

## TOLERANS ANALİZ YAKLAŞIMLARI – I: GENEL METODLAR, TOLERANS DİYAGRAMI VE GRAF TEORİ

Ayşegül GÜLTEKİN<sup>a</sup>, H. Rıza BÖRKLÜ<sup>b</sup>

<sup>a</sup>M.E.B. Projeler Koordinasyon Kurul Merkezi Başkanlığı,  
06500 Beşevler, ANKARA

<sup>b</sup>G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü,  
06500 Teknikokullar, ANKARA

### ÖZET

Endüstriyel bir üründe performans, maliyet ve kalite esastır. Kaliteyi arttırmak, maliyeti düşürmek ve pazarda yer bulabilmek için “tolerans kontrolü”nün büyük bir rol oynadığını farkedenden endüstriyel kuruluşlarda “tolerans analizi” oldukça önem kazanmıştır. Bu amaçla, üretim şartları ve performans özellikleri esasına göre toleransların belirlenmesinde tasarımcılara yardımcı olmak için yeni modeller ve analiz araçları geliştirilmektedir. Bu durum tasarım özellikleri ile üretim şartlarını ortak bir modelde bir araya getiren “üretim için tasarım (Design For Manufacturing - DFM)” ve “eş zamanlı mühendislik (Concurrent Engineering – CE)” uygulamalarını teşvik etmektedir. Bu makale dizisinde, yukarıda da belirtildiği gibi, önemi giderek artan “tolerans analizi”nde kullanılan yöntemleri tanıtmak ve özellikle de bilgisayar destekli tolerans analizi uygulamalarının bir değerlendirilmesini yapmak amaçlanmıştır. Tolerans analizinde kullanılan yöntem, model ve çalışmaların oldukça fazla olması sebebi ile, yöntemlerin gruplandırılması hedeflenmiş ve dizinin ilk makalesinde genel metodlar tanıtılarak özellikle en yaygın kullanılan “tolerans diyagramı ve graf teorisi” metodu dolaylı irdelenerek literatürdeki çalışmalarla beraber değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tolerans, tolerans analizi, tolerans diyagramları.

## A REVIEW OF TOLERANCE ANALYSIS APPROACHES – I: GENERAL METHODS, TOLERANCE CHARTING AND GRAPH THEORY

### ABSTRACT

An industrial product must have the characteristics of: the desired performances, reduced costs and a high quality. The tolerance checking has been playing very important roles in order to increase quality, reduce manufacturing costs and compete with other companies. Industrial companies that realizing this fact have given special attention to the tolerance analysis during manufacturing activities. Due to the establishment of this reality, new models and analysis tools have been developed to support the designer for the determination of tolerances based upon manufacturing conditions and performance characteristics. Thus, this tendency encourages applications of design for manufacturing and concurrent engineering that unifies design properties and manufacturing conditions within a common model. The series of these papers aim at describing methods used in the analysis of tolerance and specially evaluating applications of computer aided tolerance analysis. There exist many methods for such purpose and a classification of these methods are also given. Finally, this first paper examines general methods in the field, paying special attention to those including the methods of tolerance charting and graph theory, compares the research related to this subject.

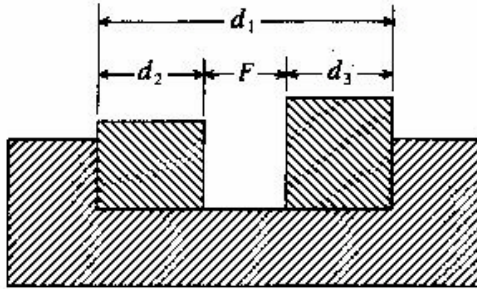
**Key Words:** Tolerance, tolerance analysis, tolerance charting.

### 1. GİRİŞ

Bir montaj grubundaki çeşitli parçalara tolerans tayini (toleransların belirlenmesi) parçaların fonksiyonel özelliklerini karşılamalı ve üretim maliyetini düşürmelidir. Bir montajdaki değişik parçalara tolerans verilmesinde tasarımcı, tüm bu toleransların talaş kaldırma veya montajda hata veya zorluklara sebep olmadığını kontrol etmelidir. Tolerans analizi ve toleransların üst üste gruplandırılması (stack-up), tolerans belirleme ve atama işleminin genelde parçadan parçaya (her iki parça için ayrı ayrı) esasına dayanmasından dolayı önemlidir. Bu sebeple tolerans analizi, tüm tasarım sınırlamalarını karşılamayı doğrulamak için “toleransların kontrol prensibi” gibi tanımlanabilir (1).

Tolerans analizinin amacı ürün boyutlarının bir fonksiyonu olan herhangi bir büyüklük değişimini belirlemektir. Genelde ölçüleri içeren bu büyüklükler, tasarım fonksiyonları olarak isimlendirilirler. Bir tasarım fonksiyon davranışını kontrol eden ürün boyut ve değişkenleri, “tasarım fonksiyon değişkenleri” olarak adlandırılır. Tasarım fonksiyon değişkenliği, özel bir tolerans şart uygunluğunu değerlendirmek için kullanılır. Şekil 1, bir kanala monte edilmiş iki blok durumu için, bir tasarım fonksiyon örneğini göstermektedir. Tasarım fonksiyonu “ $F$ ”, iki blok arasındaki boşluktur ve kanal ile iki blok ölçülerinin fonksiyonudur. Bu boyutlar için

“ $F$ ’in” sıfırdan küçük olmasını engelleyen bir tolerans özelliği yeterli ve tatminkardır



Şekil 1. Tolerans analizi için bir tasarım fonksiyon formülasyonu - (1)

$d_1, d_2, d_3 =$  Ürün ölçüleri (tasarım fonksiyonu ölçüleri)

$F =$  Tasarım fonksiyonu

$$F = f(d_1, d_2, d_3) = d_1 - d_2 - d_3$$

$F \geq 0$ , kabul, (montaj kabul edilir)

$F < 0$ , red, (montaj red edilir)

Toleransların uygunluğunu değerlendirmek için  $\{d\}$  ile ilişkili olarak bir tasarım fonksiyonu formülize edilebilir:

$$T = f(\{d\}) = f(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n) \quad (1)$$

$F$ ’in değişkenliği,  $\{d_n\}$  ve  $\{T\}$ ’den yukarıda tamamlanmış gibi tayin edilen  $\{d\}$ ’deki değişkenlere bağlıdır.  $F$  her zaman  $\{C\}$ ’yi karşılıyorsa,  $\{T\}$ ’de tatminkardır ve montaj kabul edilir. Değilse,  $\{T\}$ ’de tatminkar değildir ve montaj red edilir. Genelde oldukça karmaşık olan tasarım fonksiyon formülasyonu, tolerans analizinin en zor ve zaman alıcı kısmını teşkil eder.

## 2. TOLERANS ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

### 2.1. Aritmetik En Kötü Durum Metodu

Aritmetik tolerans metodu, bir en kötü-durum analiz metodudur. Bu metot, ölçü sınırlarını tolerans hesaplarına taşımak için kullanılır.

