

## OPTİMUM TOLERANSLARIN BELİRLENMESİNDE CEVAP YÜZEYİ YÖNTEMLERİNİN KULLANILMASI ÜZERİNE BİR İNCELEME<sup>1</sup>

Cenk ÖZLER<sup>2</sup>

### ÖZET

*Bir montajı oluşturan bileşenlerin toleranslarının belirlenmesi, kalite mühendisliği içerisinde önemli bir yere sahiptir. Son yıllarda, optimum bileşen toleranslarının belirlenmesinde istatistiksel yöntemlerin kullanımı artmıştır. Bu çalışmada istatistiksel toleranslandırma ile ilgili olarak, bileşen ve montaj toleransları arasındaki eklenebilir ve olasılıksal ilişkilerin tanımlamaları yapılmış, cevap yüzeyi yöntemlerinin eklenebilir ilişkiler için optimum toleransların belirlenmesindeki kullanımı ile ilgili geliştirilen yaklaşımlar gözden geçirilmiştir. Toleranslar arasındaki olasılıksal ilişkilerin dikkate alınarak, cevap yüzeyi yöntemleri ile optimum toleransların bulunmasına ilişkin bir örnek verilmiş ve sonuçlara bağlı olarak olasılıksal ilişkilerin eklenebilir ilişkilere göre avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.*

*Anahtar Kelimeler:* İstatistiksel toleranslandırma, cevap yüzeyi yöntemleri, istatistiksel kalite kontrolü.

### 1. Giriş

Bir çok seri üretimde ürünler, değişik süreçlerde veya makinalarda imal edilen veya işlenen parça veya bileşenlerin montajı ile oluşmaktadır. Bu da aynı parçaların birbirleri ile aynı ebatta olmasını gerektirmektedir. Diğer taraftan, makineler, aparatlar ve kalıplar, çevre koşulları, hammaddeler ve çalışanlar tarafından ortaya çıkartılan kaçınılmaz değişkenlikler nedeni ile, kalite karakteristiklerinde (uzunluk, çap, kalınlık, mukavemet vs.) de her zaman değişkenlikler olacaktır. Kaçınılmaz değişkenliklerin varlığı ve parçaların birbirleri yerine kullanılabilir olma zorunluluğu, herhangi bir kalite karakteristiğinin değişkenliği için bazı sınırların belirlenmesini gerektirmektedir. İzin verilen değişkenliğe *tolerans* denilmektedir. Genellikle bitmiş montaj / ürünün kalite karakteristikleri üzerindeki toleranslar, doğrudan müşteri tarafından veya müşteri tarafından belirlenmiş fonksiyonellik şartlarına bağlı olarak tasarım mühendisleri tarafından belirlenmektedir. İzleyen önemli adım ise, montaj toleranslarını, montajı oluşturan bileşenlerin kalite karakteristikleri arasında tahsis etmektir. Bu çalışmada bileşenlere tolerans tahsis etmek için geliştirilmiş olan bazı istatistiksel yöntemler açıklanmıştır. Bu

<sup>1</sup> 5. İstatistik Günleri Sempozyumu, 24 – 26 Mayıs 2006, Antalya’da sunulmuş bildiri.

<sup>2</sup> Yrd. Doç. Dr. DEÜ İİBF Ekonometri Bölümü İstatistik Anabilim Dalı.

yöntemler, toleranslar arasındaki ilişkilerin (eklenebilir ve olasılıksal) belirlenmesinde ve maliyet-tolerans ilişkilerinin modellenmesi ve optimizasyonunda kullanılmaktadır. Maliyet-tolerans ilişkilerinin modellenmesi ve optimizasyonunda, esas olarak üretim süreçlerinin optimizasyonunda kullanılan istatistik ve matematik tekniklerin bir bütünü olan *cevap yüzeyi yöntem bilimi (response surface methodology)* yaklaşımı kullanılarak optimum bileşen toleranslarının nasıl bulunabileceği ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Ardından toleranslar arasındaki ilişkilerin olasılıksal olarak ifade edildiği bir montaj için cevap yüzeyi yöntemleri kullanılarak optimum toleransların nasıl bulunabileceği bir örnek uygulama ile gösterilmiş ve eklenebilir ilişkilere göre avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

