

## DÜŞÜK HACİMLİ ÜRETİM İÇİN KALİTE KONTROL SİSTEMİ TASARIMI

Melis ÖZATEŞ, Medine ŞAHİN, Sinem ŞENOL, Fulya TERZİ, Sinan YÖRÜKOĞLU, Gülser KÖKSAL\*, Yasemin SERİN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara  
koks@metu.edu.tr, serin@metu.edu.tr

### ÖZET

Bu çalışmada; düşük hacimli üretime sahip Küçükpazarlı Havacılık firması için, üretim süreçlerinin ve parçaların kalitesini kontrol etmek ve iyileştirmek amacıyla bir sistem tasarlanmıştır. Firmanın mevcut kalite kontrol yaklaşımı hata önlemekten ziyade, %100'e yakın muayeneyle hataları ayıklamaya yöneliktir. Ürün çeşitliliğinin fazla, üretim hacminin düşük ve kontrol kapasitesinin kısıtlı olması etkili bir kalite kontrol sisteminin tasarımını güçleştirmektedir. Bu çalışmada önerilen sistem, ürünlerin çeşit ve miktarlarındaki değişiklikleri, sistemdeki iyileşmeleri ve kapasite kısıtlarını dikkate alan mekanizmalara sahiptir. Önerilen yaklaşımlardan ilki; üretim süreçlerinin yeterliliği hakkında geri bildirim alıp, onları kontrol altında tutarak hataları önlemeye yarayan İstatistiksel Süreç Kontrol yaklaşımıdır. İkincisi; hata önceliklerine göre iyileştirmelerle hataları azaltmaya yarayan Hata Türü ve Etkileri Analizi'dir. Son olarak, etkili bir kalite ölçüm sisteminin oluşturulması için Ölçüm Sistemi Analizi ile Muayene Planlaması için bir matematiksel model ve Kabul Örnekleme için yöntemler önerilmiştir. Bu çözüm yaklaşımlarının etkileşimleri bir akış diyagramında gösterilmiştir. Önerilen sistemin uygulanmasına başlanmıştır; elde edilen sonuçlar ve sistem tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kalite kontrol, istatistiksel süreç kontrol, muayene planlaması, hata türü ve etkileri analizi, düşük hacimli üretim, havacılık sektörü

### DESIGNING A QUALITY CONTROL SYSTEM FOR SHORT RUN MANUFACTURING ENVIRONMENT

#### ABSTRACT

In this study, a system is designed for a short run manufacturing firm, Küçükpazarlı Aviation, for monitoring and improving quality of production processes and products. Current quality control approach is based on filtering out defectives through 100% inspection, rather than preventing failures. High product variety, low production volume and limited control capacity make it harder to design an effective quality control system. The proposed system involves mechanisms that consider changes in product variety, improvements and capacity constraints. A Statistical Process Control approach is proposed to monitor processes and get feedback about capability to prevent failures. Failure Mode and Effects Analysis is used for improving the processes by prioritizing failures. Lastly, Measurement System Analysis and Inspection Planning supported by a mathematical model and Acceptance Sampling methods are proposed for the effective quality measurement and control. Interactions among these approaches are shown on a flow diagram. The proposed system and implementation results are discussed.

**Keywords:** Quality control, statistical process control, inspection planning, failure mode and effects analysis, short run manufacturing, aviation sector

\* İletişim yazarı

Doğuş Üniversitesi tarafından düzenlenen 32. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi Öğrenci Proje Yarışması'nda ikincilik ödülü kazanan çalışmanın ilgili öğretim üyelerinin katkılarıyla düzenlenmiş halini EM Dergisi yayın politikası doğrultusunda yayımlıyoruz.

### 1. GİRİŞ

Projenin yürütüldüğü firma Küçükpazarlı Havacılık 2012, havacılık sektöründe uçak gövde parçaları

Önerilen sistem benzer durumda olan, düşük hacimli üretim yapan birçok firmaya uyarlanabilir.

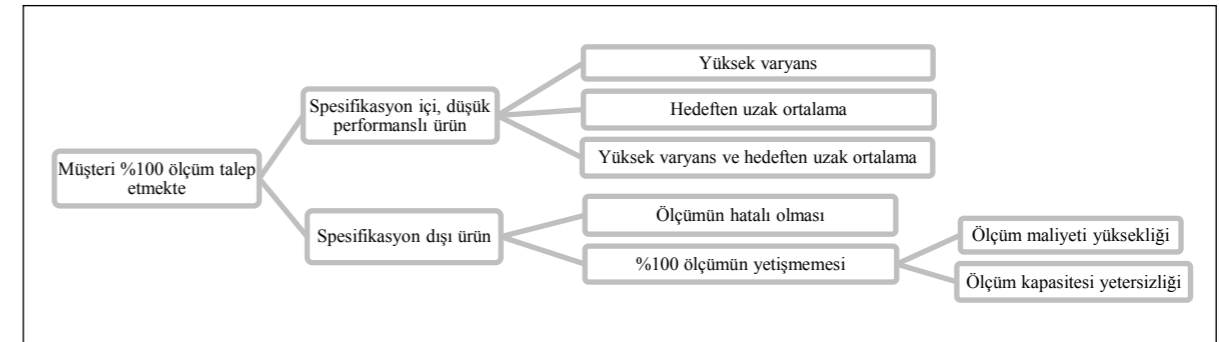


Şekil 1. Uçak Gövde Parçaları

üretmektedir (bkz. Şekil 1) ve düşük hacimli üretime sahiptir. Yıllık yaklaşık 250,000 adet ürün (parça) üreten firma, 800'den fazla çeşit parçanın üretimini yapabilmektedir. Üretilen bu parçaların kalite kontrol sisteminin muayene temelli olması, hata önleyici çalışmaların yeterli olmaması, müşteri şikayetlerinin, yeniden işleme ve hurda miktarlarının yüksek olması ve kısıtlı kalite kontrol kapasitesi nedeniyle ölçüm yapmakta zorlanılması; bu çalışmanın başlatılmasına yol açan temel nedenler arasındadır. Bu kapsamda,

### 2. PROBLEMİN ANALİZİ VE TANIMLANMASI

Çalışmanın yürütüldüğü firmada var olan kalite kontrol sistemi, müşterilerin üretilen parçaların %100 muayene edilmesini talep etmeleri nedeniyle muayene temelli bir yapıda kurulmuş, ancak yetersiz kalmıştır. Müşterinin %100 muayene talebini ortaya çıkarabilecek nedenler Şekil 2'deki diyagramda özetlenmiştir.



Şekil 2. %100 Muayene Talebinin Temel Nedenleri

problemi analiz etmek için firmanın yaşadığı zorlukların kök nedenleri belirlenmiş ve bu nedenlerden yola çıkarak problem tanımı yapılmıştır. Üretim kalite kontrol sistemi daha ayrıntılı incelenerek üç ana başlık altında eş zamanlı ve etkileşimli olarak çalışmak üzere geliştirilmiş beş farklı çözüm yaklaşımı, sistemin birbirini etkileyen önemli parçalarını oluşturmuştur. Firmaya özel kurulan bu sistemin tüm parçalarının ilişkilendirildiği bir akış diyagramı oluşturulmuştur.

Bu diyagramda görüldüğü üzere, müşterinin %100 muayene talep etmesinin ana nedenleri spesifikasyon içi ancak performansı düşük veya spesifikasyon dışı ürünlerin müşteriye ulaşmasıdır. Devamında ise firmadan alınan verilere dayanarak kök nedenler belirlenmiştir.

Spesifikasyon içi düşük performanslı ürünlerin üretilmesinin üç sebebi olabilir. Bunlar, yüksek varyansla veya hedeften uzak ortalama ile üretim veya

her ikisinin de var olduğu üretim olarak belirlenmiştir. Yüksek varyans, belli bir kalite karakteristiğinin ölçüm değerlerinin büyük farklılıklar göstermesi; hedeften uzak ortalama ise, bu ölçümlerin ortalamasının istenilen değerden uzak olması anlamına gelir. Her ikisinin var olduğu durumda ise, hem varyans hem de ortalama bakımından üretim süreci iyileştirilmeye gerek duyar. Tüm bunlar sonucunda üretilen parçalar, kalite karakteristikleri spesifikasyon içinde olmasına rağmen düşük performans gösterebilirler. Ancak bu ana nedenin belirtileri, firmanın mevcut muayene temelli kalite kontrol sisteminde gerekli istatistiksel verileri tutmamasından dolayı somutlaştırılmamıştır.

%100 muayene talebinin diğer ana sebebi ise spesifikasyon dışı ürünlerin müşteriye ulaşması olarak belirlenmiştir. Firmaya gelen müşteri şikâyetleri de bu nedenden kaynaklanmaktadır. Örneğin, 2011 yılında alınan müşteri şikâyetleri sayısı, bir önceki yıla kıyasla üretim miktarına oranla yaklaşık 5,5 katına çıkmıştır.

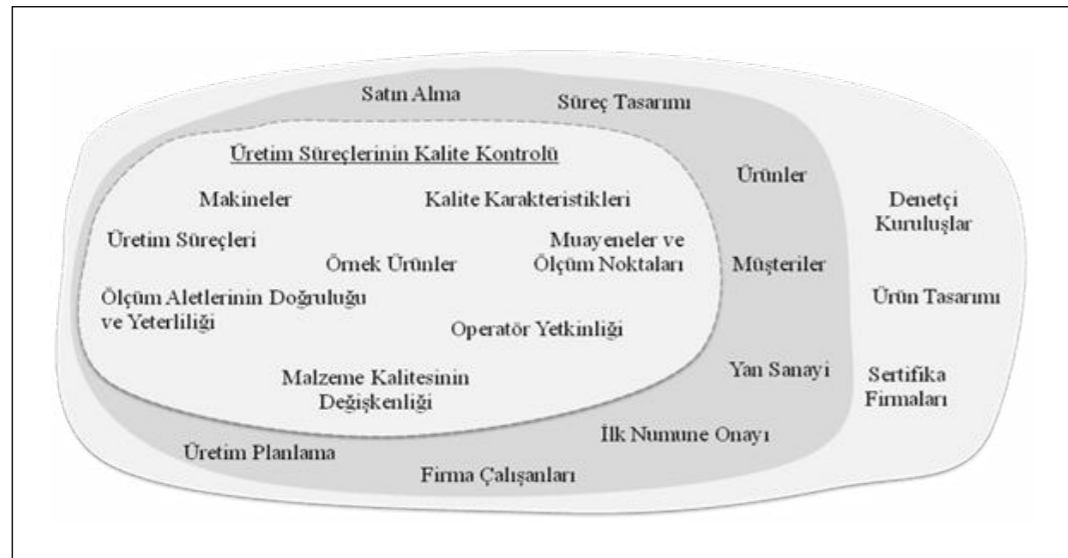
Müşteriye spesifikasyon dışı ürünler gönderilmesinin iki sebebi belirlenmiştir. İlki, muayene sırasında yapılan ölçümlerin hatalı olmasıdır. Bu durumda hatalı ürünler, firma içerisinde fark edilemeyerek müşteriye gönderilmekte ve şikâyete yol açmaktadır. İkinci sebep ise firmada %100 ölçümün, ölçüm maliyeti yüksekliği veya ölçüm kapasitesi yetersizliği

nedenlerinden ötürü yetiştirilememesidir. Firmanın ölçüm kapasitesinin yetersizliği, üretim kapasitesi ile kalite kontrol biriminin kapasitesi karşılaştırılarak belirlenmiştir. Mevcut üretim hacmi ile %100 ölçümün yetiştirilmesi için ölçüm kapasitesinin yaklaşık 5 katı kadar olması gerektiği belirlenmiştir. Kapasite artırımını ise alınacak ölçüm aletlerinin yüksek maliyeti nedeniyle mümkün görünmemektedir. Şikâyetlerdeki artışın, ölçüm kapasitesinin yetersizliği nedeniyle belki de hurdaya ayrılması gereken çok sayıda ürünün fark edilemeyip müşteriye gönderilmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Müşterinin %100 ölçüm talebinin kök nedenleri, kök nedenlere ait problem belirtileri ve müşteri gereksinimleri ışığında problem şu şekilde tanımlanmıştır:

“Üretim süreçlerini kontrol altında tutan ve müşteri memnuniyetini arttıran etkili bir kalite kontrol sisteminin tasarlanması”

Problem analizi ve tanımlanması aşamasından sonra, proje kapsamındaki konular ve etkileşimde olduğu öğeler Şekil 3'teki gibi üç kademeli bir hiyerarşi düzeninde özetlenmiştir.