İlk “ $m$ ” elemanların eklenmesiyle (artan ölçüler olarak adlandırılan) ve son  $(n - m)$  elemanların çıkartılmasıyla (azalan ölçüler olarak adlandırılan) elde edilen “ $F$ ” tasarım fonksiyonu (nihai sonuç ölçüler) şeklinde “ $n$ ” elemanlı kapalı döngü son ölçüsünün, verilen ölçüler eklenmesi veya çıkarılmasıyla elde edilmesi anlamını taşır. Bir ölçü dizisi,  $\{d\}$  kabul edilsin. Bu metodun

kullanılmasıyla  $F$  hakkındaki tolerans bilgisi, bireysel ölçülere karşılık gelen bilgilerin eklenmesi ve/veya çıkarılmasıyla elde edilir. Böylece şu eşitlikler yazılabilir:

Anma ölçüsü:

$$F_N = \sum_{i=1}^m d_{iN} - \sum_{i=m+1}^n d_{iN} \quad (2)$$

En büyük (maksimum) ölçü:

$$F_{maks} = \sum_{i=1}^m d_{i maks} - \sum_{i=m+1}^n d_{i min} \quad (3)$$

En küçük (minimum) ölçü:

$$F_{min} = \sum_{i=1}^m d_{i min} - \sum_{i=m+1}^n d_{i maks} \quad (4)$$

$F$ ’deki tolerans:

$$T_i = F_{maks} - F_{min} = \sum_{i=1}^m T_i - \sum_{i=m+1}^n T_i = \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

$F$ ’in üst toleransı:

$$T_{UF} = F_{maks} - F_N = \sum_{i=1}^m (d_{i maks} - d_{iN}) -$$

$$\sum_{i=m+1}^n (d_{i min} - d_{iN}) = \sum_{i=1}^m T_{ui} - \sum_{i=m+1}^n T_{Li} \quad (6)$$

$F$ ’in alt toleransı:

$$T_{LF} = F_{min} - F_N = \sum_{i=1}^m (d_{i min} - d_{iN}) -$$

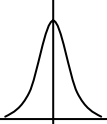
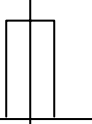
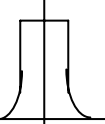

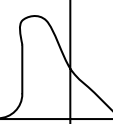
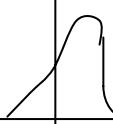
$$\sum_{i=m+1}^n (d_{i maks} - d_{iN}) = \sum_{i=1}^m T_{Li} - \sum_{i=m+1}^n T_{ui} \quad (7)$$

Burada,  $T_{ui}$ ,  $T_{Li}$ , sırasıyla  $d_{iN}$  ölçüsünün, üst ve alt toleranslarıdır. Tek taraflı toleranslar (unilateral tolerans) için bu değişkenlerden biri sıfırdır.

### 2.2. İstatistiksel En Kötü-Durum Metodu

Bu metot, aritmetik metot gibi, tolerans analizi gerçekleştirmek için ölçü sınırlarını kullanır. Bununla beraber, aritmetik metodun aksine bir montajdaki parça ölçülerinin bir olasılık dağılım eğrisiyle (Tablo 1) izlenme gerçeğini de dikkate alır. Sonuç olarak, son montaj ölçülerinin frekans dağılım eğrisi bir olasılık dağılım eğrisiyle izlenir. Genel olarak bir olasılık dağılım eğrisi, normal bir dağılım eğrisi olarak kabul edilir.

Tablo 1. Tipik dağılımlar için  $\alpha$  ve k değerleri - (1)

Dağılım	Normal	Düzygün	Yaklaşık Düzygün	Üçgen	Sola Eğik-Yatık	Sağa Eğik-Yatık
Biçim						
$\alpha$	0	0	0	0	-0.26	0.26
K	1.0	1.73	1-1.15	1.22	1.17	1.17

Bu metot, hem parti üretimi hem de seri üretim için kullanılır. Takım aşınması, tezgah şartları, rastgele hatalar vb. gibi üretim şartlarındaki değişkenlere müsaade eder. Tolerans sınırlarının arttırılması ve bu yüzden üretim hassasiyetinin azaltılmasıyla üretim verimliliğini artırır.

Bu metot, her bir  $d_i$  elemanın bir olasılık dağılım eğrisine sahip olduğu kapalı döngü ölçü dizisine,  $\{d\}$ , uygulanır. Tasarım fonksiyonu, aritmetik metottakiyle aynı şekilde elde edilir. F hakkındaki tolerans bilgisi (2'den 6'ya kadar olan eşitliklerdekine benzer), aşağıdaki gibi istatistiksel olarak elde edilebilir. Analiz esası olarak normal dağılım dikkate alınır. Diğer dağılımları normal dağılımla ilişkilendiren parametreler, Tablo 1'de gösterilmiştir. Şekil 2, bir ölçü dizisindeki elemanlardan biri için dağılım eğrisi parametrelerini göstermektedir. Ölçü dizisindeki elemanlar yeterince büyük (geniş) olduğunda, F tasarım fonksiyonunun nihai ölçü dağılımı yaklaşık olarak normal ve bireysel ölçülerin dağılmasından bağımsızdır. Bu sebeple aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$F_N = \sum_{i=1}^m d_{iN} - \sum_{i=m+1}^n d_{iN} \quad (8)$$

$$T_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n K^2 T_i^2} \quad (9)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} = \frac{T_F}{6} \quad (10)$$

$$T_{uF} = \Delta + \frac{1}{2} T_F \quad (11)$$

$$T_{LF} = \Delta - \frac{1}{2} T_F \quad (12)$$

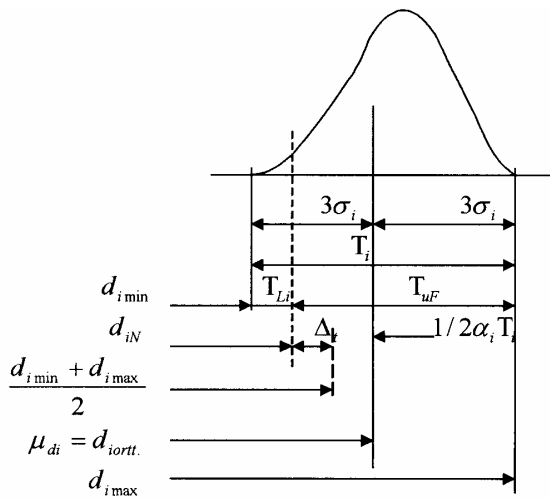
$$\Delta F_N = \sum_{i=1}^m \left( \Delta_i + \frac{1}{2} \alpha_i T_i \right) - \sum_{i=m+1}^n \left( \Delta_i + \frac{1}{2} \alpha_i T_i \right) \quad (13)$$

Eşitlik 10'da kullanılan  $\sigma = T_F / 6$ , Şekil 8'de görüldüğü gibi dağılım eğrisi için  $6\sigma$ 'lık bir aralık (ortalama toleransın her bir tarafına  $3\sigma$ ) kabulüne dayanır. 11'den 13'e kadar olan eşitlikler,  $T_F$ 'nin,  $T_{uF}$  ve  $T_{LF}$  olarak, sırasıyla üst ve alt sınırlarına bölünmesi olarak yorumlanabilir. İki yönlü (bilateral) eşit tolerans sınırları kabul edilirse,  $T_{uF} = 1/2 T_F$  ve  $T_{LF} = -1/2 T_F$  olacaktır.

### 2.3. Monte Carlo Simülasyonu Metodu

Daha önce sözü edilen iki metot, sadece lineer tasarım fonksiyonlu kapalı döngü ölçü dizileri için geleneksel toleranslara uygulanabilir. Bu fonksiyonlar daha karmaşık ve non-lineer olduğunda, bu metotları kullanmak mümkün olsa da, daha az anlaşılır olacaktır.