## 2. İstatistiksel Toleranslandırma ile İlgili Ön Bilgiler

$k$  adet ( $k \geq 2$ ) bileşenden oluşan montajları ele alalım. Bileşen  $i$ 'nin kalite karakteristiği  $X_i$  olsun. Bu karakteristiğin nominal değer daha iyidir (nominal the best) tipinde olduğunu varsayalım.  $X_i$ 'nin üst ve alt spesifikasyon limitleri sırasıyla  $U_i$  ve  $L_i$  olsun.

Montaj kalite karakteristiği  $X$  ile gösterilsin ve  $X_i$ 'lerin bir fonksiyonu olsun:

$$X = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (1)$$

İlk olarak yalnızca  $X_i$ 'lerin doğrusal fonksiyonlarını ele alalım. Diğer bir deyişle,

$$X = X_1 \pm X_2 \pm \dots \pm X_k \quad (2)$$

olsun.  $X$ 'in üst ve alt spesifikasyon limitleri sırasıyla  $U$  ve  $L$  olsun. Bu duruma örnek olabilecek üç ayrı vaka, Şekil 1a, b, ve c ile verilmiştir. Şekil 1a'daki mil ve kovan montajında, kovanın iç çapı ve milin dış çapı *bileşen karakteristikleridir* ve bu çaplar arasındaki boşluk ise *montaj karakteristiği*dir.  $X_1$  ve  $X_2$  sırasıyla kovanın iç çapı ve milin dış çapını temsil etsin.  $X$  ise bu iki çap arasındaki fark olsun. Buradan montaj karakteristiği ile bileşen karakteristikleri arasındaki ilişki,

$$X = X_1 - X_2 \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 1b ile verilen montajda bileşen karakteristikleri, parça boyları olsun ve  $X_1$ ,  $X_2$  ve  $X_3$  ile temsil edilsin. Ayrıca  $X$ , montajın uzunluğu olsun. Karakteristikler arasındaki ilişki,

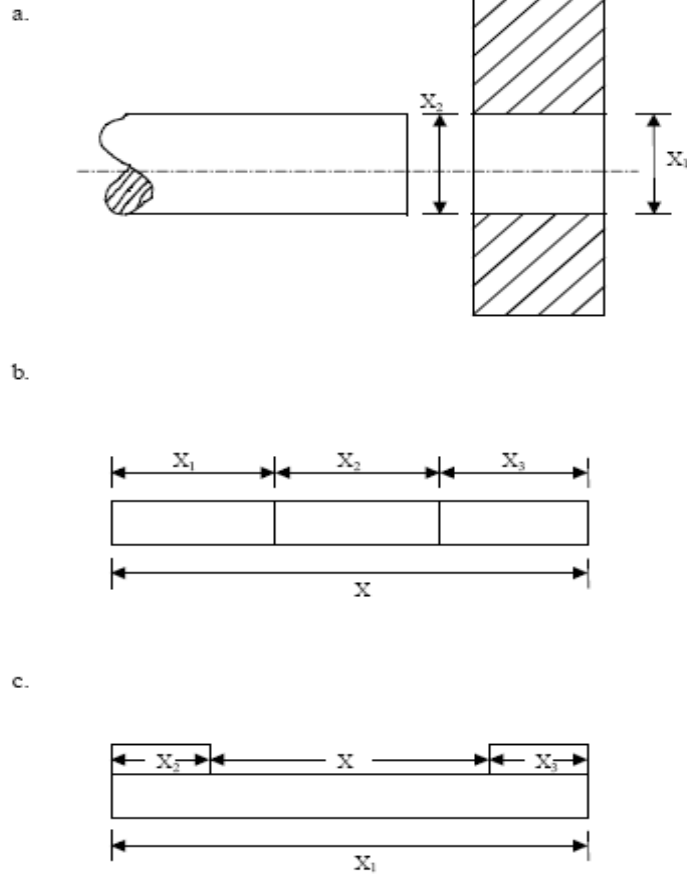
$$X = X_1 + X_2 + X_3 \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Son olarak, Şekil 1c'de montaj karakteristiği  $X$  ile bileşen karakteristikleri arasındaki ilişki,