Firmada parçaları işlemek üzere CNC makineleri ve torna tezgâhları kullanılmaktadır. Üretilen parçalar, başlangıç aşamasında metal bir kütük halinde iken, bu makinelerde kütük halindeki parçanın A, B,



Şekil 3. Sistem Hiyerarşisi

C yüzeyleri işlenmekte, operasyonlar da bu nedenle A, B, C isimleri almaktadır. Ayrıca gerekli görülürse parçalar makinelerdeki işlemlerinin ardından çapak alma bölümüne gönderilerek pürüzlü kısımları düzeltilmektedir.

Makinedeki operasyonlarla parçalar üzerinde delik çapı, et kalınlığı gibi kalite karakteristikleri oluşmaktadır. Firmanın ürettiği parçalardaki karakteristikler iki ayrı başlık altında incelenmiştir. İlk olarak müşteri tanımlarına göre kritik ve kritik olmayan diye belirlenmiştir. İkinci olarak ise tüm karakteristikler niteliksel ve niceliksel olarak ikiye ayrılmıştır. Parçanın genel özellikleri ve karakteristikleri giriş muayene, ara muayene ve son muayene sırasında kontrol edilmekte ve spesifikasyon içi değerlere sahip olup olmadıkları anlaşılmaktadır. Ölçümler sırasında mikrometre, kumpas, CMM (bilgisayar kontrollü ölçüm cihazı) gibi araçlar kullanılmaktadır.

Firmanın ürün çeşitliliğinin fazla olması nedeniyle, çözüm yaklaşımlarının uygulanabileceği ve gözlemlene imkânının fazla olduğu örnek parçalar Pareto analizi sonucunda belirlenmiş ve geliştirilen çözüm yaklaşımları bu parçalar üzerinde uygulanmıştır.

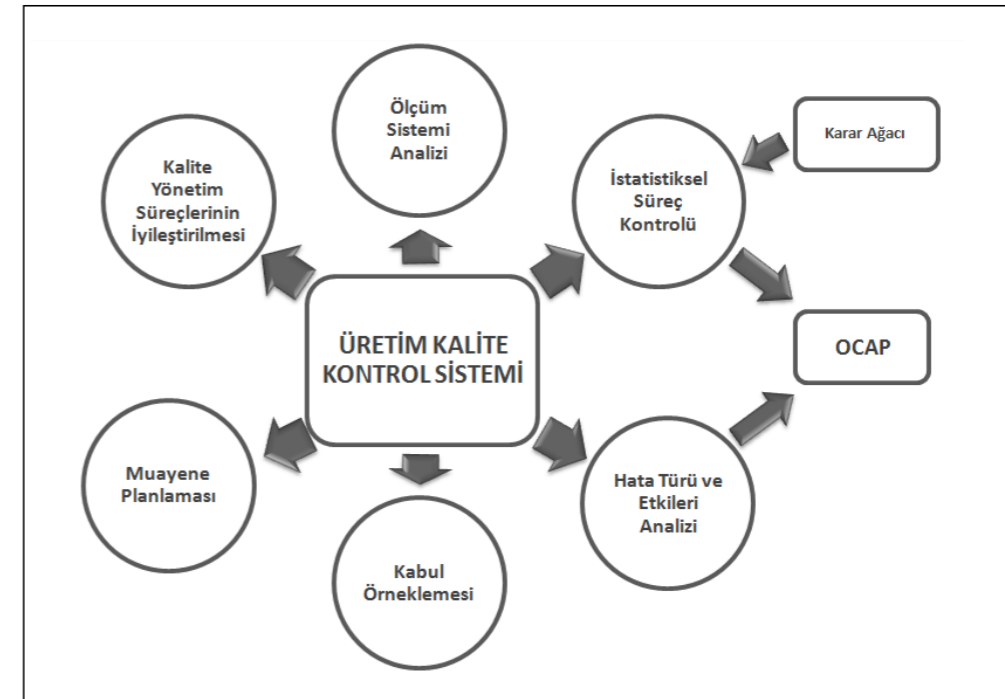
### 3. ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Problem tanımına bağlı olarak firma için tasarlanan üretim kalite kontrol sisteminin firmaya; süreç kararlılığının izlenmesi ve hatanın erken fark edilmesi, sürekli iyileştirme ve düşük maliyetli etkin ölçüm sağlanması hedeflenmiştir.

Bu doğrultuda oluşturulacak sistemin ana öğeleri;

- Ölçüm sistemi analizi
- İstatistiksel süreç kontrolü
- Muayene planlaması
- Kabul örnekleme
- Hata türü ve etkileri analizi (HTEA)
- Kalite yönetim süreçlerinin iyileştirilmesi olarak belirlenmiştir (bkz. Şekil 4).

4. şekilde görülen alt sistemler birer çözüm yaklaşımıdır. Bu çözüm yaklaşımlarının tasarlanan sistemdeki ilişkisini göstermek ve yapılacak kalite kontrol çalışmalarıyla ilgili olarak firmaya karar desteğinde bulunmak amacıyla bir akış diyagramı oluşturulmuştur. Bu diyagram firmaya özel olarak oluşturulan sistemin nasıl çalıştığını da anlatmaktadır (bkz. Şekil 5).

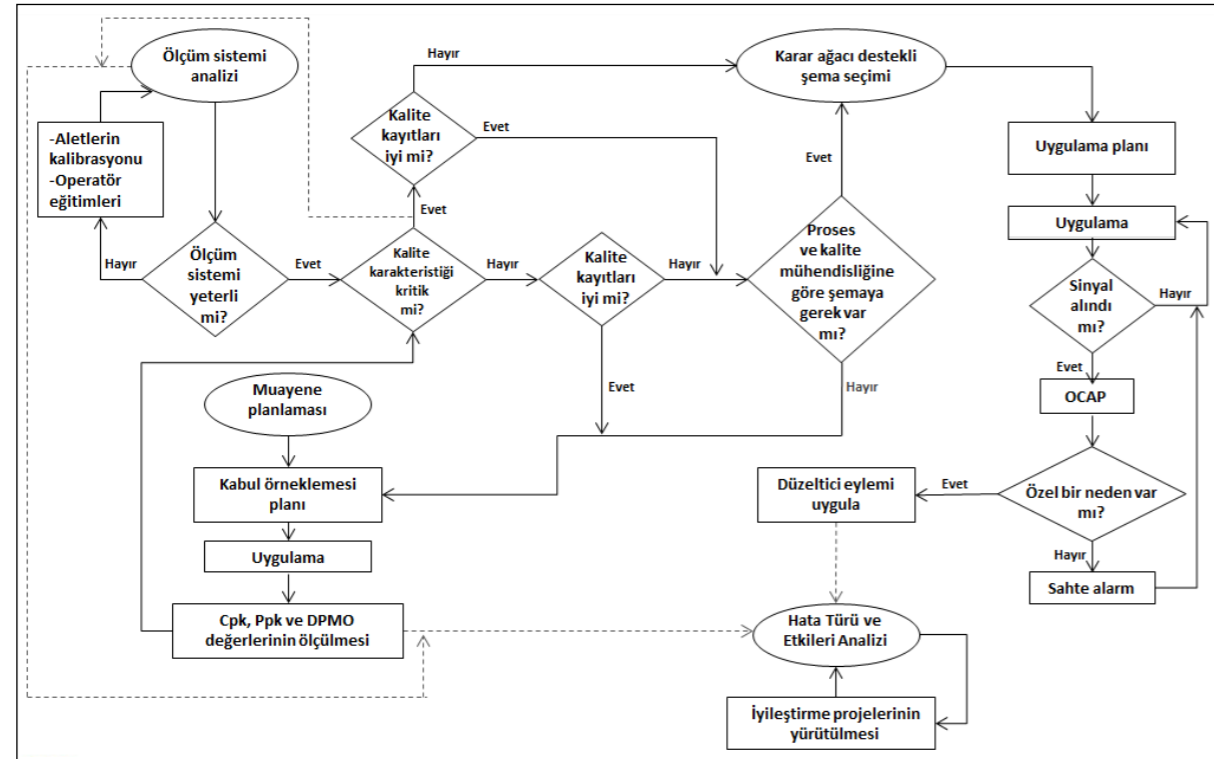


Şekil 4. Üretim Kalite Kontrol Sistemi Ana Öğeleri

Kalite karakteristikleri üzerinde yapılan ölçümlerin doğruluğu ve kesinliği, üretim kalite kontrol sisteminin öncelikli koşulu olan veri güvenilirliğini etkileyen en temel unsurdur. Bu nedenle, ölçümlerin yeterliliği konusunda yeterli bilgi yoksa akışın ölçüm sistemi analiziyle başlatılması önerilmiştir. Bu analiz sonucunda sistemin yeterli olmadığı görülürse aletlerin kalibre edilmesi ve operatör eğitimleri yapılması önerilirken; yeterli ise kalite karakteristiğinin kritikliğinin sorgulanması aşamasına geçilir. Kalite karakteristiği kritik ve geçmiş veriler iyi bir kalite seviyesinde değil ise, sistem karar vericiyi doğrudan karar ağacı destekli şema seçimine yönlendirmektedir. Geçmiş verileri iyi olan kritik karakteristikler ve geçmiş verileri kötü olup kritik olmayan karakteristikler için, şema uygulanması gerekliliğine süreç ve kalite mühendisleri karar vermektedir. Gerekli görüldüğü durumlarda seçilen istatistiksel süreç kontrol şemasının özelliklerine bağlı olarak uygulama planı belirlenir ve üretimle birlikte şema uygulaması da başlatılır. Uygulamada sinyal alınmadığı sürece devam edilirken; kontrol dışı sinyali

alınırsa bu durumda OCAP (*Out-of-Control Action Plan: Kontrol-dışı Eylem Planı*) kullanılarak, olağan dışı özel bir durum olup olmadığı belirlenir. Eğer özel bir neden var ise, gerekli düzeltici eylem planı uygulanır; yok ise yanlış alarm olarak kabul edilip şema uygulamasına devam edilir.