Kesin bir tasarım fonksiyonu gerektirmeden geometrik toleransları kullanarak tolerans analizi yapabilmek için uygun metotlardan birisi de



Şekil 2. Tolerans bilgisi ve boyut dağılımı - (1)

“Monte Carlo Similasyonu Metodu” olarak görülmektedir. Monte Carlo metodu fikri, toleransları ve fonksiyonelliği denemek için yapılmış ve monte edilmiş bir montaj prototipinin verildiği üretim uygulamasından geliştirilir. Monte Carlo metodu, parça üretim zamanı ve maliyeti artırmadan aynı sonuçları (metodun güvenilirlik sınırları içerisinde) gerçekleştirir.

Bilgisayar Destekli Tolerans Analizi’nde en yaygın olarak kullanılan metotlardan olan Monte Carlo Similasyonu Metodu, bu makalenin devamı niteliğindeki ikinci çalışmada ayrıntılı olarak değerlendirilecektir.

#### 2.4. Diğer Metotlar

Tolerans analizi için başka metotlar da mevcuttur. Bunlardan optimizasyon metotları, tasarım değişkenleri optimizasyon için karar değişkenleri olarak gözden geçirilirken bir optimizasyon problemi olarak tasarım fonksiyonu ve tasarım sınırlamalarını kullanır.

Tasarım fonksiyonu non-lineer olabilir. Lineer programlama metodları tasarım fonksiyonunu ve tasarım sınırlama eşitliklerini lineerize eder ve lineer programlamayı kullanarak tolerans analizi çözümü yapar. Lineer programa problemi çözüldükten sonra, toleransların her birinin bağlı hatasını belirlemek için hassasiyet analizi gerçekleştirilebilir.

"Taylor Serileri Metodu" ve "Karelere Bölme (Quadrature) Metodu" istatistiksel metotlar olup, Monte Carlo metodundaki kadar büyük bir örneklem üretmeden, tasarım fonksiyonunu olasılık yoğunluk fonksiyonuna yaklaştırma (bir tahmin) sağlarlar (2).

"Tolerans diyagramları (çizelgeleri)"; yarı-grafiksel, yayılmış levha halinde bir metot olup, nihai fonksiyon üzerinde tolerans analizi gerçekleştirmek ve tasarım fonksiyonlarını formülize etmek için kullanılır. Bu metot, sadece tek-boyutlu problemlere değinmektedir. Bununla beraber, özellikle tek görünüşle ifade edilebilen parçaların bilgisayar destekli tolerans analizi uygulamalarında, Monte Carlo Similasyonu metodu ile beraber, en yaygın kullanılan metot görünümündedir. Bu sebeple bu çalışmanın 3. Bölümünde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

"Bjorke Metodu", tasarım fonksiyonlarını formülize eder ve istatistiksel analizler yapar. Bu metot, "tolerans zinciri" kavramını kullanır ve

genel üç boyutlu problemlerle ilgilidir. Buna karşın, boyutlandırılmamış tasarım fonksiyonlarını sağlayamaz. Bjorke, tasarım fonksiyonu ve boyutların bir Beta ( $\beta$ ) dağılımına sahip olduğunu kabul eder (1).

### 3. TOLERANS DİYAGRAMLARI

Ayrıntılı bir ürün tasarım işlemi; biçim, ölçü ve toleranslarla ilgili özellikleri içerir. Ürün yapı veya biçimi, ürüne ait işlevsel performanstan belirlenirken; toleranslar, performans ve diğer parçalarla ilişkisine göre belirlenir (örneğin; alıştırma cinsi ve dayanım özelliklerinden belirlenmiş geometri / ölçüler vb.). Ürün tasarımının son aşamasında, işlevsel özellikler hali hazırda belirlendiğinden, özellikle de Üretim için Tasarım (Design for Manufacturing – DFM) ve Eş Zamanlı Mühendislik (Concurrent Engineering-CE) ortamlarında parametrik teknikler kullanılarak değiştirilebilir. Bir boyutsal tasarım değişimi bir ölçüyü (anma değerini) düzenleyebilir veya bir ölçünün referans yüzeyini değiştirebilir (5).

DFM/CE ortamında önce bir başlangıç tasarımı oluşturulur ve tasarım daha sonra şekillendirilerek sonuçlandırılır. Böyle bir tasarım uygulaması gerçekleştirmek için, üretim açısından ürünün işlem planlamasının iki aşamada tasarlanması önerilir (5-6):

- 1. Aşamada, başlangıç için kaba bir işlem sırası oluşturulur.
- 2. Aşamada, bu kaba işlem sırası olgunlaştırılarak tamamlanır ve komple bir işlem planlaması üretilir.

Ürün tasarımının son aşamasında, genellikle ürünün bir ölçüsü (büyüklüğü veya referans yüzeyi) revize edilir. Bu durumda, ürünün bir ölçüsü değiştiğinde üretim yönüyle de ölçülerin, dolayısı ile işlem planlaması gecikmeden değiştirilmelidir. Böylece tasarımcı değişiklik kararını süratle verebilir.

DFM/CE ortamında işlem planlaması için ürün tasarımı amacıyla, yaygın kullanılan yazılım paketlerinden (örneğin Pro-Engineer gibi) istifade edilir. Bir işlem planlamasındaki “üretim ölçülerini” belirlemek için “Tolerans Diyagramları (Tolerance Charting)” tekniği, özellikle de bilgisayar destekli olarak oluşturulmuş tolerans diyagramları, yaygın kullanılan bir metottur. Bilgisayar desteği sağlamak için kullanılan pek çok model ve metot bulmak mümkündür (6-15).

### 3.1 Tolerans Diyagramı Oluşturma

Tolerans diyagramı oluşturmak için;

- İşlenecek parçanın işlem sırası,
- İşlenecek yüzeyler,
- İşleme için referans alınan yüzey(ler),
- Nihai ölçü ve toleranslar (Parçanın Yapım Resmi, Blue-Print-B/P) ve
- İşlemlerde kullanılacak takım tezgahları belirlenmiş olmalıdır (16).

Tolerans diyagramı oluşturma işlemi aşağıdaki sırayla özetlenebilir (17):

1. Tüm B/P (resim) ölçüleri ve işleme ölçüleri için ölçülendirme zincirleri tanımlanır.
2. Her işlem için işlenecek makul (yeterli) talaş payı belirlenir.
3. Her işleme ölçüsü için mümkün olan en geniş toleranslar belirlenir.
4. B/P ölçüleri ve talaş payları kontrol edilir.
5. İşleme ölçülerinin ortalama değerleri belirlenir.

Yukarıdaki çalışma için sınırlamalar,

1. B/P ölçüleri (Anma ölçülerini ve toleransları kapsayan),
2. Her operasyonun proses veya tezgah kapasitesi olarak belirlenir.

Yukarıda beş adımda özetlenen bilgiler, bir tolerans diyagramının sağ tarafında, sınırlamalar ise sol tarafında gösterilir (5, 16).

Bir DFM/CE ortamındaki ölçülendirme problemini ortaya koymak ve tolerans diyagramı oluşturmayı açıklamak için, Şekil 3 a'da basit bir parça örneği, Şekil 3 b'de ise ürünün yapımı için işlem planlaması gösterilmiştir. İşlem planlamasındaki tüm işleme ölçüleri ( $\chi_s$ ) bilinmektedir. Tolerans diyagramı tekniğini kullanmak için bu bilinmeyen ölçülerin, Şekil 4'de yerleştirildiği şekli ile bulunabilmesi gereklidir.

