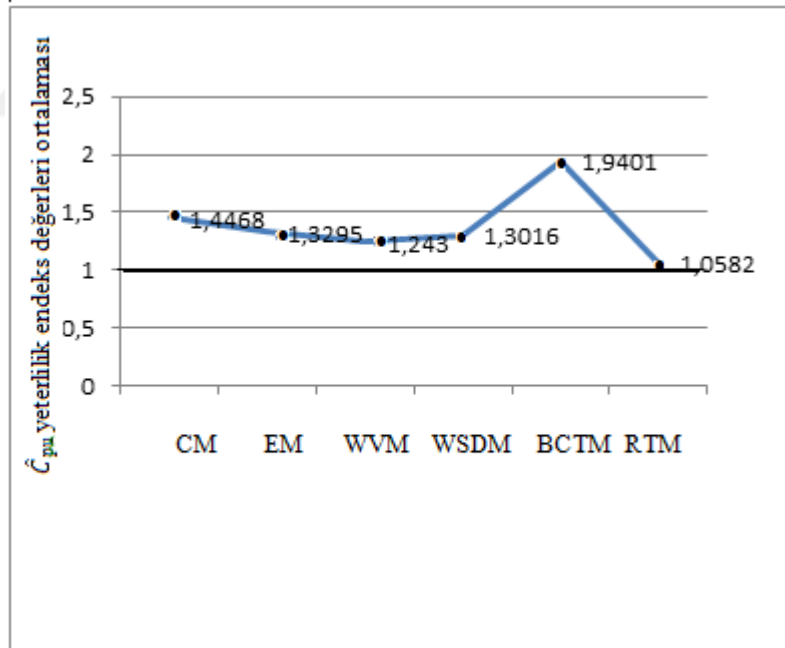
Şekil 5.2’de görüldüğü gibi Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında RTM ile elde edilen C_{pu} tahmin edicisi en düşük MSE değerine sahiptir. Ayrıca bu dağılım altında CM ile elde edilen C_{pu} tahmin edicisinin MSE değeri oldukça yüksek çıkmıştır. Bu da Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında CM’nin süreç yeterliliği endeksi tahmininde diğer yöntemlere göre etkinliğinin düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2’de tüm yöntemler Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında karşılaştırılmıştır. RTM ile tahmin edilen yeterlilik endekslerinin ortalaması, C_{pu} hedef değerine en yakın değer olarak çıkmıştır. Bu yöntemle elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endekslerinin standart sapması ve MSE değeri de oldukça düşüktür. Dolayısıyla C_{pu} en iyi RTM ile tahmin edilmektedir.

Tablo 5.2 Log-normal dağılım altında yöntemlerin birbirleriyle karşılaştırılması

Hedef C_{pu}	Yöntemler	Log-normal($\mu=0, \sigma^2=0,1$)		
1		Ortalama	Standart Sapma	MSE
	CM	1,4468	0,3314	0,4910
	EM	1,3295	0,3505	0,2314
	WVM	1,2430	0,1871	0,0941
	WSDM	1,3016	0,1720	0,1206
	BCTM	1,9401	0,2239	1,8917
	RTM	1,0582	0,1193	0,0176