Oluşturulan sistem ile firmaya üretim süreçlerinin tümünde şema uygulaması yapılması önerilmemiştir. Kalite karakteristiğinin kritik olmadığı ve geçmiş verilerinin iyi olduğu durumda sistem akışı karar vericiyi doğrudan kabul örnekleme planına yönlendirmektedir. Kararın süreç ve kalite mühendisliğine bırakıldığı durumlarda da kabul örnekleme uygulaması tercih edilebilir. Kabul örneklemesinin doğru işlemesi için muayene planlaması gerekli görülmüştür. Bu doğrultuda oluşturulan matematiksel modellerden alınan çıktılar kullanılarak üretime uygun kabul örnekleme planlaması oluşturulur ve uygulanır. Uygulamalar sırasında tutulan veriler kullanarak süreç yeterlilik oranları hesaplanır ve geçmiş veri olarak kullanılmak üzere sistem akışına tekrar bağlanılır.



Şekil 5. Önerilen Kalite Kontrol Yaklaşımlarının İlişkisi

Sistemin uygulanması sırasında elde edilen tüm veriler (Şekil 5 üzerinde kesikli çizgilerle ifade edilmiştir) Hata Türü ve Etkileri Analizi'nde toplanır. Hataların oluşmadan önlenmesi amacıyla önerilen bu analiz sonucunda iyileştirme projeleri başlatılır ve sonuçları tekrar kullanılarak analizin güncel tutulması sağlanır. Ayrıca sistemin genelini kapsayan kalite kontrol süreçlerinin iyileştirilmesi çalışmaları, sistem ile eş zamanlı olarak yürütülür.

Oluşturulan bu sistem; firmanın düşük hacimli üretime sahip olması, ürün çeşitliliğinin yüksek olması ve üretimin operatör el becerisine bağlılığı gibi zorlukları göz önünde bulunduran ve hem müşteri memnuniyetini artıran hem de ölçüm kapasitesini verimli ve etkili şekilde kullanarak kalitesizlik maliyetini azaltan bir sistemdir.

### 3.1 Ölçüm Sistemi Analizi

Etkili bir kalite kontrol sistemine sahip olmanın ön koşullarından biri, ölçümlerden elde edilen verilerin güvenilirliğini, yani ölçüm sisteminin doğruluk ve kesinliğini sağlamaktır. Köksal vd. (2012) ölçüm sisteminin yeterince iyi olmadığı durumda kalitesizlik maliyetlerinin satış gelirlerinin yüzde 20'sini aşabildiğini göstermiştir. Bu bağlamda, firmada ölçüm verilerinin doğru ve kesin bir şekilde alınıp alınmadığını belirlemek amacıyla öncelikle firmanın ölçüm sistemi, en çok kullanılan üç farklı ölçüm aleti üzerinden Montgomery (2009) ve Minitab 16'da tarif edilen ölçüm sistemi analiz yöntemleri firma özelinde uygulanarak incelenmiştir.

Analiz için kullanılan ölçüm aletleri kumpas, mikrometre ve bilgisayar kontrollü bir ölçüm aleti olan CMM'dir. Bunlar firmada en sık kullanılan ölçüm aletleri olup, birer tanesine örnek çalışma olarak analizler üç aşamada yapılmıştır.

1. *Tip 1 analizi*: Bir operatörün kalibrasyonu yeni yapılmış ölçüm aleti kullanarak yaptığı bu analizin sonucunda, ölçüm aletinin bir referans parçasının ölçümündeki toplam yanlılık ve tekrarlanabilirlik belirlenir.
2. *Doğrusallık ve yanlılık analizi*: Ölçümlerin farklı referans değerlerine göre yanlı olup olmadığı ve

varsa bu hatanın farklı değerler için tutarlı olup olmadığı bilgisi elde edilir.

3. *Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik analizi*: Bu analiz sonucunda ise ölçüm aletinin ve ölçüm yapan farklı operatörlerin ölçümlerdeki toplam varyasyona katkısı hesaplanır.

Örnek çalışmada kullanılan aletlerden kumpas ve mikrometre için tüm bu çalışmalar yapılırken CMM için zaman kısıtı ve kalite kontrol biriminin yoğun iş yükü nedeniyle tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik analizi ve CMM'in kalibrasyonu, üretici firma tarafından yapıldığından; Tip 1 analizi yapılamamıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Kumpas ve mikrometrenin yanlılık değerleri, hassas olmayan ölçümlerde kullanıldığı ve düzenli olarak kalibre edildiği sürece ihmal edilebilir büyüklüktedir ve doğrusallık etkisi yoktur. Buna göre, kumpas ve mikrometrenin yanlılığı farklı ölçüm değerleri için tutarlıdır.
- Tekrarlanabilirlik ve yeniden üretilebilirlik analizine göre kumpas ve mikrometrenin büyük tolerans aralığına sahip karakteristiklerin ölçülmesinde kullanılabilecek yeterlilikte olduğu; ancak bu aletler için ölçüm sisteminin yapılan ölçümlerdeki toplam varyasyona katkısının oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, ölçüm sisteminde iyileştirmeler yapılması (alet hassasiyetinin artırılması, operatörlerin eğitilmesi gibi) gerekmektedir.
- CMM üzerinde sadece doğrusallık ve yanlılık analizi yapılabilmektedir. Bu analizin sonucunda CMM'in az da olsa yanlı ölçüm yaptığı ve yapılan ölçümlerde doğrusallık etkisi olduğu belirlenmiştir, yani ölçüm hataları farklı değerler için tutarlı değildir.

Firmanın ölçüm sisteminin genel anlamda yeterliliğini belirlemek ve ihtiyaç duyulan iyileştirmeleri yapabilmek için, yukarıda bahsedilen çalışmaların firmadaki tüm ölçüm aletlerine uygulanması ve sonuçlarına göre gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Firma, yapılan örnek uygulamalara ve devam ettirmesi gereken çalışmalara dair ayrıntılı şekilde bilgilendirilmiştir.

### 3.2 İstatistiksel Süreç Kontrolü

İstatistiksel süreç kontrol şemaları, üretimde kararlılığı sağlayarak hata riskinin azaltılması ve hataların oluşmadan veya kısa zamanda fark edilip gerekli önlemlerin alınması için en etkili araçlardan biridir. Bu sebeple firmadaki düşük hacimli üretim özelliklerine uygun istatistiksel süreç kontrol şemaları belirlenmiş, bunların seçimi için bir karar destek sistemi geliştirilmiş ve buna bağlı olarak örnek şema uygulamaları yapılmıştır. Karar destek sistemini geliştirmek için geniş bir literatür araştırması yapılmış, firmanın üretim tipi ve firmada üretimi yapılan parça karakteristiklerine uygun istatistiksel kalite kontrol şemaları listelenmiştir (bazı önemli kaynaklar: Bothe, 1996, Celano vd. 2010, Doty, 1997, Wheeler, 1991 ve Şahinsev, 2002). Araştırma sonuçları doğrultusunda yapılması öngörülen şema uygulamalarının firmada devamlılığını sağlamak, üretim özelliklerinin değişmesi durumuna firmayı daha hazırlıklı kılarak doğru şema seçimini desteklemek için geliştirilen karar destek sistemi bir karar ağacı niteliğindedir (karar ağacının oluşturulmasında temel alınan kaynak: Doğanç, 2004). Bu karar ağacının parça ve üretim özelliklerine göre önerdiği şemaların firmaya uygunluğunun test edilmesi amacıyla ile bu şekilde seçilen şemalar kullanılarak firmada bazı örnek çalışmalar yapılmıştır. Karar ağacında önerilen şemalara ek olarak üretime uygun olabilecek başka şemaları da test etmek, şema uygunluğunu daha iyi

belirlemek ve firmaya özel çözümler sunabilmek için, çalışmalar sırasında bir üretim için birden fazla çeşit şema kullanılmıştır. Altı farklı parça üzerinde çalışılarak beş çeşit kalite karakteristiği için toplam 11 şema uygulaması yapılmıştır (bkz. Tablo 1).

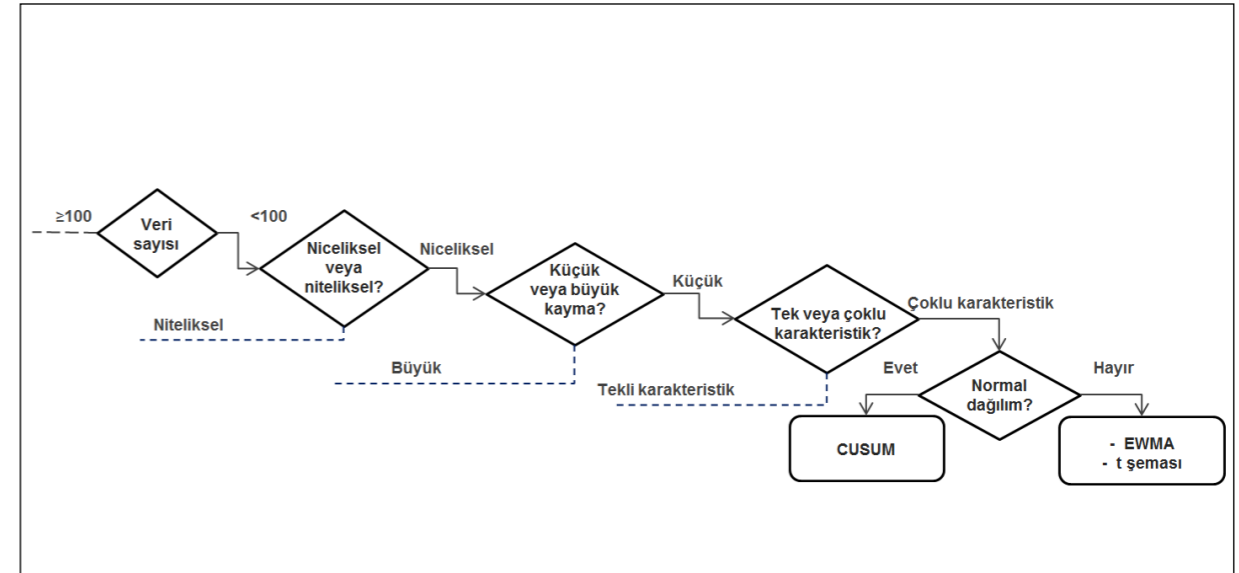
Yapılan uygulamalarda, örnek parçaların ve üretimin özellikleri nedeniyle karar ağacının Şekil 6'da görülen dalı sıklıkla kullanılmıştır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda bu dalın geçerli ve etkili bir yönlendirme yaptığı doğrulanmıştır.