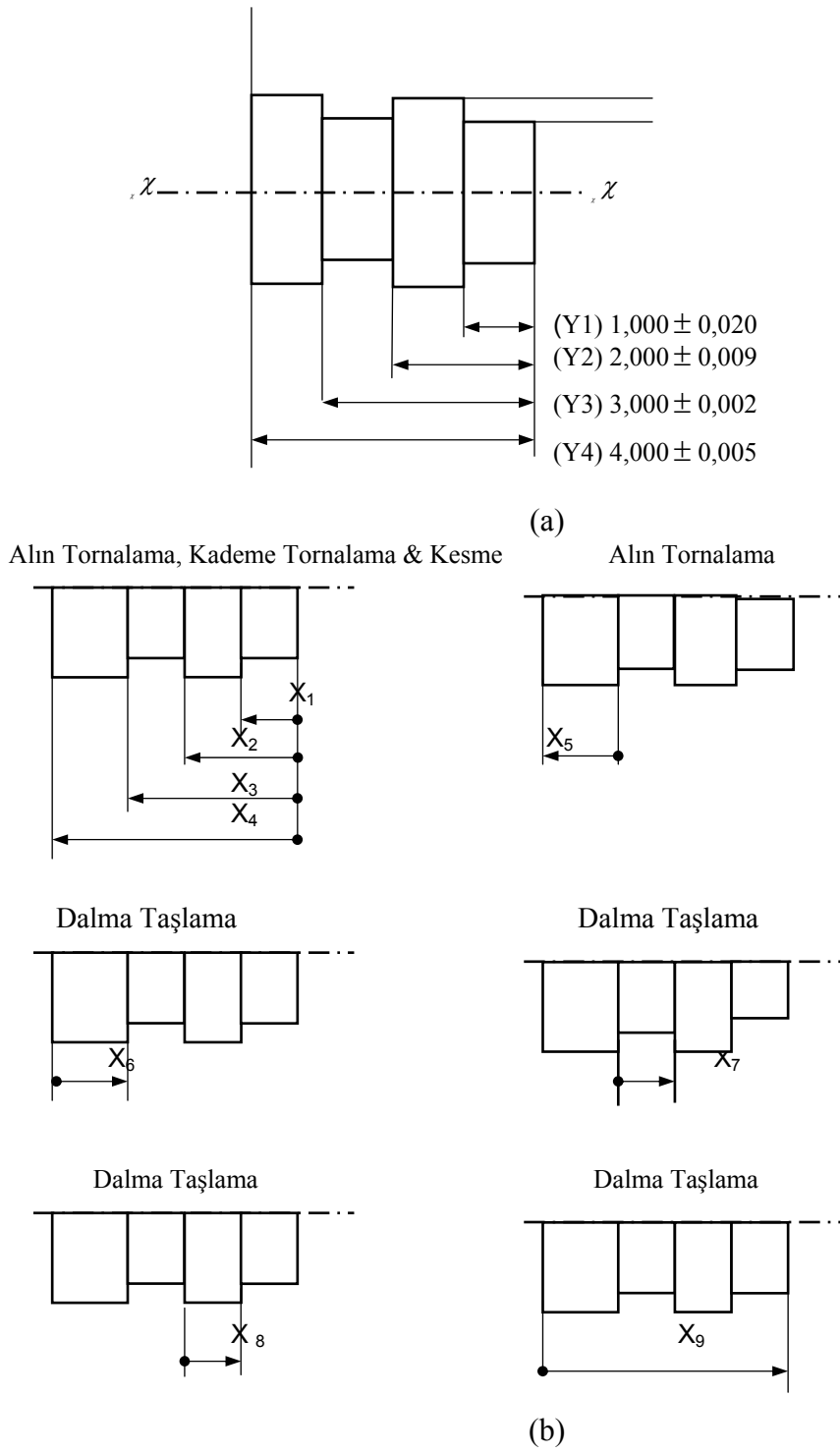
Tasarımın son aşamasında,  $Y_3$  ölçüsü 3,2 olursa, yani  $\Delta Y_3 = 0,2$  olursa, tasarımcı bu ölçü değişiminin hangi üretim ölçülerini etkilediğini bilmek isteyecektir. Açık bir şekilde, problemin çözümü için tolerans çizelgesinin, önceden yapıldığı gibi yeniden oluşturulması gerekebilir.  $Y_3$  tasarım ölçüsünün referans yüzeyi bir başka yüzeyle değiştirilirse işlem planlamasındaki üretim ölçülerinin nasıl değişeceği hususu da bir başka problemdir. DFM/CE, bu tasarım değişikliğine uygun cevabın süratle verilmesini gerektirir. Bir tolerans diyagramının yeniden oluşturulması uzun zaman alacaktır ve DFM/CE ortamı için uygun değildir. Bu problemin çözümü için, tolerans diyagramı oluşturmada "Digrafik Metot" kullanımı yaygındır (4,5). Bu metot, tasarım ve üretim arasındaki boyutsal ilişkileri kullanır ve değişiklikler için hızlı bir çözüm sağlar.

### 3.2. Digrafik Metot ve Ters Ölçü Zincirleri

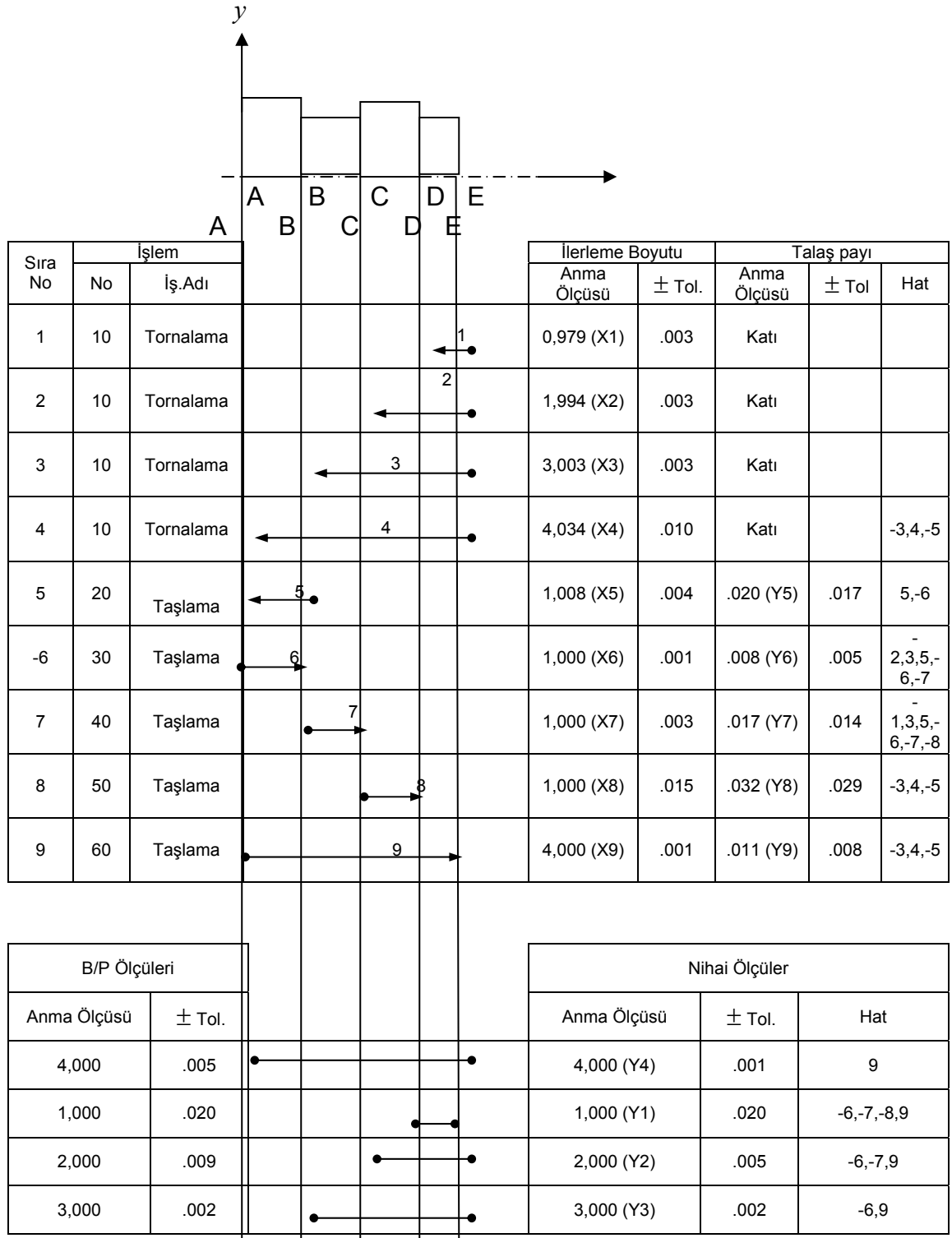
DFM/CE'deki ölçülendirme problemini ele almak için, tasarım ve üretim arasındaki ilişkinin yapılandırılması gereklidir. Digrafik metot, bu amaç için kolayca uygulanabilir (7). Digrafik metottaki anahtar kavramlar, üç ağaç yapı ile geri ve ileri ölçü zincirleridir. Genelde, ürünün bir yüzeyi, bir düğüm noktası (köşe-vertex) ve bir ölçü veya talaş payı bir "ok - edge" olarak dikkate alınır, üç digrafik ağaç yapı tolerans diyagramından oluşturulabilir. Bu üç ağaç yapısı;