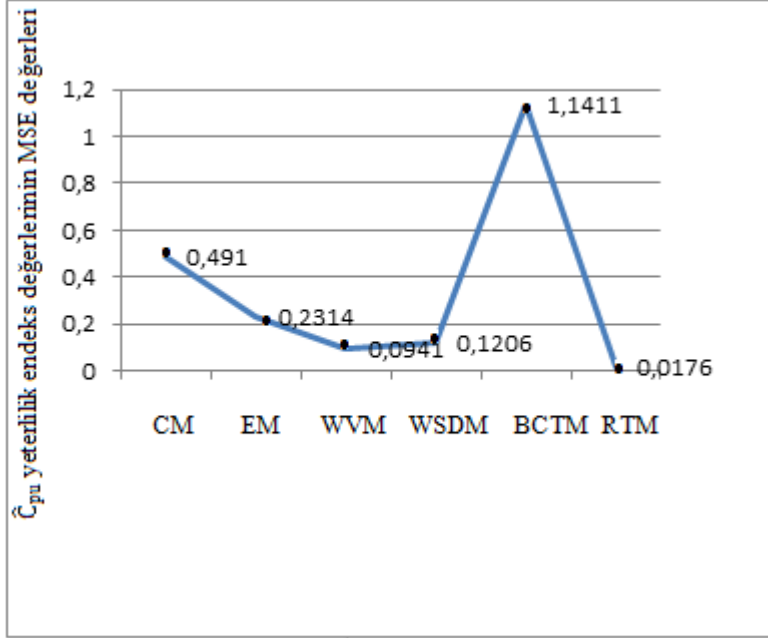
Şekil 5.3’de Log-normal($\mu=0, \sigma^2=0,1$) dağılımı altında her yöntem için hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 5.3 Log-normal($\mu=0, \sigma^2=0,1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin ortalamaları

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi Log-normal($\mu=0, \sigma^2=0,1$) dağılımı altında da hedef C_{pu} değerine en yakın tahmin RTM ile elde edilmiştir. Hedef C_{pu} değerine en uzak tahmin BCTM ile elde edilmiştir.

Şekil 5.4’de Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında farklı yöntemlerle elde edilen yeterlilik endeksi tahmin edicilerinin ($\hat{C}_{pu}$) MSE değerleri verilmiştir.

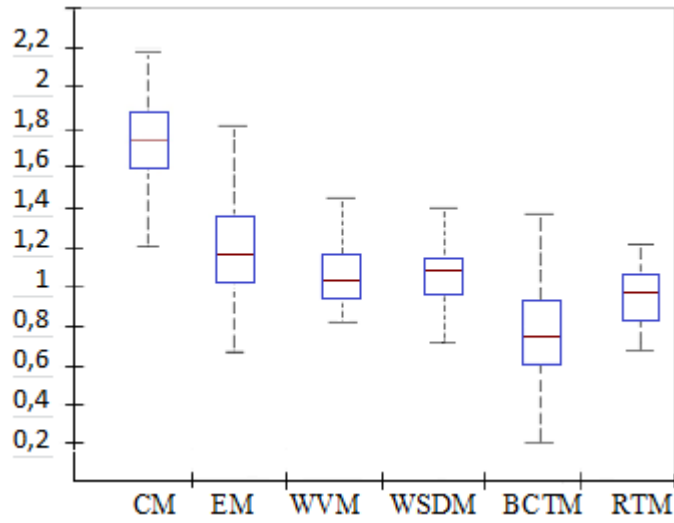


Şekil 5.4 Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin MSE değerleri

Şekil 5.4’de görüldüğü gibi Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında RTM ile elde edilen C_{pu} tahmin edicisi en düşük MSE değerine sahiptir. Ayrıca bu dağılım altında BCTM ile elde edilen yeterlilik endeksi tahmin edicisinin MSE değeri oldukça yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında en etkin yöntemin yine RTM olduğu, etkinliği en düşük olan yöntemin ise BCTM olduğu görülmektedir.