*Optimum Toleranslar ve Cevap Yüzeyi*

$$X = X_1 - X_2 - X_3 \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Genel olarak bütün bu ilişkiler (2) eşitliği ile temsil edilebilir.



Şekil 1. Bazı montaj örnekleri.

### 3. Eklenebilir ilişkiler

Tolerans, üst ve alt spesifikasyon limitleri arasındaki farktır.  $X_i$ 'nin toleransı  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ),  $X$ 'in toleransı  $T$  olsun. Buradan,

$$T_i = U_i - L_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

$$T = U - L \quad (7)$$

yazılabilir. Şekil 1c'deki montaj için,  $T$  ve  $T_1, \dots, T_k$  arasındaki ilişkiler (5) eşitliği kullanılarak türetilir.  $X$ 'in maksimum izin verilen değeri  $U$ ,  $X_1$  maksimum izin verilen değerinde,  $X_2$  ve  $X_3$  de minimum izin verilen değerlerinde olduğunda ortaya çıkacaktır. Diğer bir deyişle,

$$U = U_1 - L_2 - L_3. \quad (8)$$

benzer şekilde,  $X$ 'in minimum izin verilen değeri  $L$ ,  $X_1$  minimum izin verilen değerinde,  $X_2$  ve  $X_3$  de maksimum izin verilen değerlerinde olduğunda ortaya çıkacaktır. Diğer bir deyişle,

$$L = L_1 - U_2 - U_3. \quad (9)$$

(8) ve (9) nolu eşitlikler, (7) eşitliğinde yerine konulursa

$$\begin{aligned} T &= (U_1 - L_2 - L_3) - (L_1 - U_2 - U_3) \\ &= (U_1 - L_1) + (U_2 - L_2) + (U_3 - L_3) \\ &= T_1 + T_2 + T_3 \end{aligned} \quad (10)$$

yazılabilir. Bu örnekten hareketle genelleme yapılabilir ve herhangi bir doğrusal fonksiyon  $X = X_1 \pm X_2 \pm X_3 \pm \dots \pm X_k$ , için

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_k \quad (11)$$

yazılabilir. Bu eşitlikteki toleranslar arasındaki ilişkiye *eklenebilir ilişki* adı verilmektedir (Chandra, 2001). Tasarım mühendisi,  $k$  bileşenin toleranslarını verilmiş bir  $T$  için eklenebilir ilişki kullanarak ve bileşenlerin işleme maliyetine bağlı olarak dağıtabilir.

#### 4. Olasılıksal İlişkiler

Bu tür ilişkiler, bileşen ve montaj karakteristiklerinin olasılıksal (dağılım) özelliklerine bağlı olduğu için, aşağıdaki varsayımları yapmak gerekmektedir (Chandra, 2001):