- B/P (resim ölçüsü) ağacı,
- B/P ve tolerans payı ağacı (Y-ağacı),
- İşleme ölçü ağacı (X-ağacı) olarak belirtilebilir.

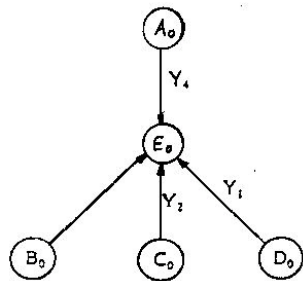
Şekil 5 - 7, Şekil 3'deki örnek ürün için bu ağaç yapıyı sırasıyla göstermektedir. Bu ağaç yapısındaki okların yönü, tolerans diyagramındaki (Şekil 4)  $\chi$  - eksen pozitif yönüdedir.



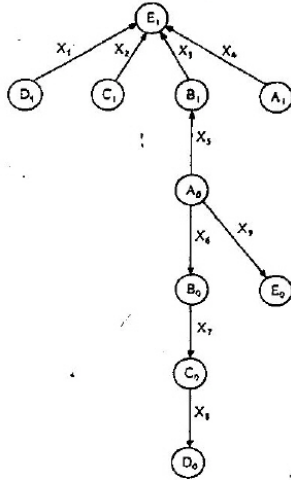
Şekil 3. İşlem planlama (a) Ürün, (b) İşlem planlama



Şekil 4. İşlem planlaması için tolerans diyagramı



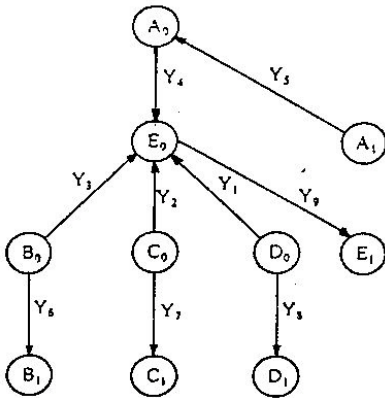
Şekil 5. B/P ölçüsünün ağaç yapısı



$$\begin{aligned}
 X1 &= Y1 - Y8 + Y9 \\
 X2 &= Y2 - Y7 + Y9 \\
 X3 &= Y3 - Y6 + Y9 \\
 X4 &= Y4 - Y5 + Y9 \\
 X5 &= Y3 + Y4 + Y6 \\
 X6 &= Y3 + Y4 \\
 X7 &= -Y2 + Y3 \\
 X8 &= -Y1 + Y2 \\
 X9 &= Y4
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Benzer şekilde “m” sayıda “ileri ölçü zinciri” (genelde sadece “ölçü zinciri” olarak atfedilir ve Şekil 4’deki gibi tolerans diyagramında gösterilir)”, Y-ağacındaki bir ok X-ağacına eklenerek elde edilebilir. Bu örnek için dokuz ileri ölçü zinciri aşağıdaki gibidir:

Şekil 6. B/P ölçüsü ve tolerans payının ağaç yapısı (X-ağacı)



$$\begin{aligned}
 Y1 &= -X6 - X7 - X8 + X9 \\
 Y2 &= -X6 - X7 - X9 \\
 Y3 &= -X6 + X9 \\
 Y4 &= X9 \\
 Y5 &= -X3 + X4 - X5 \\
 Y6 &= X5 - X6 \\
 Y7 &= -X2 - X3 - X5 - X6 - X7 \\
 Y8 &= -X1 + X3 + X5 - X6 - X7 - X8
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Şekil 7. İşleme ölçüsü ağaç yapısı (Y-ağacı)

X-ağacındaki bir ok (bir  $\chi$ ), Y-ağacına ilave edilirse farklı bir döngü elde edilir. Bu farklı döngü “ters ölçü zinciri” olarak adlandırılır. Bu örnek için aşağıda gösterilen dokuz ters ölçü zinciri oluş-turulabilir.

### 3.3. Yapı Matrisi ve Değişmezlik

Ters ölçü zincirleri, matris formatında aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \\ X5 \\ X6 \\ X7 \\ X8 \\ X9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y1 \\ Y2 \\ Y3 \\ Y4 \\ Y5 \\ Y6 \\ Y7 \\ Y8 \\ Y9 \end{bmatrix}$$

Genelde yukarıdaki eşitlik seti;

$$X = QY$$

(16)

olup burada;

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$$

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)^T$$

$$Q = [q_{ij}] (M \times M)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} Y = 1 & \text{ise } X_i \text{ 'nin artan terkip hattı} \\ Y = -1 & \text{ise } X_i \text{ nin azalan terkip hattı} \\ 0 & \text{yoksa } i, j = 1, 2, \dots, m \text{ 'dir.} \end{cases}$$

Benzer şekilde, ileri ölçü zinciri için matris formatı :

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ Y_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$Y = PX$$

dir. Burada;

$$P = [P_{ij}] (m \times m \text{ dönüşüm matrisinde})$$

$$P_{ij} = \begin{cases} X = 1 & Y_i \text{ 'nin artan terkip hattı} \\ X = -1 & Y_i \text{ 'nin azalan terkip hattı} \\ 0 & \text{yoksa} \\ & i, j = 1, 2, \dots, m \\ & \text{olacaktır.} \end{cases}$$

$Q$  matrisi,  $Y$ - ağaç yapısından (düğüm ve düğümler arası ilişkiler – oklar gibi) belirlenir. Bu sebeple,  $Q$  matrisi bir “yapı matrisi” veya “ters yapı matrisi” olarak isimlendirilir.  $Q$  ters yapı matrisinin  $P$  matrisi de “ileri yapı matrisi” olarak isimlendirilir.  $Q$  ters yapı matrisinin  $P$  ileri yapı matrisiyle bir ilişkisi vardır:

$$Q = P^{-1} \quad (18)$$

“ $X = QY$ ” eşitliğinden,  $Q$  'daki eleman değerleri,  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) veya  $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 'in değerlerine bakılmaksızın, katsayılarından belirlenir. İleri yapı matrisi “ $P$ ” aynı zamanda “değişmezlik” özelliğine sahiptir. Diğer bir ifadeyle  $Q$  ve  $P$  'nin her ikisi de ürün yapı ve işlem planından belirlenir. Ürün yapı ve işlem planlaması sabit ise, tasarım

ölçüleri ve talaş payları [ $Y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ )] ve işleme ölçülerine [ $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )] göre değişmezdir.