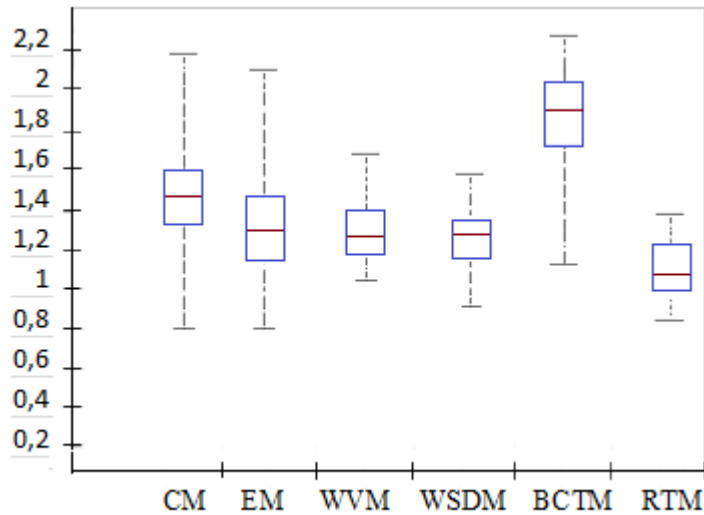
Simülasyonla farklı yöntemlerle elde edilen C_{pu} tahminlerinin kutu grafikleri şekil 5.5 ve şekil 5.6’da verilmiştir.

Şekil 5.5 Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin kutu grafiklerini göstermektedir.



Şekil 5.5 Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin kutu grafikleri

Şekil 5.5’de RTM ile elde edilen C_{pu} tahminlerinin hedef C_{pu} değerine en yakın tahminler olduğu görülmektedir. CM ve BCTM ile elde edilen C_{pu} tahminleri ise hedef değerden oldukça uzaktır. Kutu grafiklerinden açıkça görüldüğü gibi Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımı altında en etkin ve doğru tahmin RTM ile yapılmaktadır. EM, WVM ve WSDM ile de hedef değere yakın C_{pu} tahminleri yapılmaktadır. EM ile elde edilen C_{pu} tahminleri WVM ve WSDM ile elde edilen C_{pu} tahminlerine göre yüksek değişkenliğe sahiptir.



Şekil 5.6 Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0.1$) dağılımı altında elde edilen $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin kutu grafikleri

Şekil 5.6’da Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında tüm yöntemler ile hesaplanan $\hat{C}_{pu}$ yeterlilik endeks değerlerinin kutu grafiklerine baktığımızda hedef C_{pu} yeterlilik endeks değerine en yakın C_{pu} tahmin değerlerini veren yöntemin RTM olduğu açıkça görülmektedir. CM ve BCTM ile elde edilen C_{pu} tahminleri ise hedef değerden oldukça uzaktır. Dolayısıyla Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımı altında en etkin ve doğru tahminin RTM ile yapıldığı söylenebilir.



6. SONUÇLAR

Normal dağılıma sahip süreçlerde yeterlilik endeks hesaplamaları geleneksel yaklaşıma dayanmaktadır. Ancak gerçek hayatta süreçler normal dağılıma sahip olmayabilir. Bu gibi durumlarda yeterlilik endeksi hesaplamalarında kullanıcıların karşısına birden fazla yöntem çıkmaktadır. Bu çalışma ile 1. bölümde literatürde bu konu ile ilgili hangi çalışmalara değinildiği anlatılmış ardından 2. bölümde kalite kavramının genel tanımından ve tarihsel gelişiminden bahsedilmiştir. 3. bölümde kalitede süreç kavramına değinilmiştir. 4. bölümde normal dağılıma sahip olmayan süreçlerde, yeterlilik endekslerini hesaplayabilmek için uygulanabilen 6 yöntem anlatılmıştır. 5. bölümde, yapılan simülasyon çalışması anlatılmış, kullanıcılara yeterlilik endeksleri hesaplamalarında kullanabilecekleri uygun yöntemi seçmelerinde yardımcı olmak amaçlanmıştır. Yapılan simülasyonda Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) ve Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) dağılımına sahip süreçler altında çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar 6. bölümde özetlenmiştir.