1.  $X_i$ 'ler birbirlerinden bağımsızdırlar.
2. Monte edilecek bileşenler rastgele seçilir.
3.  $X_i$ 'ler ortalaması  $\mu_i$  ve varyansı  $\sigma_i^2$  olan normal dağılım göstermektedir.
4.  $X_i$ 'lerin ortalaması  $\mu_i$ 'ler, toleransların ortasındadır. Diğer bir deyişle,

$$\mu_i = \frac{(U_i + L_i)}{2}. \quad (12)$$

**Tablo 1.** Standart Normal Eğri Altındaki Alanlar ve Karşılık Geldiği  $C_p$  Değerleri

Aralık	Aralığın Yüzdesi	Aralığın Dışının Yüzdesi	Aralığın Dışındaki Milyonda Parça Sayısı	$C_p$ Değeri
$(\mu - 1\sigma) - (\mu + 1\sigma)$	68,26	31,74	317400	0,33
$(\mu - 2\sigma) - (\mu + 2\sigma)$	95,44	4,56	45600	0,67
$(\mu - 3\sigma) - (\mu + 3\sigma)$	99,73	0,27	2700	1
$(\mu - 4\sigma) - (\mu + 4\sigma)$	99,99366	0,00634	63,4	1,33
$(\mu - 5\sigma) - (\mu + 5\sigma)$	99,999426	0,000574	0,574	1,67
$(\mu - 6\sigma) - (\mu + 6\sigma)$	99,999998	0,000002	0,002	2

Tolerans belirlemede dikkate alınması gereken bir konu da, ürünün üretileceği üretim sürecinden beklenen süreç yeteneğidir. (12) eşitliği sağlandığında kullanılabilecek olan bir süreç yetenek indeksi  $C_p$  'dir:

$$C_p = \frac{U - L}{6\sigma} \quad (13)$$

Yukarıdaki varsayımların sağlandığı durumlar için değişik  $C_p$  değerlerine karşılık gelen milyonda hatalı parça sayıları Tablo 1 ile verilmiştir.  $C_p$  indeksinin değerinin, montaj ve bileşen karakteristikleri için, örneğin 1,67 olması isteniyorsa, toleranslar,

$$U - L = (1,67)(6\sigma) = 10\sigma \text{ ve} \quad (14)$$

$$U_i - L_i = (1,67)(6\sigma_i) = 10\sigma_i \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (15)$$

şartlarını sağlamalıdır. (14) ve (15) eşitliklerinden,

$$\sigma_i^2 = \left(\frac{T_i}{10}\right)^2, \quad i = 1, 2, \dots, k \text{ ve} \quad (16)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{T}{10}\right)^2 \quad (17)$$

yazılabilir. Yukarıda verilen dört varsayıma göre montaj karakteristiğinin ortalaması ve varyansı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\mu = \mu_1 \pm \mu_2 \pm \dots \pm \mu_k \quad (18)$$

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_k^2 \quad (19)$$

(16), (17) nolu eşitlikler (19) nolu eşitlikte yerine konulduğunda,

$$\left(\frac{T}{10}\right)^2 = \left(\frac{T_1}{10}\right)^2 + \left(\frac{T_2}{10}\right)^2 + \dots + \left(\frac{T_k}{10}\right)^2 \quad (20)$$

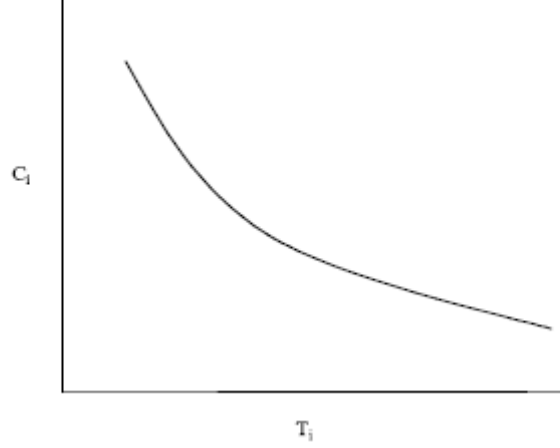
veya,

$$T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2 + \dots + T_k^2} \quad (21)$$

yazılabilir. (21) nolu eşitlik ile verilen ilişkiye *olasılıksal ilişki* adı verilmektedir (Chandra, 2001). Tasarım mühendisi, verilmiş toplam tolerans  $T$  için, bileşenlerin işleme (imalat) maliyetlerine bağlı olarak, eşitlik (21)'i sağlayacak şekilde bileşen toleranslarını belirleyebilir.