Bu matris kullanılarak, daha önceden sözü edilen, tasarım ölçüsündeki bir değişiklikten veya bir tasarım ölçüsünün referans yüzeyindeki değişiklikten kaynaklanan problemleri, DFM/CE ortamında ihtiyaç duyduğu şekilde süratle, bilgisayar ortamına aktararak çözümü mümkündür.

#### 4. TOLERANS DİYAGRAMI VE GRAF TEORİ KULLANAN ÇALIŞMALAR

Singapur, Nonyang Teknoloji Üniversitesi'nden, Ji Ping, Çin Beijing Üniversitesi'nden Ke, M. ve USA, West Virginia Üniversitesi'nden Ahluwallia, R. S.(16), tarafından uluslararası işbirliği ile, işlem planlaması için işleme boyutlarının anma (ortalama) değerlerini otomatik olarak hesaplayabilen bilgisayar destekli işleme yönelik bir ölçülendirme sistemi geliştirmişlerdir. Sistemde, tolerans çizelgesi oluşturmak için teorik bir ağaç yapısı kullanılmaktadır. Resim (Blue-Print- B/P) ölçüleri, talaş payı ve işleme ölçülerinden graf teorisi kullanarak “üç farklı ağaç yapısı” türetilmiştir. Oluşturulan ağaç yapıların algoritması ve bunlara dayalı tolerans diyagramındaki ölçü zincirlerini tanımlayan bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Ayrıca her bir işleme boyutunun toleransını tayin etmek için bir lineer programlama metodu formülize edilmiştir. Sonuç itibari ile, işleme boyutlarının ortalama değerini hesaplamak amacıyla, ölçü zincirlerinden lineer denklemlerin matematiksel bir modeli oluşturulmuştur.

Bir tolerans diyagramında iki ölçü grubu vardır. Bunlar, yapım resmi (B/P) ölçüleri ve işleme ölçüleridir. Bu ölçü grupları arasındaki ilişki, bireysel işlev ölçülerine uygun toleransların verilmesini oldukça güçleştirir. Ping (16), Lineer Programlamanın (LP) uygulanamayan çözümlerinden dolayı, yapım resmi (B/P) ölçüleri ve işleme kabiliyet şartlarına göre, uygun toleransları otomatik ve sistematik olarak belirleyebilen, oransal-düzenli bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşımın sonuçları LP modeli ve orijinal elle gerçekleştirilen yöntemlerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model istatistiksel bir tolerans modeli hüviyetindedir (17).

DFM/CE ortamında, bir ürün ve ona ait işlem planlaması önce tasarlanır sonra sonuçlandırılır.

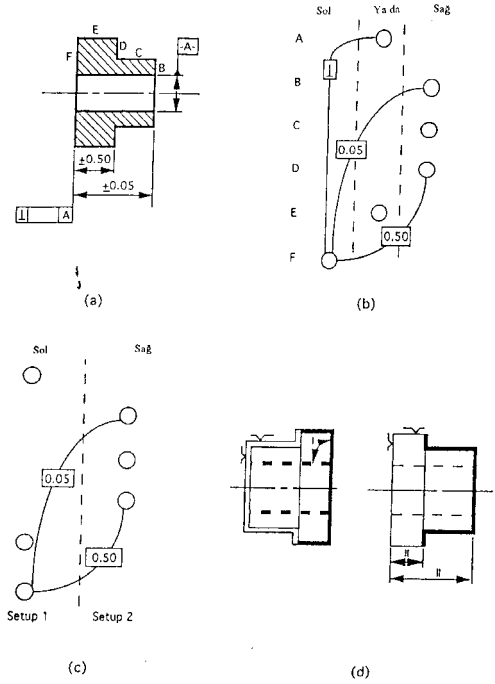
rılır. Ürün tasarımının son aşamasında, üretim açısından, ürünün bir ölçüsünün, gecikmeden değiştirilmesi gerekiyorsa, o ölçü modifiye edilebilir ve bunun sonucu olarak da üretim için gerekli bilgi ile, ürün tasarımcısı süratle doğru kararı verebilir. Ping ve Lau (6), üretim için tasarım ve eş zamanlı mühendislikteki ölçülendirme problemlerini tartıştıkları çalışmalarında, DFM/CE'deki bu ölçülendirme problemini çözmek için bir matematiksel model sunmuşlardır. Araştırmacılar tarafından DFM/CE ortamında işlem planlaması için geliştirilen prototip sistemde "Pro Engineer" paket programı kullanılmıştır. Çalışmada; tasarım ölçüsündeki bir boyut değişimi ve bir tasarım ölçüsünün referans yüzeyindeki değişim olmak üzere iki durum tartışılmış, bu iki durumun üretim ölçülerine karşılık gelen etkileri analiz edilmiştir. Analizlerde, digrafik metot ve ters ölçülendirme zincirleri ile tolerans diyagramı oluşturma yöntemi kullanılmıştır. Digrafik metotta, resim ölçüsü (Blue- Print -B/P) ağaç yapısı, talaş payı ağaç yapısı ve işleme ölçüsü ağaç yapısı grafları esas alınmıştır. Ters ölçülendirme zincirleri ise bir "yapı matrisi" formatına dönüştürülerek kullanılmıştır.

İşlemeye yönelik ölçülendirme ve toleranslandırma, işlem planlamasında çok önemli rol oynamaktadır. Nihai parça ölçülerinin ve toleranslarının, belirlenen tasarım değerlerini aşmaması sağlanmalıdır. Tolerans diyagramı analizi, işleme ait ölçülerin toleranslarındaki ortalama değerleri hesaplamak için, işlem planlamacıların kullandığı etkili bir tekniktir. Bununla beraber bir tolerans diyagramı sadece, işlem planlaması ile ilgili ilk mühendislik kararı aldıktan sonra oluşturulabilir. Özellikle de, set-uplar ve set-up referansları tanımlanmak zorundadır. Pek çok araştırmacı dikkatlerini tolerans diyagramı analizi üzerinde yoğunlaştırırken; set-upların, set-up referanslarının seçimini (set-up planlama) ihmal etmektedirler ve genellikle, kaynaklarda set-up planlama için sistematik bir yaklaşım bulmak zordur.

Zhang, Huang ve Mei (18), işlem planlamasında tolerans kontrolü için set-up planlamasının önemini tartıştıkları çalışmalarında, tasarım tolerans tanımına (specification) dayalı optimum set-up planları sunmuşlardır. Bu çalışmada; referans, tolerans grubu ve ölçü zinciri arasındaki ilişki ele alınarak, tolerans kontrolü üzerinden set-up planlama ele alınmıştır. Parça ve resimden unsur

ilişki grafları ve sonra da set-up grafları oluşturularak parçanın set-up planı oluşturulmaktadır.