Şema uygulamaları sırasında alınan sinyallerin yaklaşık olarak yarısı olağan dışı özel bir durum olarak belirlenmiş ve bunları gidermek amacıyla süreç mühendislerince belirlenen düzeltici eylemler gerçekleştirilmiştir. Sinyal alındığında sistem akışında da belirtildiği gibi, OCAP yardımıyla sinyalin nedeninin tanımlanabilirliği belirlenmektedir. Bu kontrol dışı eylem planının, HTEA uygulamalarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda genişletilerek tamamlanması gerekmektedir.

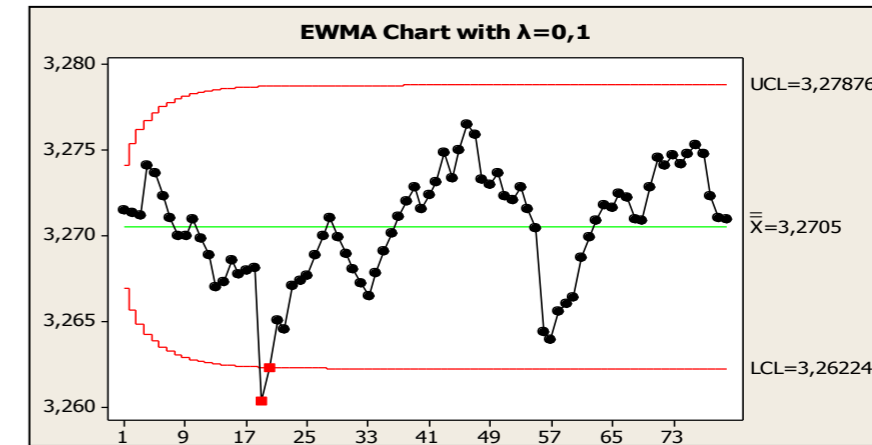
Örnek uygulamalar sırasında kullanılması ve firmanın geliştireceği planın ilk basamağı olması için bir doğrulama listesi oluşturulmuştur. Bu liste üretim sırasında dört ana nedene bağlı olarak oluşabilecek hataları içermektedir. Örnek çalışmalar sırasında alınan sinyaller bu doğrulama listesi yardımıyla tanımlanmış ve saptanan hataların düzeltilmesi için gereken eylemler gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Firmada Yapılan Örnek Şema Uygulamaları

Uygulama no.	Kalite karakteristiği	Gözlem sayısı	Geçmiş veri dağılımı	Uygulanan şema
1	Delik çapı	79	Normal değil	EWMA
	Et kalınlığı	79	Normal	I-MR, Bölge şeması (Ölçüm noktasını belirlemek için)
2	Delik çapı	100'den az	Normal değil	MA-MR
	Et kalınlığı	100'den az	Normal	I-MR, Bölge şeması (Ölçüm noktasını belirlemek için)
3	Et kalınlığı	75	Normal değil	Koşu şeması, I-MR, Shewhart t, EWMA
4	Uzunluk	48	Normal değil	Koşu şeması, EWMA
5	Et kalınlığı	39	Normal değil	EWMA
	Uzunluk			
	Delik çapı			
6	Et kalınlığı	79	Normal değil	EWMA



**Şekil 6.** Oluşturulan Karar Ağacından Bir Kesit



**Şekil 7.** Et Kalınlığı Kalite Karakteristiği İçin Yapılmış EWMA Şeması

Şekil 7'de et kalınlığı karakteristiği için yapılmış EWMA şeması görülmektedir. Kontrol dışı sinyallerinin nedeni parçanın üretimi sırasında aparat üzerinde talaş birikmesinden ötürü kalite karakteristiğinde bozulma meydana gelmesi olarak belirlenmiştir. Bu gözlem sonucu aparat daha dikkatlice temizlenmiş ve üretim eski seyrine dönmüştür.

Yapılan örnek çalışmalardan çıkarılabilecek bir başka önemli sonuç ise firmanın üretiminde ürün çeşitliliğinin yüksek olması ve bu durumun şema uygulamasını zorlaştırmasıdır. Aynı zamanda üretimin

küçük hacimli oluşu da veriler üzerinde istatistiksel çalışma yapılmasını zorlaştırmaktadır. Uygulanan şemaların limitlerinin belirlendiği ilk aşamasında üretim metotları genellikle oturmamış olmaktadır. Bu da, limitlerin doğru belirlenmesini güçleştirmektedir. Her ne kadar bu tip üretilere uygun şemalar seçilmiş olsa da alınan sinyallerin yaklaşık yarısı, üretim mühendislerince yapılan kontroller sonucu süreçte olağan dışı özel bir durum bulunamaması nedeniyle sahte alarm olarak nitelendirilmiştir. Buna bağlı olarak şemaların alt ve üst kontrol limitlerinin genişletilmesi bir çözüm olabilir; fakat o zaman da

hataya yol açabilecek olağan dışı durumların gözden kaçması gibi firmanın bulunduğu sektör gereği riske atılmaması gereken durumlar oluşabilir. Bu çıkarımlara bağlı olarak firmada şema uygulamalarının daha iyi yürütülmesi ve şemalardan doğru zamanlarda sinyal alınarak hataların daha kesin bir şekilde önlenmesi için, şema çalışmalarını başlatmadan önce, firmaya her yeni parça için üretim metodu geliştirme üzerinde daha fazla çalışma yapar; süreçlerdeki kararlılığı artırması ve doğal değişkenliği düşürmesi önerilmiştir.

Şema uygulamaları bazı üretim sistemlerinde hataların yakalanmasıyla sağladığı katkıyı örebilecek düzeyde bir maliyete sahip olabilir. Bu durumu önlemek amacıyla yapılan şema uygulaması önerileri, firmadaki tüm üretim süreçlerini kapsamamaktadır. Öte yandan, süreçlerin kararlılığı şema yoluyla izlensin ya da izlenmesin, süreçlerin yeterliliğiyle ilgili düzenli değerlendirme yapabilecek kadar veri sistemde tutulmalıdır. Özellikle şema uygulaması olmayan süreçlerde bu veri muayene yoluyla toplanabilir (bkz. Kısım 3.4). Üretimi yapılan parçaların pek çoğu, belli aralıklarla gelen siparişler doğrultusunda farklı parti büyüklükleriyle üretilmeye devam etmektedir. Firmadaki üretimin bu özelliği kalite karakteristiklerinin değerleriyle ilgili yeterli geçmiş veri tutulmasını sağlamaktadır. Önerdiğimiz kalite kontrol sistemi, geçmiş verilerden ve kalite karakteristiğinin kritikliğinden yola çıkarak gerekli görülmeyen durumlarda karar vericiyi şema uygulamaları yerine; firmaya özel geliştirilmiş kabul örneklemesi uygulamalarına yönlendirmektedir.

Geçmiş veriler yardımıyla süreç yeterlilik oranları  $C_{pk}$  ve  $P_{pk}$  veya DPMO ölçümleri yapılarak süreç başarısına karar verilebilir (Montgomery, 2009).  $C_{pk}$  değerlerinin 1.33 gibi belli limitlerin altında olması ve/veya  $P_{pk}$  ve  $C_{pk}$  değerlerinin yakınlık göstermemesi gibi durumlarda şema uygulaması çok gereklidir. Sürecin durumuna ek olarak işlenen kalite karakteristiğinin kritikliği de önemlidir. Süreç yeterli; fakat karakteristik kritikse firma bazı durumlarda sektörü gereği riski göze almak istemeyebilir. Sistem akışında gösterildiği gibi böyle durumlarda şema uygulama kararı süreç ve kalite mühendisliğine bırakılmıştır (bkz. Şekil 5).

Önerilen yöntemlere uygun olarak firmanın kendi yapacağı uygulamalarda kullanması için tüm örnek uygulamalar, uygulamaları başlatmak, sürdürmek ve sonuçlandırmak için yapılması gerekenler ve karşılabileceği öngörülen güçlüklerle karşı belirlenen çözüm yolları firmaya sunulmuştur.

### 3.3 Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA)

Oluşan hata türlerinin ve kök nedenlerinin incelenmesi, hata oluşumunun veya tekrarının önlenmesi ve sürekli iyileştirmenin gerçekleştirilmesi amacıyla, firmada oluşturulan bir ekip ile Hata Türü ve Etkileri Analizi (Stamatis, 1995) çalışmaları yapılmıştır. Firmaya ve bu çalışmanın amacına en uygun HTEA türü, Süreç HTEA olarak belirlenmiştir. Süreç HTEA süreçlerin tanımıyla başlar. Sonrasında süreçlerde meydana gelen hata türleri tanımlanır ve bu hata türünün sırasıyla etkileri, kök sebepleri ve var ise firmadaki kök sebeplerine yönelik uygulanan mevcut kontrol etkinlikleri belirlenir. Etkileri üzerinden şiddet, kök sebepleri üzerinden sıklık ve kök sebeplerine yönelik uygulanan mevcut kontrol etkinlikleri üzerinden de fark edilebilirlik, her biri için 1 ila 10 arasında puanlandırılır. Eğer herhangi bir sebeple ilgili bir kontrol etkinliği yoksa fark edilebilirlik en yüksek puanı, yani 10 alır. Daha sonra şiddet, sıklık ve fark edilebilirlik puanları çarpılarak Risk Öncelik Göstergesi (RÖG) hesaplanır. Her bir hata türü için hesaplanan RÖG değerlerinin büyüklüğüne göre iyileştirme ve kontrol etkinlikleri önerilerek, bu etkinliklere sorumlu kişiler atanır. Ayrıca, bu etkinlikler için hedef tamamlama zamanları belirlenir. Bu zamanlara gelindiğinde ise yeni şiddet, sıklık, fark edilebilirlik ve RÖG değerleri hesaplanır ve HTEA yöntemi tekrar izlenir.

Tüm bu bilgiler ışığında, Süreç HTEA'nın firmada uygulanabilmesi için öncelikle firmaya özgü formlar ve dokümanlar hazırlanmış, kurulan ekibe detaylı bir bilgilendirme sunumu yapılmış ve örneklerle açıklanmıştır.

HTEA çalışmasının başarılı olabilmesi ve uygulamadan daha doğru sonuçlar alınabilmesi için hata türlerinin kök sebeplerini tam olarak belirlemek ve

kullanılacak kontrol etkinliklerini önermek gerekir. Bu bağlamda, kök sebepleri bulmaya yardımcı olacak araçlardan biri olan balık kılıcı diyagramıyla ilgili HTEA ekibine bilgilendirici doküman dağıtılarak eğitim verilmiş ve bir hata türü üzerinden örnek çalışma yapılmıştır. Firmada görülen hata türleriyle ilgili kapsamlı bir çalışma yapılarak en çok görülen hata türleri altı başlık altında toplanmıştır. Bu altı hata türü için analizler, bir parça ve o parçaya ait süreç seçilerek örnek çalışma olması amacıyla yapılmıştır. Çalışmalar, haftalık toplantılar şeklinde iki ay boyunca yürütülmüştür.