##### **5. Optimum Toleransların Cevap Yüzeyi Yöntemleri Kullanılarak Belirlenmesi**

Bileşenlerin optimum toleranslarının bulunmasında kullanılan yöntemlerin çoğu, imalat maliyetleri ile bileşen toleransları arasındaki fonksiyonel ilişkiyi temsil etme amacı ile geliştirilmiş bazı maliyet-tolerans fonksiyonlarının kullanıldığı bir doğrusal olmayan optimizasyon probleminin çözümüne dayanmaktadır. Genel olarak tolerans ile maliyet arasındaki ilişki Şekil 2'de verildiği gibi gösterilebilir. Kullanılmakta olan maliyet-tolerans modellerinin bir özeti Kim ve Cho (2000) tarafından verilmiştir.



Şekil 2. Maliyet-Tolerans İlişkisi

Kim ve Chou (2000), tolerans belirleme problemini aşağıdaki gibi formüle etmiştir:

Minimize

$$\sum_{j=1}^n f_j(T_j)$$

Kısıtlar:

$$T_1 + T_2 + \dots + T_k \leq T$$

$$l_i \leq T_i \leq u_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (\text{tasarım parametresi kısıtları}) \quad (22)$$

Burada,  $l_i$  ve  $u_i$ , ürünün fonksiyonellik şartlarını sağlayabilmesi için bileşen toleransları için belirlenmiş alt ve üst sınırlarını göstermektedir.  $f_j(T_j)$  ise  $j$ 'inci bileşen için maliyet tolerans fonksiyonunu göstermektedir.

Literatürde, bazı maliyet-tolerans modelleri önerilmekle beraber, bir çok endüstriyel problemde, her bir bileşen için maliyet-tolerans ilişkisinin gerçek fonksiyonel yapısı bilinmemektedir. Bu nedenle, Jeang (1999) ve Kim and Cho (2000), tolerans belirleme problemine istatistiksel bir çözüm yöntemi olarak, *cevap yüzeyi yöntembiliminin* (response surface methodology) kullanımını önermiştir. Cevap yüzeyi yöntembilimi, bir çıktı değişkeni ile bir kaç girdi değişkeni arasındaki ilişkilerin modellenmesinde kullanılan istatistiksel ve matematiksel tekniklerin bir kombinasyonudur. Cevap yüzeyi yaklaşımında, çıktı değişkeni ile girdi değişkenleri arasındaki bilinmeyen,

muhtemelen oldukça karmaşık yapıdaki gerçek ilişkiye birinci veya ikinci dereceden bir polinom ile yaklaşım yapılmaktadır. Cevap yüzeyi yöntembilimi ile ilgili detaylar Box ve Draper (1987), Khuri ve Cornell (1987) ve Myers ve Montgomery (1995)'te bulunmaktadır. Birinci derece cevap (çıkıtı) fonksiyonu  $\hat{y}$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i \quad (23)$$

Burada,  $\hat{\beta}_0$  ve  $\hat{\beta}_i$ , en küçük kareler yöntemi ile tahminlenmiş model katsayıları ve  $x_i$ 'ler kodlanmış girdi değişkenleridir. Faktöriyel veya kesirli faktöriyel tasarımlar gibi birinci derece cevap yüzeyi tasarımları kullanılarak, belirlenecek noktalarda yapılan deneylerin sonuçlarına bağlı olarak tahminlenmiş katsayılar elde edilebilir. Bundan başka, ikinci derece cevap fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j} \sum \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (24)$$

Burada  $\hat{\beta}_{ij}$  ikinci derece terimler için katsayılarıdır ( $i = j$  için karesel terimlerin ve  $i \neq j$  için etkileşim terimlerinin katsayılarıdır.). *Box-Behnken* veya *merkezi bileşik tasarımlar (central composite designs)* gibi ikinci derece cevap yüzeyi tasarımları, tahminlenmiş katsayıların bulunması için elde edilecek verilerin toplanması amacı ile kullanılabilir.