Şekil 8'de, örnek bir parça için süreç gösterilmiştir. Metot, sadece dönel (silindirik) parçalara yönelik, heuristik bir yapıdadır.



Şekil 8. Set-up planlama süreci. (a) Parça resmi, (b) Unsur ilişki grafi, (c) Set-up grafi, (d) Set-up planı – (18)

Huang, Zhang ve Oldham'ın, bir önceki çalışmanın devamı niteliğindeki çalışmalarında, set-up planlama problemlerine sistematik bir çözüm getiren, graf teori temelli bir yaklaşım sunmuşlardır. Araştırmada, parçanın tasarım tanımı bir graf olarak temsil edilmiş ve optimal setup planını tanımlama problemi bir graf arama problemine dönüştürülmüştür. Bunun sonucunda, dönel parçalar için bir set-up planlama algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmanın etkinliği ve verimliliği çeşitli örnekler üzerinde değerlendirilmiştir.

Juster'ın (19), "Tolerans Analizinde Graf Tabanlı Bir Yaklaşım" isimli doktora çalışması, geometrik modelleme sistemlerinde tolerans analizi hakkında bir araştırma yapmıştır. Çalışma, montaj sırasında lineer en kötü durum tolerans analizini desteklemeye uygun ölçü ve toleranslar için matematiksel bir model sunmaktadır. Model, ağırlıklı (etiketli) bir graf olarak temsil edilen mekanik bir parçanın tolerans tanımını belirlemeye

olanak sağlamaktadır. Tolerans analizi, graftaki bir yolun ağırlığının hesaplanması suretiyle gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, bireysel parçaların graf-larının aynı tarzda birleştirilmesiyle bir montaj grubu için de oluşturulmaktadır. Geliştirilen teori, prototip bir sistemde bir bütün halinde toplanmıştır.

S. Konakalla ve P. Gavankar (20), tolerans diyagramı projesini tam otomatik hale getirmek için bir şema sunmaktadırlar. Bu şemayı desteklemek için TOLCHAIN (Tolerans Zinciri) adı verilen nesnel uyarlı bir veri tabanı oluşturmuşlardır. TOLCHAIN veri tabanı, ortalama işleme toleransı değerlerini otomatik olarak belirlemek için tolerans diyagramlarında gerekli tüm bilgiyi saklamaktadır. Parçanın sınır temsilli bir model olarak saklandığı kabul edilmektedir. Ortalama işleme toleransları bu modelden otomatik olarak türetilmektedir.

Ngoi, Agarwal ve Chua (21), bir iş parçasının veya montajın tüm üretim aşamalarında üretim ölçülerinin temsili için, grafik bir metot olarak kullanılan tolerans diyagramlarını, resim üzerinde belirtilen ölçü ve toleransların sağlanmasını kontrol eden ve dengeleyen ara bir kontrol sistemi olarak ele almaktadırlar. Genellikle münferit parçaların ölçü problemlerinde kullanılan tolerans diyagramlarının, montaj uygulamalarında oldukça zahmetli ve sıkıcı bir yöntem olduğunun ispatlandığını vurgulayan araştırmacılar, tolerans grup analizleri için basit ve sistematik bir yaklaşım sunmuşlardır. “Düğümlü Graf Metodu” olarak adlandırdıkları metot, verilen ve bilinmeyen ölçülerin temsil edilmesi üzerine yapılandırılmıştır. Daha sonra bu model kullanılarak grubun çözümüyle ilgili lineer denklem için bağlantılar kurulmuştur. Bu denklem, tolerans grup analizi modülünü tanımlamaktadır. Metot, geometrik ölçülendirme ve toleranslandırma örnekleriyle açıklanmıştır.

Tolerans diyagramı, üretimlerinin tüm aşamalarında bir parça veya montaj grubunun işleme ölçülerinin temsili için grafik bir metottur. Kendi aralarında bağlantılı tolerans zincirleri içeren, işlenmesi sırasında tolerans dizilimini kontrol etmek için kullanılır. Tolerans modelinin oluşturulması ise oldukça karmaşık bir işlemdir. Ngoi, Agarwal ve Cgua [22], tolerans grubu analiz işlemi için basit ve sistematik bir yaklaşım hedeflemişlerdir. Model, verilen ve bilinmeyen ölçüleri temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Sunulan metot,

“genel kapsül” olan adından da anlaşılacağı gibi, tolerans gruplarında ilişkili görülen tüm eksen ve yüzey tiplerini bir kapsül içinde dikkate alır. Linkler, ilgili grup yolunun lineer denklem şeklinde formülüne edilmesini sağlayan model kullanılarak daha sonra oluşturulmuştur. Değişik geometrik ölçülendirme ve toleranslandırma örnekleri kullanılarak açıklanan metot, geneldir ve uygulanması basittir.

Ngoi ve çalışma arkadaşları, modellerindeki lineer programlama problemlerini çözmek için LINDO yazılımını (23, 24, 25, 26) kullanırken, non-lineer optimizasyon problemlerin çözümünde ise, PROFORT yazılımını (27) kullanmışlardır.

Geometrik ölçülendirme ve toleranslandırma (GDT), ürün tasarımı aşamasında, parça gruplarının işlevini belirlemek için önemli bir rol oynamaktadır. Parçaların tolerans bölgesine uygunluğunu sağlamak için “Tolerans Grup Analizi” kullanılır. Geometrik toleransların hesaplanması çok karmaşık olduğundan, grup analizi yapmak zaman alıcı bir işlemdir. Ngoi, Lim ve diğerleri (28), bu toleransları formülüne etmek ve bir koordinat tolerans sisteminde iki taraflı (bilateral) eşit ifadelerle dönüştürmek için bir teknik sunmuşlardır. İfadelerin etkinliği bir örnek üzerinde gösterilmiştir. Bu ifadelerin kullanımı nispeten daha az zaman alıcı olmakta ve basit ve doğrudan uygulama imkanı sağlamaktadır. Sonuçların hassasiyeti ve güvenilirliği gösterilmiştir.

Aynı araştırmacılar, tolerans grup analizi metodolojisini basitleştirmek için, “Catena Metodu” olarak bilinen, kullanımı kolay grafiksel bir yaklaşımı, “Biçim Kontrolünde Geometrik Özellikler İçin Montaj Tolerans Grup Analizi - Catena Metodu” isimli çalışmalarında kullanmışlardır. Söz konusu metodun kullanılması, çözümlerde karmaşık matematiksel formüllerin türetilmesine ihtiyaç göstermemektedir. Önerilen metodun geçerliliği üç ayrı örnek üzerinde gösterilmiştir (29).