Firmadaki örnek çalışma sonucunda, HTEA'nın ürün çeşitliliğine uygun olacak şekilde nasıl yapılacağı anlatılmış, hangi puanlandırma ölçeklerinin kullanılacağı belirlenmiş ve ilk iyileştirme projeleri başlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında başlatılan iyileştirme projelerine sorumlu kişiler atanarak hedef bitirme zamanları belirlenmiştir. Hedef bitirme zamanlarına gelindiğinde sorumlu kişilerin de olduğu toplantılar yoluyla yeni şiddet, sıklık, fark edilebilirlik ve Risk Öncelik Göstergesi (RÖG) değerleri belirlenerek çalışmaların sonuçları değerlendirilecektir. Hesaplanan yeni RÖG değerleri gözden geçirilerek daha fazla etkinliğe gerek olup olmadığına karar verilecektir. Eğer varsa HTEA takımı tarafından yeni öneriler yapılacaktır.

Örnek çalışmaların ardından, sürekliliğini sağlamak amacıyla firmaya detaylı bir bilgilendirme yapılmıştır. Firmada ekip ile beraber yürütülen örnek uygulamalar, tüm aşamaları ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Örnek çalışmanın gelişmeye açık yönleri anlatılmış, uygulama esnasında karşılaşılan ve karşılabileceği öngörülen güçlüklerle karşı belirlenen bazı çözüme yardımcı araçlar örneklerle anlatılarak firmaya tavsiye edilmiştir. Bunlara ek olarak, yapılan çalışmaların eksiksiz olduğundan emin olunabilmesi için bir Süreç HTEA kontrol listesi de verilmiştir. Bu kontrol listesinde HTEA'nın her aşaması için belli sorular sorulmakta ve bütün sorular evet olarak cevaplandırıldığı takdirde uygulamanın doğru şekilde yürütüldüğünden emin olunmaktadır.

### 3.4 Muayene Planlaması

Kalite kontrol biriminin kısıtlı ölçüm kapasitesini aşmadan hatalı ürünlerin müşteriye ulaşmasını önlemek için daha az maliyetli ve etkili bir ölçüm planına ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla oluşturulan iki aşamalı matematiksel model, kalite kontrol biriminin kapasitesini ürünlere ve ürünlerin geçirdiği operasyonlara en iyi şekilde paylaştırır; müşteriye ulaşan hatalı ürün oranını verilen bir üst sınırın altında tutar ve kaliteye ilişkin toplam maliyeti en küçükler. İlk aşamada verilen hata oranı için kalite kontrol biriminin zaman kapasitesi ürünlere paylaştırılır; ikinci aşamada her ürün için elde edilen kontrol zamanı ürünün operasyonlarına dağıtılır. Kalite kontrol biriminin zaman kapasitesi, kullanılan iki adet CMM adlı ölçüm aletinin günlük toplam çalışma saatidir.

#### 3.4.1 Birinci Aşama Modeli

Bu aşamada kurulan model bir ürün için gerekli toplam kontrol zamanını bulur. Amaç, bir ürün için müşteriye ulaşan hatalı ürün sayısının, belirli bir üst sınırı geçmemesi koşuluyla, o ürünün toplam ölçüm süresini en küçüklemektir. Bu model, üretim planında yer alan her ürün (parça) için ayrı ayrı çalıştırılarak her parçaya ayrılması gereken toplam ölçüm süresi bulunur.

Bir ürün için kurulan modelde kullanılan karar değişkeni ve parametreler Tablo 2 ve Tablo 3'te açıklanmıştır.

**Tablo 2.** Birinci Modelin Karar Değişkeni ve Tanımı

Karar değişkeni	Açıklama
$x$	Ürüne CMM'de ölçümü için gereken toplam süre

**Tablo 3.** Birinci Modelin Parametreleri ve Tanımları

Parametre	Açıklama
$ph$	Ürünün tüm operasyonlar sonunda hatalı olma olasılığı
$tu$	Ürünün CMM'de ölçülmesi için gereken birim ölçüm süresi
$\beta$	Hatalı bir ürünü muayene sonucu hatasız olarak sınıflandırma (tip 2 hata) olasılığı
$L$	Parti büyüklüğü
$H$	Müşteriye ulaşan hatalı ürün oranının üst sınırı

Tablo 2’de ve Tablo 3’te açıklanan karar değişkeni ve parametreler kullanılarak aşağıdaki matematiksel model oluşturulmuştur:

Enküçükle  $x$

Kısıt:

$$\frac{x}{tu} \times \beta \times ph + \left(L - \frac{x}{tu}\right) \times ph \leq H \times L$$

$$x \geq 0$$

Bu kısıtın sol tarafı, o parti içinde ölçümden sonra kalan hatalı sayısıdır: sırasıyla, o partinin ölçüm yapılan ürünlerinin içindeki hatasız olarak sınıflandırılmış hatalı sayısı ve ölçüm yapılmamış ürünlerin içindeki hatalı sayısının toplamıdır. Sağ taraf, o parti için kabul edilebilir hatalı sayısıdır.  $ph < H$  koşulunda problemin çözümü kolayca bulunur. Bu problem, örnek olarak alınan bir haftalık üretim planı üzerinden 11 ürün için ayrı ayrı çözülmüş ve Tablo 4’teki değerler bulunmuştur. Bu çözümlerde bütün ürünler için  $H=0,01$  alınmıştır.

Eğer gereken toplam ölçüm süresi kalite kontrol biriminin zaman kapasitesinden büyükse, hedeflenen

hata oranının üst sınırı gerçekçi değildir. Bu durumda var olan kapasite, gereken süreler oranında paylaştırılabilir; gerçekleşen hatalı oranı  $H$ ’den büyük olur.

### 3.4.2 İkinci Aşama Modeli

Bu aşamada amaç, toplam kalitesizlik maliyetini enküçüklerken birinci modelden elde edilen ölçüm süresini, ürünün geçirdiği operasyonlara dağıtarak, her operasyondan sonra yapılacak ölçüm süresini bulmaktır. Bu modelin oluşturulmasında Lee ve Unnikrishnan (1998)’dan esinlenilmiş ve bir operasyonda üretilen hatalı ürünlerin bir sonraki operasyonu da etkilemesi, çıkan toplam hatalı ürün sayısının müşteri isteklerine göre sınırlandırılması ve operasyonlardan uygun ve hatalı olarak ayrılan ürünlerin, operasyonlar sonrası yapılan ölçüm süresine bağlı olması gibi eklemeler yapılarak firmanın sistemine uyarlanmıştır. Burada üretim planının bir haftalık olduğu, ürünlerin her birinin bir hafta boyunca üretildikleri varsayılmıştır. Bu varsayımın oluşturabileceği olumsuzluklar ilerleyen bölümlerde tartışılmıştır. Kurulan doğrusal programlama modeli üç operasyonlu bir ürün için aşağıda verilmiştir.

**Tablo 4.** Birinci Modelden Elde Edilen Sonuçlar

Parça no.	Hatalı ürün üretme olasılığı ( $ph$ )	Parti büyüklüğü ( $L$ )	Birim ölçüm süresi (dk) ( $tu$ )	Tip 2 hata olasılığı ( $\beta$ )	Gerekli ölçüm süresi (dk) ( $x$ )
1A	0,00604	176	35	0,001	5134,9
2A	0,00155	175	100	0,001	6203,5
3A	0,00462	165	80	0,001	10332,5
4A	0,40400	208	80	0,001	16582,2
5A	0,03000	8	105	0,001	811,2
6A	0,01300	30	150	0,001	4149,7
7A	0,04800	46	60	0,001	2699,8
8A	0,12500	7	120	0,001	832,4
9A	0,14000	10	60	0,001	595,1
10A	0,00389	30	180	0,001	4007,8
11A	0,01000	150	70	0,001	9440,6

**Tablo 5.** İkinci Modelin Parametreleri ve Tanımları

Parametre	Açıklama
$ah_i$	Operasyon $i$ ’de uygun bir ürüne yanlışlıkla hurda deme olasılığı
$\beta h_i$	Operasyon $i$ ’de hurda bir ürüne yanlışlıkla uygun deme olasılığı
$ar_i$	Operasyon $i$ ’de uygun bir ürüne yanlışlıkla yeniden işlenmeli deme olasılığı
$\beta r_i$	Operasyon $i$ ’de yeniden işlenmesi gereken bir ürüne yanlışlıkla uygun deme olasılığı
$ph_i$	Operasyon $i$ ’de hurda ürün üretme olasılığı
$pr_i$	Operasyon $i$ ’de yeniden işlenmesi gereken ürün üretme olasılığı
$ic_i$	Operasyon $i$ ’den sonra yapılan muayene birim maliyeti
$rc_i$	Operasyon $i$ ’den sonra yapılan yeniden işleme birim maliyeti
$grc_i$	Operasyon $i$ ’den sonra fark edilmeyerek müşteriye taşınan yeniden işlenmesi gereken ürünün birim maliyeti
$mc_i$	Operasyon $i$ ’de birim üretim maliyeti
$mal$	Birim malzeme maliyeti
$gw$	Saygınlık maliyeti
$tu_i$	Operasyon $i$ ’den sonra yapılan muayene birim süresi
$pd$	Ürünün üretim günü sayısı
$ab$	1. operasyonda hatalı olarak üretilen ürünün 2. operasyonunda tekrar hata yapılması olasılığı, $p(D2   D1)$
$bc$	2. operasyonda hatalı olarak üretilen ürünün 3. operasyonunda tekrar hata yapılması olasılığı, $p(D3   D2)$
$ac$	1. operasyonda hatalı olarak üretilen ürünün 3. operasyonunda tekrar hata yapılması olasılığı, $p(D3   D1)$
$L$	Parti büyüklüğü
$x'$	Ürüne ayrılan toplam ölçüm süresi
$AOQL$	Bir partide müşterinin kabul ettiği en yüksek hatalı ürün oranı

\*: Firmada hurda bir ürüne yanlışlıkla yeniden işlenmeli deme olasılığı ile tersi durumun olasılığı çok küçük olduğundan bu olasılıklar dikkate alınmamıştır.