Kim and Cho (2000)'nin çalışmasında  $\hat{y}$  ve  $x_i$ 'ler, sırasıyla imalat maliyeti ve bileşen toleransları  $T_i$ 'lerin kodlanmış biçimi olarak alınmıştır. Kodlama formülü ise aşağıdaki gibidir:

$$x_i = \frac{2T_i - (u_i + l_i)}{u_i - l_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (25)$$

Buradan hareketle, gerçek maliyet fonksiyonuna bir ikinci derece polinom ile yaklaşmak istediğimizde, (22) nolu eşitlik ile verilen tolerans optimizasyonu problemi yeniden aşağıdaki gibi yazılabilir (Kim and Cho, 2000):

Minimize

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j} \sum \hat{\beta}_{ij} x_i x_j$$



kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^k \frac{x_i(u_i - l_i) + (u_i + l_i)}{2} \leq T$$

$$-1 \leq x_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, k. \text{ (mühendislik kısıtlamaları)} \quad (26)$$

Kim ve Cho (2000) tarafından verilen bu optimizasyon probleminde, toleranslar arasındaki eklenebilir ilişkiler dikkate alınmıştır. Eğer uygulayıcılar eklenebilir ilişkiler yerine olasılıksal ilişkileri dikkate almak isterse,

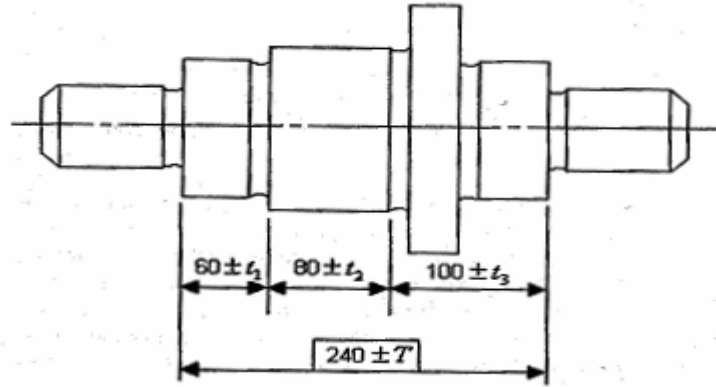
$$\sum_{i=1}^k \frac{x_i(u_i - l_i) + (u_i + l_i)}{2} \leq T$$

kısıtının yerine, (21) ve (25) nolu eşitlikler dikkate alınarak, aşağıdaki şekilde elde edilen kısıtı kullanabilir:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^k \left[ \frac{x_i(u_i - l_i) + (u_i + l_i)}{2} \right]^2} \leq T \quad (27)$$

### 6. Bir Tolerans Belirleme Örneği

Bu bölümde, ilk olarak Kim ve Cho (2000) tarafından verilen bir montaj problemi ele alınmıştır. Kim ve Cho, bu montajda, toleranslar arasındaki eklenebilir ilişkiyi dikkate alarak, optimum bileşen toleranslarını belirlemek için cevap yüzeyi yaklaşımı kullanmıştır. Bu bölümde ise, aynı montaj için, toleranslar arasında eklenebilir ilişkiler yerine olasılıksal ilişkiler dikkate alınarak, cevap yüzeyi yaklaşımı ile bileşen toleransları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile Kim ve Cho'nun elde ettiği sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Bir montaj ve bileşenlerine ait toleranslar