Hem Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) hem de Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımına sahip süreçlerde, RTM ile elde edilen C_{pu} tahminlerinin hedef C_{pu} değerine en yakın tahminler olduğu görülmüştür. Diğer yöntemlere göre, RTM ile elde edilen C_{pu} tahminlerinin ortalaması hedeflenen C_{pu} yeterlilik endeksi değerine en yakın değer ve C_{pu} tahminlerinin değişkenliği de oldukça düşüktür. Ayrıca bu yöntem sonucu elde edilen C_{pu} tahminlerinin MSE değerleri de oldukça düşüktür. Dolayısıyla her iki dağılım için de en etkin C_{pu} tahmin edicisinin RTM yöntemi ile elde edildiği söylenebilir. Bunun yanında hem Log-normal($\mu=0$, $\sigma^2=0,1$) hem de Weibull($\alpha=2$, $\beta=1$) dağılımına sahip süreçlerde BCTM ile elde edilen C_{pu} tahmin edicisinin diğer yöntemler sonucu elde edilen C_{pu} tahmin edicilerine göre daha yüksek MSE değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, 6 yöntem için de BCTM, etkinliği en düşük olandır.

Tüm yöntemler ile elde edilen C_{pu} tahminlerinin kutu grafikleri de çizilmiş ve bu grafikler de çıkardığımız sonuçları görsel olarak desteklemiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abbasi, B., Ahmad, S. and Abdollahian, M.,** 2007, Measuring Process Capability for Bivariate Non-Normal Process Using the Bivariate Burr Distribution, WSEAS Transaction on Business and Economics, 71-77 pp.
- Ahmad, S., Abdollahian, M. and Zeepongsekul, P.,** 2008, Process Capability Estimation for Non-Normal Quality Characteristics: A Comparison of Clements, Burr and Box-Cox Methods, Anziam J., 642-665 pp.
- Anis, M. Z.,** 2008, Basic Process Capability Indices: An Expository Review, International Statistical Review, 347-367 pp.
- Aslan, D.,** 2003, Kalite Kontrol, Mühendislik Fakültesi Basınevi, İzmir.
- Bai, D. S. and Choi, I. S.,** 1995, $\bar{X}$ and R Control Charts for Skewed Populations, Journal of Quality Technology, 120-131 pp.
- Bircan, H., ve Özcan, S.,** 2003, Excel Uygulamalı Kalite Kontrol, Yargı Yayın Evi, Sivas.
- Bittanti, S., Lovera, M. and Moiraghi, L.,** 1998, Application of Non-Normal Process Capability Indices to Semiconductor Quality Control, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 296-303 pp.
- Borges, W. and Ho, L. L.,** 2007, Simulation and Computation on the Sampling Distribution of Clement's Capability Index, Communications in Statistics, 121-138pp.
- Box, P. E. G., and Cox, R. G.,** 1964, An Analysis of Transformations, Journal of the Royal Statistical Society. Series B, 211-252 pp.
- Burr, W. I.,** 1941, Cumulative Frequency Functions, 215-232 pp.
- Burr, W. I.,** 1973, Parameters for A General System of Distributions to Match A Grid of α_3 and α_4 , 1-21 pp.
- Chang, Y. S. and Bai, D. S.,** 2001, Control Charts for Positively Skewed Populations with Weighted Standart Deviations, Quality and Reliability Engineering International, 397-406 pp.
- Chang, Y. S., Choi, I. S., Bai, D. S., et al.,** 2002, Process Capability Indices for Skewed Populations, Quality and Reliability Engineering International, 383-393 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chapra, S. C. and Canale, R. P.**, 2010, Numerical Methods for Engineering, Boston.
- Charski, A.**, 2008, Estimation of Process Capability Indices in case of Distribution Unlike The Normal One, Archives of Materials Science and Engineering, 39-42 pp.
- Charski, A.**, 2009, Analysis of Clements' Method for Capability Indices Estimation, Metallurgy and Foundry Engineering, 55-64 pp.
- Chen, J. and Chen P.**, 2000, Re-Evaluating the Process Capability Indices for Non-Normal Distributions, International Journal of Production Research, 1311-1324 pp.
- Chen, P. J. and Ding, G. C.**, 2001, A New Process Capability Index for Non-Normal Distributions, International Journal of Quality and Reliability Management, 762-770 pp.
- Choi, I. S. and Bai, D. S.**, 1997, Process Capability Indices for Skewed Populations, Proc. 20th. Int. Conf. on Computer and Industrial Engineering, 1211-1214 pp.
- Choobineh, F. and Ballard, J. L.**, 1987, Control Limits of QC Charts for Skewed Distributions Using Weighted Variance, IEEE Transactions on Reliability, 473-477 pp.
- Clements, J. A.**, 1989, Process Capability Calculations for Non-Normal Distributions, Quality Progress, 95-100 pp.
- Erginel, N.**, 2005, İstatistiksel Süreç Kontrolüne Giriş, Eskişehir.
- Garrrity, S. M.**, 1990, Basic Quality Improvement, New Jersey.
- Gunter, B. H.**, 1989, The Use and Abuse of Cpk, Quality Progress, 108-109 pp.
- Hosseinfard, S. Z., Abbasi, B., Ahmad, S., et al.**, 2009, A Transformation Technique to Estimate the Process Capability Index for Non-Normal Processes, Int J Adv Manuf Technol, 512-517 pp.