**Tablo 6.** İkinci Modelin Karar Değişkenleri ve Tanımları

Karar değişkeni	Açıklama
$T_i$	Operasyon $i$ ’ye ayrılan muayene süresi
$G_i$	Operasyon $i$ ’ye giren ve uygun olarak kabul edilen ürünlerin sayısı
$B_i$	Operasyon $i$ ’den çıkan ve hatalı olarak ayrılan ürünlerin sayısı
$NB_i$	Operasyon $i$ ’den fark edilmeden çıkan hatalı ürünlerin sayısı

En küçükle  $M1 + M2 + M3 + M4 + M5$

Kısıtlar:

Toplam hurda ürünü gereksiz yere işleme maliyeti:

$$M1 = \sum_{i=1}^3 \left\{ \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \times ph_i \times \beta h_i \times mc_{i+1} + \left\{ G_i - \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \right\} \times ph_i \times mc_{i+1} \right\} \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Hurda olan ancak } i \text{ operasyonundaki ölçüm hatasından dolayı tespit edilemeyen ürünü } (i+1) \text{ operasyonunda işleme maliyeti} + i \text{ operasyonunda hurda olan ve ölçülemediği için } (i+1) \text{ operasyonuna aktarılan ürünü işleme maliyeti}$$

Toplam muayene maliyeti:

$$M2 = \sum_{i=1}^3 \left\{ \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \times ic_i \right\} \quad (2)$$

Toplam hurda ürünün malzeme maliyeti:

$$M3 = \sum_{i=1}^3 \{ G_i \times ph_i \times mal \} \quad (3)$$

Toplam yeniden işleme maliyeti:

$$M4 = \sum_{i=1}^3 \left[ rc_i \times \left\{ \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \times pr_i \times [1 - \beta r_i] + \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \times [1 - pr_i - ph_i] \times ar_i \right\} + \right. \\ \left. grc_i \times \left\{ \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \times pr_i \times \beta r_i + \left( G_i - \left[ \frac{T_i}{tu_i} \right] \right) \times pr_i \right\} \right] \quad (4)$$

$$= \sum_{i=1}^3 \left\{ \begin{array}{l} i \text{ operasyonundan sonra yapılan yeniden işlemlerin maliyeti} + i \text{ operasyonundan} \\ \text{sonra yapılması gereken ancak fark edilmediği için müşteriye gidip geldikten} \\ \text{sonra yapılan yeniden işlemlerin maliyeti} \end{array} \right.$$

Hatalı ürünü müşteriye taşıma maliyeti:

$$M5 = \left[ \left\{ [ph_3 \times \beta h_3 + pr_3 \times \beta r_3] \times \left[ \frac{T_3}{tu_3} \right] + \left[ G_3 - \left[ \frac{T_3}{tu_3} \right] \right] \times [ph_3 + pr_3] \right\} \times \right. \\ \left. (1 - ac) \times (1 - bc) + NB_2 \right] \times gw \quad (5)$$

= [3. operasyondan sonra ölçüm hatasından kaynaklı olarak müşteriye taşınan hurda ve yeniden işlenmesi gereken ürün sayılarının beklenen değerleri + 3. operasyondan sonra kapasite kısıtı sebebiyle ölçülemediği için müşteriye taşınan hurda ve yeniden işlenmesi gereken ürün sayılarının beklenen değerleri + Operasyon 2'den fark edilmeden çıkan hatalı ürünlerin sayısı] × Saygınlık maliyeti

$$G_1 = L \quad (6)$$

1. operasyona giren ve uygun olarak kabul edilen ürün sayısı = Parti büyüklüğü

$$G_2 + B_1 = G_1 \quad (7)$$

2. operasyona uygun olarak giren ürün sayısı + 1. operasyondan hatalı olarak ayrılan ürün sayısı

= 1. operasyona giren ve uygun olarak kabul edilen ürün sayısı

$$G_3 + B_2 = G_2 \quad (8)$$

3. operasyona uygun olarak giren ürün sayısı + 2. operasyondan hatalı olarak ayrılan ürün sayısı = 2. operasyona giren ve uygun olarak kabul edilen ürün sayısı

$$G_i = G_{i-1} - \left\{ \left[ \frac{T_{i-1}}{tu_{i-1}} \right] \times ph_{i-1} \times [1 - \beta h_{i-1}] + \left[ \frac{T_{i-1}}{tu_{i-1}} \right] \times [1 - ph_{i-1} - pr_{i-1}] \times ah_{i-1} \right\} \quad (9)$$

Operasyon  $i$ 'ye giren ve uygun olarak kabul edilen ürünlerin sayısı = Operasyon  $i-1$ 'den çıkan ve uygun olarak kabul edilen ürünlerin beklenen sayısı

$$B_{i-1} = \left\{ \left[ \frac{T_{i-1}}{tu_{i-1}} \right] \times ph_{i-1} \times [1 - \beta h_{i-1}] + \left[ \frac{T_{i-1}}{tu_{i-1}} \right] \times [1 - ph_{i-1} - pr_{i-1}] \times ah_{i-1} \right\} \quad (10)$$

Operasyon  $i-1$ 'den çıkan ve hatalı olarak kabul edilen ürünlerin beklenen sayısı

$$T_1 + T_2 + T_3 \leq x' \times pd \quad (11)$$

Operasyonlara ayrılan muayene sürelerinin toplamı ≤ İlk modelden gelen ve ürüne ayrılan günlük ölçüm süresi × Üretim günü sayısı

$$[ph_1 \times \beta h_1 + pr_1 \times \beta r_1] \times \left[ \frac{T_1}{tu_1} \right] + \left[ G_1 - \left[ \frac{T_1}{tu_1} \right] \right] \times [ph_1 + pr_1] = NB_1 \quad (12)$$

Ölçüm hatasından kaynaklı olarak operasyon 1'den fark edilmeden çıkan hurda ve yeniden işlenmesi gerekli ürün sayılarının beklenen değerleri + Kapasite kısıtı sebebiyle ölçülemediği için operasyon 1'den fark edilmeden çıkan hurda ve yeniden işlenmesi gerekli ürün sayılarının beklenen değerleri = Operasyon 1'den fark edilmeden çıkan hatalı ürünlerin sayısı

$$[ph_2 \times \beta h_2 + pr_2 \times \beta r_2] \times \left[ \frac{T_2}{tu_2} \right] \times (1 - ab) + \left[ G_2 - \left[ \frac{T_2}{tu_2} \right] \right] \times [ph_2 + pr_2] \times (1 - ab) + \\ NB_1 = NB_2 \quad (13)$$

Ölçüm hatasından kaynaklı olarak operasyon 2'den fark edilmeden çıkan hurda ve yeniden işlenmesi gerekli ürün sayılarının beklenen değerleri + Kapasite kısıtı sebebiyle ölçülemediği için operasyon 2'den fark edilmeden çıkan hurda ve yeniden işlenmesi gerekli ürün sayılarının beklenen değerleri + Operasyon 1'den fark edilmeden çıkan hatalı ürünlerin sayısı = Operasyon 2'den fark edilmeden çıkan hatalı ürünlerin sayısı

$$[ph_3 \times \beta h_3 + pr_3 \times \beta r_3] \times \left[ \frac{T_3}{tu_3} \right] + \left[ G_3 - \left[ \frac{T_3}{tu_3} \right] \right] \times [ph_3 + pr_3] \times (1 - ac) \times \\ (1 - bc) + NB_2 \leq AOQL \times L \quad (14)$$

Ölçüm hatasından kaynaklı olarak operasyon 3'ten fark edilmeden çıkan hurda ve yeniden işlenmesi gerekli ürün sayılarının beklenen değerleri + Kapasite kısıtı sebebiyle ölçülemediği için operasyon 3'ten fark edilmeden çıkan hurda ve yeniden işlenmesi gerekli ürün sayılarının beklenen değerleri + Operasyon 2'den fark edilmeden çıkan hatalı ürünlerin sayısı ≤ Bir partide müşterinin kabul ettiği hatalı ürün sayısı

(12), (13) ve (14) numaralı kısıtlar, ürüne ayrılan ölçüm süresi ile müşteriye taşınan hatalı ürün sayısı arasındaki ters orantıyı kullanmaktadır.

Bu modeli çalıştırmak için 42 parametrenin tahmin edilmesi gerekmektedir. Ancak hem veri toplanmasının zorluğundan hem de verilerin doğruluğundan emin olunamadığından; parametreler üzerinde bir

sonraki adımda anlatılan varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar izleyen bölümde tartışılmıştır.

Duyarlılık Analizi: Modelden yararlı ve kullanılabilir sonuçlar ancak doğru verilerin modele girilmesiyle elde edilebilir. Özellikle, modelde kullanılan bazı parametrelerin değerleri bulunurken hassas tahminler

yapılması gerekir. Bazı parametreler olasılıklardır. Bu nedenle, 30 parametre üzerinde ana etkileri ve ikili etkileşimleri belirlemek için bir varyans analizi yapılarak bu parametrelerin modelden elde edilen toplam kalitesizlik maliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

30 parametrenin her biri için iki seviye seçildiğinden, tüm parametrelerin  $2^{30}$  farklı birleşimi için modellerin çalıştırılıp sonuçlarının alınması gereklidir. Bu sebeple, gruplama yöntemi kullanılmış; ilk 12 parametrenin ölçüm sistemiyle ve birbirleriyle ilişkili oldukları düşünülmüş, sonuçlarının da etkisinin birbirine paralel olması beklenmiştir. Bu varsayımına göre, ilk 12 parametre tek bir parametre olarak değerlendirilmiş ve model, kalan 18 parametreyle birlikte toplam  $2^{19}$  defa çalıştırılmıştır. Sonuç olarak bu 19 faktörün maliyet üzerindeki etkileri ANOVA yöntemiyle araştırılmıştır.  $p$  değerlerine göre sıralanarak aşağıdaki parametrelerin maliyet üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş, bu parametrelerin tahmin edilmesi sürecinde daha dikkatli olunması gerektiği belirlenmiştir.

Parametrelerin ana etkilerinin anlamlı olmasının yanı sıra ikili etkileşimlerinin de anlamlı olabileceği düşünülmüş, tekrar ANOVA yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda ana etkisi anlamlı olmayan parametrelerin, ikili etkilerinin de anlamlı olmadığı görülmüştür.

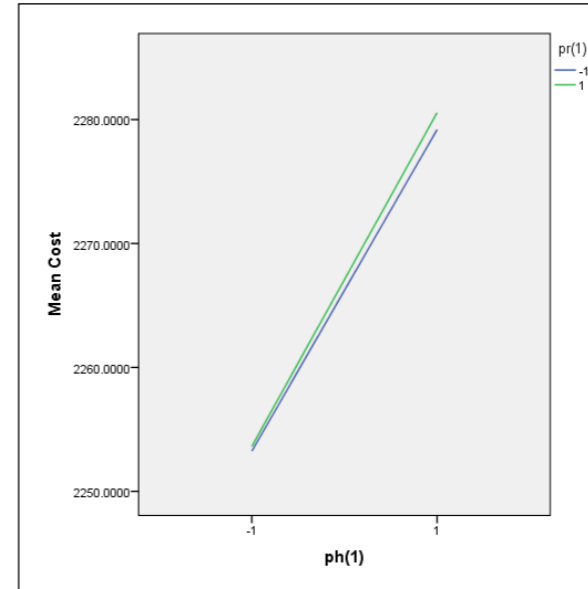
Ana etkileri ve ikili etkileşimleri anlamlı olanlarının bazılarının etkileşim grafikleri Şekil 8-12’de verilmiştir.