Kim ve Cho (2000)'nun ele aldığı montaj Şekil 3 ile verilmiştir. Montajın toleransı  $T = 0,145$ 'tir. Bileşen toleransları üzerindeki kısıtlar ise,

$$0,02 \leq T_1 \leq 0,05$$

$$0,03 \leq T_2 \leq 0,07$$

$$0,04 \leq T_3 \leq 0,08$$

şeklinde dir. Toleransların imalat maliyetlerini tespit etmek için, değişik tolerans seviyeleri *merkezi bileşik tasarım* kullanılarak belirlenmiş ve bu seviyelerde imalat maliyetleri ölçülmüştür. Sonuçlar Tablo 2 ile verilmiştir. Kim ve Cho, veriler üzerine en küçük kareler yöntemi uygulayarak ikinci derece polinom şeklindeki maliyet fonksiyonunu aşağıdaki gibi elde etmiştir:

$$\begin{aligned} \hat{y} = & 12,36 - 1,53x_1 - 1,33x_2 - 1,25x_3 + 0,10x_1^2 - 0,18x_2^2 \\ & + 0,33x_3^2 - 0,63x_1x_2 - 0,25x_1x_3 - 0,03x_2x_3. \end{aligned} \quad (28)$$

Kim ve Cho (2000), (28) eşitliği ile verilen maliyet fonksiyonunu aşağıdaki kısıtları dikkate alarak minimize etmiştir:

$$\frac{0,03x_1 + 0,07}{2} + \frac{0,04x_2 + 0,10}{2} + \frac{0,04x_3 + 0,12}{2} \leq 0,145 \quad (29)$$

$$-1 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3 \quad (30)$$

Son olarak Kim ve Cho (2000), optimum tolerans seviyeleri olarak  $(x_1, x_2, x_3) = (0,629, -0,018, -0,454)$  ve buradan  $(T_1, T_2, T_3) = (0,0444, 0,0496, 0,0509)$  değerlerini bulmuştur. Bu toleranslarda tahmin edilen maliyet ise (28) eşitliğinde yerine konulduğunda 12,17 olarak bulunmuştur.

(28) nolu eşitlik ile verilen maliyet fonksiyonunu olasılıksal ilişki kullanılarak minimize etmek için, (30) ile verilen kısıtlar yanında, (27) nolu ifade ile verilen kısıtı dikkate almak gerekmektedir. Bu problem için (27) ile verilen kısıt,

$$\sqrt{\left(\frac{0,03x_1 + 0,07}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,04x_2 + 0,10}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,04x_3 + 0,12}{2}\right)^2} \leq 0,145$$

(31) şeklinde yazılabilir. Maliyet fonksiyonunu, (30) ve (31) nolu kısıtlar altında, Microsoft Excel'deki "Çözücü" yazılımı kullanarak minimize ettiğimizde, optimum tolerans seviyeleri olarak  $(x_1, x_2, x_3) = (1, 1, 1)$  ve buradan  $(T_1, T_2, T_3) = (0,05, 0,07, 0,08)$  değerleri bulunmuştur. Bu toleranslarda tahmin edilen maliyet ise (28) eşitliğinde yerine konulduğunda 7,59 olarak

*Optimum Toleranslar ve Cevap Yüzeyi*

bulunmuştur. Bu sonuçlar Kim ve Cho'nun bulduğu sonuçlar ile karşılaştırıldığında, bileşen toleranslarının daha geniş belirlenebildiği ve böylece daha düşük imalat maliyetine ulaşabileceği görülmektedir.