- Ishikawa, K.**, 1997, Toplam Kalite Kontrol, Kalder Yayınları 7, İstanbul.
- Kane, E. V.**, 1986, Process Capability Indices, Journal of Quality Technology, 41-52 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kanichukattu, J. K. and Luke, J. A.,** 2013, Comparison Between Two Process Capability Indices using Generalized Confidence Intervals, *Int J Adv Manuf Technol*, 2793-2798 pp.
- Kotz, S. and Lovelace, C. R.,** 1998, *Process Capability Indices in Theory and Practice*, Arnold, London.
- Kotz, S. and Johnson, L. N.,** 2002, Process Capability Indices – A Review, 1992-2000, *Journal of Quality Technology*, 2-53 pp.
- Kovarik, M. and Sarga, L.,** 2014, Process Capability Indices for Non-Normal Data, *Wseas Transactions on Business and Economics*, 2224-2899 pp.
- Kurt, G.,** 1996, Kalite Kontrolünde Birikimli Toplam Kontrol Tekniği, *Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Dergisi*, Sayı 2, Eskişehir.
- Liu, H. P. and Chen, L. F.,** 2006, Process Capability Analysis of Non-Normal Process Data Using The Burr XII Distribution, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 27:975-984 pp.
- Melaun, M. and Militky, J.,** 2004, *Statistica Analyza Experimentalnich dat.*, Praha.
- Montgomery, D. C.,** 2001, *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Niaki, S. and Abbasi, B.,** 2007, Skewness Reduction Approach in Multi-attribute Process Monitoring, *Communications in Statistics: Theory and Methods*, 2313-2325 pp.
- Özdemir, T.,** 2000, *İstatistiksel Kalite Kontrol*, Ankara Üniversitesi Yayınevi, Ankara.
- Palmer, K. and Tsui, L. K.,** 1999, A Review and Interpretations of Process Capability Indices, *Annals of Operations Research*, 31-47 pp.
- Pan, J. N. and Wu, S. L.,** 1997, Process Capability Analysis for Non-Normal Relay Test Data, *Pergamon Microelectron Reliab.*, 421-428 pp.
- Pearn, W. L., Chen, K. S. And Lin, G.H.,** 1999, A Generalization of Clements' Method for Non-Normal Pearsonian Processes with Asymmetric Tolerances, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 507-521 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Polansky, A. M.**, 2005, A General Framework for Constructing Control Charts, Quality and Reliability Engineering International, 633-653 pp.
- Pyzdek, T.**, 1995, Why normal distributions aren't [all that normal], Quality Engineering, 769-777 pp.
- Rao, S. S., Xia, W. and Katz, J. M.**, 2013, Measuring Quality by Process Capability Indices and The Effects of Non-Normality, Journal of Statistics and Management Systems, 127-142 pp.
- Sağlı, M.**, 2003, Kalite Kavramı ve Tarihsel Gelişimi, Eğitim ve TKY Bülteni, Sayı 5, Kastamonu.
- Sennaroglu, B. and Senvar, O.**, 2015, Performance Comparison of Box-Cox Transformation and Weighted Variance Methods with Weibull Distribution, Journal of Aeronautics and Space Technologies July, 49-55 pp.
- Shore, H.**, 1917, A New Approach to Analysing Non-Normal Quality Data with Application to Process Capability Analysis, International Journal of Production Research Int. J. Prod. Res, 1917-1933 pp.
- Šibalija, T. V. and Majstorović, V. D.**, 2010, Process Performance Analysis for Non-Normal Data Distribution, International Journal "Total Quality Management & Excellence, 1-4 pp.
- Stoumbos, G. Z.**, 2002, Process Capability Indices: Overview and Extensions, Nonlinear Analysis: Real World Applications, 191-210 pp.
- Şahin, O.**, 2013, İstatistiksel Proses Kontrolünde Proses Yeterlilik Analizi ve Tekstil Endüstrisinde Uygulama, Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 253-271 pp.
- Tang, C. L. and Than, E. S.**, 1999, Computing Process Capability Indices for Non-Normal Data: A Review and Comparative Study, Quality and Reliability Engineering International, 15:339-353 pp.
- Tate, R. G.**, 1999, Proses Yeterlilik Analizi, Şişe Cam Yayınları, İstanbul
- Wu, W. C., Pearn, L. W. and Kotz, S.**, 2009, An Overview of Theory and Practice on Process Capability Indices for Quality Assurance, Int. J. Production Economics, 338-359 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wu, H. H., Swain, J. J., Farrington, P. A. et al.,** 1999, A Weighted Variance Capability Index for General Non-Normal Processes, Quality & Reliability Engineering International, 297-402 pp.
- Wu, H. H. and Swain, J. J.,** 2001, A Monte Carlo Comparison of Capability Indices when Processes are Non-Normally Distributed, Quality & Reliability Engineering International, 219-231 pp.
- Zimmer, J. W., Keats, B. J. and Wang, K. F.,** 1998, The Burr XII Distribution in Reliability Analysis, Journal of Quality Technology, 386-394 pp.