Model sonucu üzerindeki etkilerin görsel olarak analizi şu şekildedir:

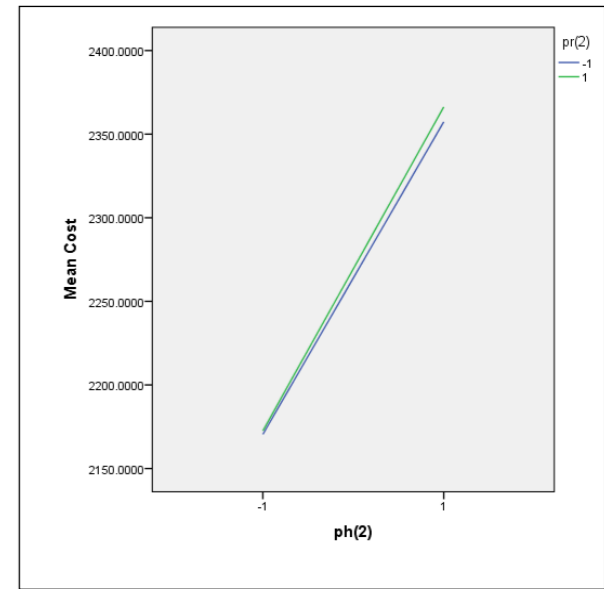
1. Operasyonların hurda ve yeniden işlenmesi gereken ürün üretme olasılıkları en yüksek değerdeyken, toplam maliyet en yüksek değerindedir (bkz. Şekil 8 ve Şekil 9).
2. Operasyon 2’nin hurda ürün üretme olasılığı yüksek değerdeyken, operasyon 1’in hurda ürün üretme olasılığının toplam maliyet üzerinde etkisi yoktur (bkz Şekil 10). Diğer taraftan, operasyon 2’nin hurda ürün üretme olasılığı düşük değerdeyken, operasyon 1’in hurda ürün üretme olasılığının düşük veya yüksek olması toplam maliyeti değiştirmektedir, yani toplam maliyet üzerinde etkisi vardır. Her ikisi de düşük değerindeyken, toplam maliyet en düşük değerindedir. Buradan da 2. operasyonun hurda ürün üretme olasılığını düşürmenin daha önemli olduğu sonucu çıkarılabilir. Ayrıca bu sonuç, modelin operasyonlar boyunca ürün üzerine katma değer eklenmesini göz önüne aldığına da bir göstergesidir.
3. Saygınlık maliyeti yüksek değerindeyken, toplam maliyet her zaman en yüksek değerindedir. Saygınlık maliyeti için yapılmış olan analizler

**Tablo 7.** Varyans Analizi Sonucunda Belirlenen Anlamlı Parametreler ve Tanımları

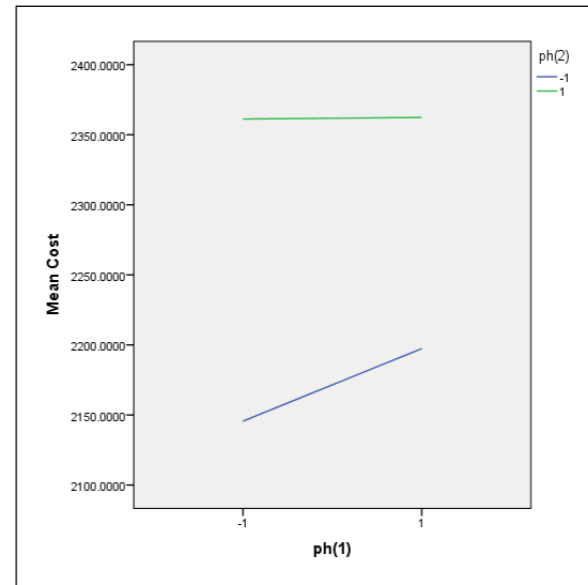
Parametre	Açıklama
$ah_i$	Operasyon $i$ ’de uygun bir ürüne yanlışlıkla hurda deme olasılığı
$\beta h_i$	Operasyon $i$ ’de hurda bir ürüne yanlışlıkla uygun deme olasılığı
$ar_i$	Operasyon $i$ ’de uygun bir ürüne yanlışlıkla yeniden işlenmeli deme olasılığı
$\beta r_i$	Operasyon $i$ ’de yeniden işlenmesi gereken bir ürüne yanlışlıkla uygun deme olasılığı
$ph_i$	Operasyon $i$ ’de hurda ürün üretme olasılığı
$pr_i$	Operasyon $i$ ’de yeniden işlenmesi gereken ürün üretme olasılığı
$rc_1$	Operasyon 1’den sonra yapılan yeniden işleme birim maliyeti
$rc_2$	Operasyon 2’den sonra yapılan yeniden işleme birim maliyeti
$grc_2$	Operasyon 2’den sonra fark edilmeyip müşteriye ulaşan yeniden işlenmesi gereken ürünün birim maliyeti
$gw$	Saygınlık maliyeti
$x'$	Ürüne ayrılan toplam ölçüm süresi



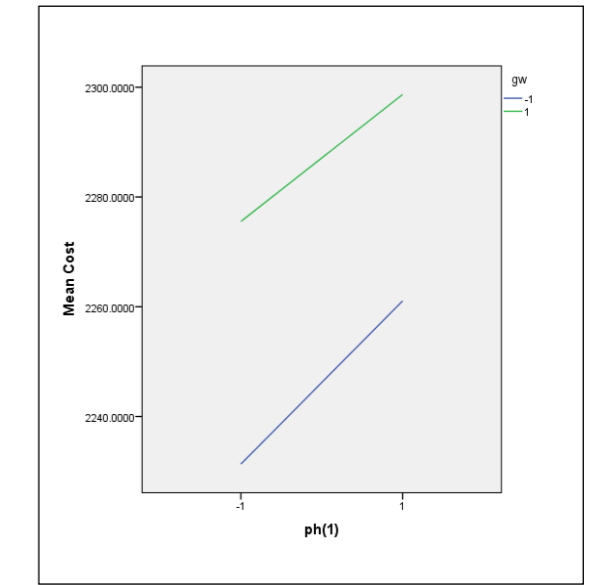
**Şekil 8.** Operasyon 1’in Hurda Ürün Üretme Olasılığı ( $ph(1)$ ) ve Operasyon 1’in Yeniden İşlenmesi Gereken Ürün Üretme Olasılığı ( $pr(1)$ ) Arasındaki Etkileşim Grafiği



**Şekil 9.** Operasyon 2’nin Hurda Ürün Üretme Olasılığı ( $ph(2)$ ) ve Operasyon 2’nin Yeniden İşlenmesi Gereken Ürün Üretme Olasılığı ( $pr(2)$ ) Arasındaki Etkileşim Grafiği



**Şekil 10.** Operasyon 1’in Hurda Ürün Üretme Olasılığı ( $ph(1)$ ) ve Operasyon 2’nin Hurda Ürün Üretme Olasılığı ( $ph(2)$ ) Arasındaki Etkileşim Grafiği

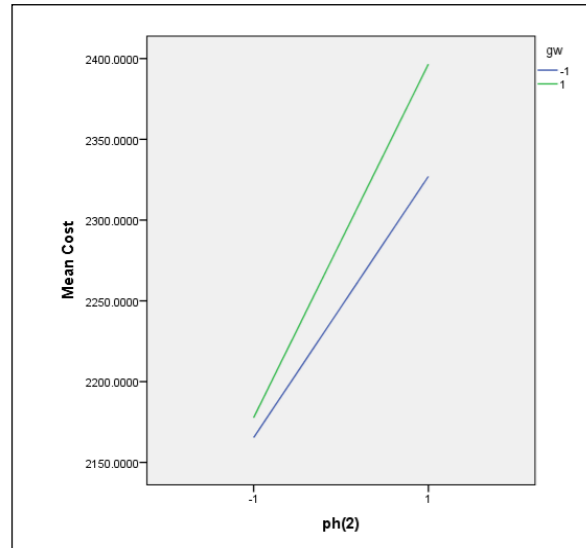


**Şekil 11.** Operasyon 1’in Hurda Ürün Üretme Olasılığı ( $ph(1)$ ) ve Saygınlık Maliyeti ( $gw$ ) Arasındaki Etkileşim Grafiği

şu şekilde genelleştirilebilir: Saygınlık maliyeti yüksek değerdeyken, toplam maliyet diğer para-

metrelere bağlı olmaksızın her zaman en yüksek değerdedir.





**Şekil 12.** Operasyon 2'nin Hurda Ürün Üretme Olasılığı ( $ph(2)$ ) ve Saygınlık Maliyeti ( $gw$ ) Arasındaki Etkileşim Grafiği

### 3.4.3 Sonuçların Yorumlanması

Modelde kullanılan amaç fonksiyonu, gerçekleştirilecek bir maliyet değildir. Farklı çözümler arasında karşılaştırma yapabilmek için kullanılan bir ölçü olarak düşünülmelidir. Modelin çıktılarını yorumlayabilmek için 4A numaralı parça örnek olarak seçilmiştir. Bu parçaya ait toplam ölçüm süresi,  $x'$  birinci modelden elde edilmiş ve ikinci modelin çıktılarını almak için

öncelikle Tablo 8'deki parametreler kullanılmıştır. Sonuçlar, Tablo 9'da gösterilmiştir.

Her operasyondan sonra ayrılan sürelerin bir muayene planına dönüştürülmesi için ölçüm sıklığı bulunmalıdır. Örneğin, eğer  $T_2$  değeri 1365,1 dakika olarak elde edilmişse ve parçanın 2. operasyonundan sonra gereken birim ölçüm süresi 15 dakika ise, 2. operasyon başlangıcından sonuna kadar  $1365,1 \div 15 \sim 91$  adet parça muayene edilebilecektir. Eğer parti büyüklüğü 200 ise, bu durumda üretilen her  $200 \div 91 \sim 3$  parçadan 1'i muayene edilebilir.

Her parçanın her operasyonu için ölçüm sıklığının belirlenmesi gerekliliği nedeniyle, modelin uygulanabilirliğinin azalmaması için Microsoft Office Excel'de Visual Basic kullanılarak bir arayüz programı hazırlanmıştır. Program, üretimdeki parçaların numaralarının ve parti büyüklüklerinin girilmesinin beklendiği bir ekranla başlamaktadır. Şekil 13'teki gibi bütün hücreler doldurulduktan sonra, süreçlerde iyileştirme olup olmadığı sorulmaktadır. Bu soru, diğer çözüm yöntemleriyle gelen olası iyileştirme çalışmalarından ileri gelmektedir. Güncelleme yapılmak isteniyor ya da seçilen parça numarası için veriler sistemde mevcut değil ise kullanıcı veri giriş ekranına yönlendirilir. Bu ekranda kullanıcının parça için gerekli parametreleri girmesi gerekir.