**Tablo 2.** Montaj Örneği Verileri

$i$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_i$
1	0,02	0,03	0,04	0,09	-1	-1	-1	16,1
2	0,05	0,03	0,04	0,12	1	-1	-1	14,3
3	0,02	0,07	0,04	0,13	-1	1	-1	14,7
4	0,05	0,07	0,04	0,16	1	1	-1	10,6
5	0,02	0,03	0,08	0,13	-1	-1	1	14
6	0,05	0,03	0,08	0,16	1	-1	1	11,4
7	0,02	0,07	0,08	0,17	-1	1	1	12,7
8	0,05	0,07	0,08	0,2	1	1	1	7,4
9	0,01	0,05	0,06	0,12	-1,682	0	0	14,7
10	0,06	0,05	0,06	0,17	1,682	0	0	10,5
11	0,035	0,016	0,06	0,111	0	-1,682	0	14,1
12	0,035	0,084	0,06	0,179	0	1,682	0	9,5
13	0,035	0,05	0,026	0,111	0	0	-1,682	15,3
14	0,035	0,05	0,094	0,179	0	0	1,682	11,2
15	0,035	0,05	0,06	0,145	0	0	0	12,5
16	0,035	0,05	0,06	0,145	0	0	0	12,6
17	0,035	0,05	0,06	0,145	0	0	0	12
18	0,035	0,05	0,06	0,145	0	0	0	12,5
19	0,035	0,05	0,06	0,145	0	0	0	12,7
20	0,035	0,05	0,06	0,145	0	0	0	11,9

**6. Sonuç**

Bir montajı oluşturan bileşenlerinin optimum toleranslarının cevap yüzeyi yöntemleri kullanılarak belirlenmesi, maliyet ile tolerans arasındaki ilişkinin, yapısı bilinmese bile, bir model ile ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

Cenk Özler

Ayrıca elde edilen optimum toleranslar, bütün mühendislik kısıtlarını sağlamaktadır.

Optimum toleransların belirlenmesinde optimizasyon problemine dahil edilen bir kısıt ise toleranslar arasındaki ilişkiler olmaktadır. Olasılıksal ilişkilerin kullanılması tercih edildiğinde, toleransların daha geniş belirlenebilmesi söz konusu olmaktadır. Bu da imalat maliyetlerinin daha düşük olmasına yol açmaktadır. Bununla beraber olasılıksal ilişkileri dikkate almanın önemli bir dezavantajı da bulunmaktadır. İlgili kalite karakteristiğinin ortalaması  $\mu_i$ 'nin toleransların ortalamasından çok az miktarda sapması bile uygun olmayan montaj miktarında büyük artışlara neden olabilir. Diğer bir deyişle, toleransların olasılıksal ilişkiler dikkate alınarak belirlenmesi durumunda, imalat süreci boyunca kalite karakteristiklerinin ortalama değerlerinin sıkı bir şekilde kontrol altında tutulması gerekmektedir.

#### ABSTRACT

#### THE USE OF RESPONSE SURFACE METHODS IN THE SELECTION OF OPTIMUM TOLERANCES

Determination of the tolerances of an assembly's components is an important issue for quality engineers. Recently, usage of statistical techniques to determine optimum component tolerances is being widely employed. In this study, additive and probabilistic relations between component and assembly tolerances are defined and approaches on the usage of response surfaces for determination of optimum tolerances for additive relations are reviewed. An application case on determining optimum tolerances by response surface methodology by utilizing the probabilistic relations between tolerances is given. Advantages and disadvantages of probabilistic relations versus additive ones are discussed.

#### KAYNAKÇA

- BOX, G. E. P. ve N. R., DRAPER (1987), *Empirical Model Building and Response Surfaces*, John Wiley and Sons, New York.
- CHANDRA, M. J. (2001), *Statistical Quality Control*, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.
- JEANG, A. (1999) "Robust Tolerance Design by Response Surfaces Methodology, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 15, No: 6, 399-403.
- KHURI, A. I. ve J. A., CORNELL (1987), *Response Surfaces: Designs and Analyses*, Marcel Dekker, New York.

*Optimum Toleranslar ve Cevap Yüzeyi*

KIM, J. K. ve R. C., CHO (2000), "The Use of Response Surface Designs in the Selection of Optimum Tolerance Allocation", *Quality Engineering*, 13, No:1, 35-42.

MYERS, R. H. ve D. C., MONTGOMERY (1995), *Response Surface Methodology – Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley and Sons, New York.