EKLER

Ek 1 İkiye Bölme Metodu (Bisection Method)



EKLER

Ek1 İkiye Bölme Metodu (Bisection Method)

$x \in [a,b]$ ve $(x_1=a, x_2=b)$ olacak şekilde fonksiyon sürekli ve $f(a).f(b)<0$ koşuluna sahiptir. İkiye Bölme Metodu iterasyonları aşağıdaki gibidir.

1.İterasyon : $f(x_1)>0$ ve $f(x_2)<0$ olduğundan;

$$x_1=x_L, x_2=x_U, x_3=x_r \text{ için } x_r = \frac{x_L+x_U}{2} \rightarrow x_3 = \frac{x_1+x_2}{2}$$

2.İterasyon : $f(x_3)<0, f(x_1).f(x_3)<0$ için,

$$x_1=x_L, x_3=x_U, x_4=x_r \text{ için } x_r = \frac{x_L+x_U}{2} \rightarrow x_4 = \frac{x_3+x_1}{2}$$

3.İterasyon : $f(x_4)>0, f(x_3).f(x_4)<0$ için,

$$x_3=x_L, x_4=x_U, x_5=x_r \text{ için } x_r = \frac{x_L+x_U}{2} \rightarrow x_5 = \frac{x_3+x_4}{2}$$

.
. .
.

Böylece iterasyon ilerledikçe fonksiyon kök değerine yaklaşmaktadır.
(Chapra and Canale, 2010)