**Tablo 8.** İkinci Modelin Örnek Çözümünde Kullanılan Parametre Değerleri

Parametre	Örnek 4A parçası için değeri	Parametre	Örnek 4A parçası için değeri	Parametre	Örnek 4A parçası için değeri
$ah_1^*$	0,0005	$ph_3^*$	0,00005	$x'^*$	683,8781
$ah_2^*$	0,0005	$pr_1^*$	0,0001	$AOQL$	0,025
$ah_3^*$	0,0001	$pr_2^*$	0,00028	$ic_1$	6,4675
$\beta h_1^*$	0,0008	$pr_3^*$	0,000005	$ic_2$	6,4675
$\beta h_2^*$	0,0008	$rc_1^*$	1,59	$ic_3$	6,4675
$\beta h_3^*$	0,001	$rc_2^*$	0,8268	$mc_1$	23,32
$ar_1^*$	0,00015	$rc_3^*$	0,233	$mc_2$	15,688
$ar_2^*$	0,00015	$grc_1^*$	4,77	$mc_3$	8,755
$ar_3^*$	0,00001	$grc_2^*$	2,4804	$tu_1$	15
$\beta r_1^*$	0,001	$grc_3^*$	0,699	$tu_2$	15
$\beta r_2^*$	0,001	$ab^*$	0,001	$tu_3$	15
$\beta r_3^*$	0,0006	$bc^*$	0,0001	$mal$	65
$ph_1^*$	0,001	$ac^*$	0,00005	$pd$	7
$ph_2^*$	0,0028	$gw^*$	75	$L$	200

\*: ANOVA sonucunda anlamlı

**Tablo 9.** İkinci Modelin Örnek Çözümünden Elde Edilen Sonuçlar

1. operasyondan sonrasına ayrılan süre ( $T_1$ )	2. operasyondan sonrasına ayrılan süre ( $T_2$ )	3. operasyondan sonrasına ayrılan süre ( $T_3$ )	Toplam maliyet
3002,5 dk.	1365,1 dk.	419,6 dk.	2202,7 TL

**Şekil 13.** Arayüz Parça Büyüklüğü ve Parti Numarası Giriş Ekranı

**Şekil 14.** Arayüz Sonuç Ekranı

Program sonlandığında kullanıcı, Şekil 14'te örnek 4A parçası için çıkarılmış olan muayene planına benzer bir plan ile karşılaşır. Muayene planı, her operasyondan sonraki ölçüm sıklıklarını kullanıcıya sunmaktadır. Örneğin, 4A numaralı parçanın B operasyonundan sonra 3 parçada 1 ölçülmesi gerektiğini belirtmektedir.

Oluşturulan model, müşteriye gönderilen hatalı ürün sayısını göz önünde bulundurmaktadır. Ancak, kapasite kısıtından ötürü her zaman müşterinin talep ettiği oranının karşılanamaması ihtimaline karşı firmaya iki öneride bulunulmuştur. İlki bazı ölçümlerin operatörlere atanması iken; ikincisi ise kapasite arttırımı üzerine yatırım yapılması gerekliliği olarak belirlenmiştir.

### 3.4.4 Modelin Gelişime Açık Yönleri

Modelin oluşturulması aşamasındaki varsayımlardan ve firmanın kendi üretim karakteristiklerinden ötürü modelin gelişime açık bazı yanları belirlenmiştir. Bunlardan ilki, parçaların üretim başlangıç ve bitiş tarihlerinin çok farklılık göstermesinden ötürü yapılan ürün yelpazesinin bir hafta boyunca değişmeyeceği varsayımdır. Ancak, kayar ufuk yöntemi ile modelin yürütme süresinin kısa olmasından da faydalanılarak, doğru sonuçlar elde edilebilir. Girecek parametre sayısının fazlalığı ise modelin faydalı kullanımını için bir engeldir; fakat yapılan varyans analiziyle önemli parametreler belirlenmiş, böylece bu sorun bir ölçüde giderilmiştir. Öte yandan, modelde sadece CMM ölçüm süreleri parçalara atanmış; operatör ölçümleri hesaba katılmamıştır. Bunun sebebi akış diyagramında da anlatıldığı üzere, bazı parçalar için şema uygulama kararı alınabilmesidir. Bu nedenle, operatörleri özgür bırakmanın çözüm yaklaşımlarının bütününün işleyişi bakımından daha doğru olduğuna karar verilmiştir. Son olarak, parçaların üç operasyonlu olduğu varsayımı yapılmıştır. Buna uymayan durumlar için modelin uyarlanması gereklidir.

### 3.5 Kabul Örnekleme

#### 3.5.1 Ara Muayene

Şema uygulamaları sisteme göre gerekli görülmedikçe ara muayeneler yapılarak süreçlerin kontrolünün sağlanması önerilmiştir. Muayene planlamasıyla elde edilen çıktılar doğrultusunda ara muayeneler için kabul örnekleme planının yenilenmesi gereke-

bilmektedir. Eğer muayene planında belirtilen ölçülebilir parça sayısı, müşterinin beklediği ortalama kalite seviyesini sağlamak için yeterli değil ise, düşük hacimli üretimler için geliştirilmiş sürekli numune planı kullanılarak kalite kontrol birimi kapasitesi gözetenilen, sürecin müşteri isteklerine uygun olarak izlenmesi sağlanır. Sürekli numune alma planına göre yapılması gereken ölçüm sayısı belirlendikten sonra kapasiteyi aşan ölçümler operatöre aktarılabilir. Bu durumun sıkça görüldüğü durumda ise, firmanın kalite kontrol birimine yatırım yapması önerilmiştir.

### 3.5.2 Giriş ve Son Muayene

Kabul örnekleme yöntemi kullanılarak yapılabilecek diğer muayeneler, giriş ve son muayene olarak belirlenmiştir. Ham maddeler aynı kütük malzemeden kesildiği için aynı kalite seviyesine sahiptir. Dolayısıyla, giriş muayenede %100 kontrol üretime bir değer katmaktadır. Son muayene öncesinde ise, önerilen sistem sayesinde üretim sırasında gerekli kontroller sağlanacaktır. Dolayısıyla, hem giriş hem son muayenede kabul örnekleme planı uygulanması yeterli görülmüştür. Bu sebeplerden ötürü kabul örneklemesine en uygun yöntem olarak öncesinde de kullanılan ANSI/ASQC Z1.4 standardı seçilmiştir. Bu bağlamda, Microsoft Office Excel Makro yardımıyla, giriş muayenede kullanılmak üzere belirlenen kabul seviyelerine göre geçmiş verileri tutarak kullanıcıya uygun bir kabul örnekleme planı çıkaran ve geçmiş verileri tutan bir arayüz hazırlanmıştır.

## 4. SONUÇ

Bu çalışmada, düşük hacimli üretim yapan bir havacılık firmasına uygun etkin bir kalite kontrol ve iyileştirme sistemi tasarlanmıştır. Bu kalite kontrol sistemini Ölçüm Sistemi Analizi, İstatistiksel Süreç Kontrol Şemaları, Hata Türü ve Etkileri Analizi, matematiksel modele dayanan Muayene Planlaması ve Kabul Örnekleme oluşturmuştur. Sistemi oluşturan çözüm yaklaşımlarının ilişkilendirildiği akış diyagramı da projenin önemli çıktılarından biridir. Çözüm yaklaşımlarından ilki Ölçüm Sistemi Analiziyle etkili ve doğru ölçümün sağlanması amaçlanmıştır. Süreçleri kararlı ve kontrol altında tutmaya yardımcı olacak çözüm yaklaşımı ise İstatistiksel Süreç Kontrol Şemalarıdır. Kontrol Şemalarının yanında, oluşan ve oluşması öngörülen hata türlerini inceleyerek ve bunlara karşı önleyici etkinlikler yaparak hataların oluşmadan engellenmesine yardımcı olması amacıyla firmaya önerilen HTEA çalışması çözüm yaklaşımlarının bir başka parçasıdır. Düşük maliyetli etkin ölçümün hedeflendiği, bir matematiksel model yardımıyla oluşturulan Muayene Planlaması da yapılmıştır. Son olarak, giriş ve son muayenede %100 ölçüm yapılmadan kalite kontrolün sağlanabilmesinde en etkili çözüm olduğuna karar verilen Kabul

Örneklemeyle ilgili çalışmalar yapılmış ve bir arayüz hazırlanarak firmaya sunulmuştur.

Tasarlanan kalite kontrol sisteminin parçalarını oluşturan çözüm yaklaşımları ve bunların akış diyagramı üzerinde birbirleriyle etkileşimi, hazırlanan el kitaplarıyla firmaya ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Sistemin geniş çerçevede toplam kalitenin insan kaynakları eğitimi, yalın üretim ve tasarım yoluyla kalite gibi diğer yaklaşımları da içerecek şekilde iyileştirilmesiyle ilgili önerilere yer verilmiştir. Bu sistem firma yetkilileri tarafından da etkili ve yararlı bulunmuş, her bir grup üyesine başarı sertifikası verilmiştir. Önerilen sistem, benzer özelliklere sahip birçok firma tarafından uyarlanarak kullanılabilir.

Üretim sistemine odaklanan bu çalışmanın devamında, geliştirilen kalite kontrol sistemini bütünleyici ve onun etkinliğini artıran diğer kalite kontrol yaklaşımları değerlendirilmelidir. Bunlardan süreç tasarımlarının eniyilenmesi, çalışanlara kalite iyileştirme bilgi ve becerilerini artırmak üzere eğitim verilmesi ve proje temelli iyileştirme etkinliklerinin başlatılması öncelikli yaklaşımlar olarak önerilebilir.

## TEŞEKKÜR

Başta firma danışmanımız Ozan Hacıbekiroğlu ve firma Genel Müdür Yardımcısı Güner Koçak olmak üzere bu çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen Küçükpazarlı Havacılık'ın tüm çalışanlarına her türlü yardımları için teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. Küçükpazarlı Havacılık 2012. Hakkımızda, <http://www.kucukpazarli.com.tr/aviation/tr/>.
2. Bothe, D. R. 1996. SPC for Short Production Runs Reference Handbook, International Quality Institute, Cedarburg, Wisconsin.
3. Celano, G., Castagliola, P., Trovato, E., Fichera, S. 2010. "Shewhart and EWMA t Control Charts for Short Production Runs", Quality and Reliability Engineering International, 27, 313-326.
4. Doğanç, H. 2004. "A Prototype Software to Select and Construct Control Charts for Short Runs", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
5. Doty, L. A. 1997. SPC for Short Run Manufacturing, Hanser Gardner Publications, Cincinnati, Ohio.
6. Köksal, G., Taşeli, A., Dolgun, L.E., Batmaz, İ. 2012. "The Effect of Inspection Error on Quality and Producer Losses: The Case of Nominal-The-Best Type Quality Characteristic And Rework", European Journal of Industrial Engineering dergisinde yayımlanacak.
7. Lee, J., Unnikrishnan, S. 1998. "Planning Quality Inspection Operations in Multistage Manufacturing Systems With Inspection Errors", International Journal of Production Research, 36(1), 141-155.
8. Minitab İstatistik Yazılımı. 2012. Versiyon 16.
9. Montgomery, D. C. 2009. Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley and Sons, New York.
10. Stamatis, D. H. 1995. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory and Execution, American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee.
11. Şahinsev, G. 2002. "Development and Application of Control Charts for an Aircraft Wing Tip Part Production Process", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
12. Wheeler, D. J. 1991. Short Run SPC, SPC Press, Knoxville, Tennessee.