Ngoi, Lim ve Ong’un (30), önerdiği diğer bir metot, unsurların “Nexus Hücreleri” olarak isimlendirilen grafiksel temsillerini oluşturmaktadır. Hücreler, unsurlara ait tüm geometrik bilgileri sayısal değerler olarak içermektedir. Her unsurun bir Nexus hücresiyle temsil edilmesinden sonra, parça için hücreler bir Nexus Modeli formunda birbirine bağlanır. Model, tamamlandıktan sonra parçayla ilgili GDT

problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Metot, aynı zamanda, montaj gruplarına da uygulanabilmektedir. Çalışmada, uygulama örnekleri sunulmuş ve elde edilen sonuçlar geleneksel grup formu metoduyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

“Tolerans Analizi” ürünün kalitesini garanti altına alan en önemli metot olarak görülmekte olup, birlikte çalışan parçaların alıştıırılması ve montaj sırasında en aza indirgenmiş tolerans birikimleriyle daha yüksek ürün kalitesi hedefini gerçekleştirmek için kullanılan ve çeşitli analiz yöntemlerini içeren bir kavramdır. Analiz yöntemlerinin çeşitliliği önemli boyutlarda olup, bu makalede ele alınan genel metotlar ile tolerans diyagramı ve graf teorisi yaklaşımı kullanan çalışmalarla ilgili değerlendirme sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Tolerans analizinin amacı, ürün boyutlarının bir fonksiyonu olan herhangi bir büyüklüğün değişkenliğini belirlenmektedir ve bu büyüklükler “tasarım fonksiyonu” olarak değerlendirilir.
- Tolerans fonksiyonları genelde karmaşık olup formülasyonları tolerans analizinin en zor parçası konumundadır ve oldukça zaman alıcıdır. Bu sebeple son yıllarda bilgisayar destekli tolerans analizi çalışmaları büyük bir ivme kazanmıştır.
- Tolerans analizinde en yaygın kullanılan geleneksel yöntemler, “aritmetik en kötü durum metodu (AEKDM)”, “istatistiksel en kötü durum metodu (İEKDM)”, “mon-te carlo simülasyon matodu (MCSM)”, “tolerans diyagramı ve graf teorisi” yaklaşımlarıdır.
- AEKDM, ölçülerin sınırlarını tolerans hesaplarına taşımak için kullanılır. Bu metodun kullanılmasıyla F hakkındaki tolerans bilgisi, bireysel ölçülere tekabül eden bilgilerin eklenmesi ve/veya çıkarılmasıyla elde edilir.
- İEKDM, tolerans analizi gerçekleştirmek için AEKDM’nda olduğu gibi ölçülerin sınırlarını kullanır. Aritmetik metodların farkı bir montajdaki parçaların ölçülerinin bir olasılık dağılım eğrisiyle izlenmesi, yani son montaj ölçülerinin

frekans dağılım eğrisinin bir olasılık dağılım eğrisiyle izlenmesi esasına dayanmasıdır. Hem parti üretimi hem de seri üretim için kullanılır. Takım aşınması, tezgah şartları, rastgele hatalar vb. üretim şartlarındaki değişkenlere müsaade eder. Tolerans sınırlarının arttırılması ve bu yüzden üretim hassasiyetinin azaltılmasıyla üretim verimliliğini arttırır.

- AEKDM ve İEKDM, sadece lineer tasarım fonksiyonlu kapalı döngü ölçü dizileri için geleneksel toleranslara uygulanabilir. Bu fonksiyonlar karmaşık ve non-linear olduğunda daha az anlaşılır bu metotlar yerine Monte Carlo Simülasyonu metodu’nun kullanmak daha yaygındır. Monte Carlo Simülasyonu metodu, kesin bir tasarım fonksiyonu gerektirmeden geometrik tolerans analizi yapabilmektedir (yaygın kullanılan bu metodun daha geniş değerlendirilmesi, bu makalenin devamı niteliğindeki ikinci çalışmada ele alınacaktır).
- Tolerans diyagramları, yarı grafiksel bir metot olup, nihai fonksiyon üzerinde tolerans analizi gerçekleştirmek ve tasarım fonksiyonlarını formülize etmek için kullanılır. Bu metot, sadece tek görünüşle ifade edilebilen problemlere değinmekle birlikte bilgisayar destekli tolerans uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Tolerans diyagramı metodu, DFM/CE ortamında işlem planlaması için ürün tasarımı amacıyla yaygın kullanılan yazılım paketleriyle birlikte kullanılır. Bilgisayar desteği için pek çok model ve metot bulmak mümkündür.
- DFM/CE ortamında bir tasarım değişikliğine uygun cevabın süratle verilmesi esastır. Tolerans diyagramının yeniden oluşturulması uzun zaman alacağından, bu problemin çözümü için, tasarım ve üretim arasındaki boyutsal ilişkileri kullanarak hızlı çözüm sağlayan “Digrafik Metot” kullanımı yaygındır.
- Digrafik metottaki üç ağaç yapı ile ileri ölçü zincirlerinden oluşturulan matrisler kullanılarak tasarımdaki değişiklikten kaynaklanan problemlerin, DFM/CE or-

tamında ihtiyaç duyduğu gibi, süratle bilgisayar ortamına aktararak çözümü mümkündür.

- Literatür araştırması, tolerans diyagramı analizi, işlemeyle ait ölçülerin toleranslardaki ortalama değeri hesaplamak için işlem planlamacıların kullandığı etkili bir tekniktir.
- Pek çok araştırmacı dikkatlerini tolerans diyagramı analizi üzerinde yoğunlaştırırken, set-up planlaması ve set-up referanslarının belirlenmesini ihmal etmektedirler. Literatürde, bu eksikliği tamamlamak ve set-up planlama için, tolerans diyagramları tekniğine dayanan sistematik yaklaşımlar da geliştirilmiştir.
- Graf tabanlı yaklaşımlarda, graftaki bir yolun ağırlığının hesaplanması ile tolerans analizi gerçekleştirilmesi ve münferit parçalara ait grafların aynı tarzda birleştirilmesi ile montaj gruplarına da uygulanması mümkündür.
- Tolerans grup analizine basit ve sistematik yaklaşımlar getirmek için, araştırmacılar tarafından ortaya konan farklı yöntemler mevcuttur. Verilen ve bilinmeyen ölçülerin temsiline dayalı “Düğümlü Graf Metodu”, tolerans gruplarında ilişkili tüm eksen ve yüzey tiplerini ortak bir kapsül içinde dikkate alan “Genel Kapsül” yaklaşımı, unsurlara ait tüm geometrik bilgileri ve sayısal değerleri içeren ve unsurların grafiksel temsillerini ihtiva eden hücreleri kullanan “Nexus Modeli”, çözümlerde karmaşık matematiksel formüllerin türetilmesine ihtiyaç göstermeyen “Catena Metodu” bu yöntemlerden bazılarıdır.

Endüstride, tolerans analizine ilgi, hızla artan bir eğilim göstermektedir. Araştırmalar, üretilen ürünün performansı ve maliyetindeki değişimlerin etkilerine odaklanmış kalitenin temini içindir. Bu sebeple, tasarımdaki her unsur ve ölçü üzerindeki tolerans sınırlarının belirlenmesi elzem bir tasarım fonksiyonu olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

#### KAYNAKLAR

1. Zeid, I., CAD/CAM Theory and Practice, McGraw-Hill, Inc. USA, 1991.

2. Evans, D.H., Statistical Tolerancing: The state of the Art, Part I, Journal of Quality Technology, 6, 4, 188-195, 1974.
3. Wade, O.R., Tolerance Control in Design and Manufacturing, Industrial Press, New York, 1967.
4. Bjorke, O., Computer-Aided Tolerancing, Apir Publisher, Trondheim, Norway, 1978.
5. Ji, P., Lau, K.H., Design for Manufacturing: A Dimensioning Aspect, Journal of Materials Processing Technology, 91, 3, 121-127, June 1999.
6. Ahluwalia, R.S., Ji, P., Process Planning in Concurrent Engineering Environment, International Eng. Conference Proceedings, 535-540, San Francisco, May 20-23, 1990.
7. Ji, P., Fuh, J.Y.H., Ahluwalia, R.S., A Diagrammatic Approach for Dimensional Chain Identification In Design And Manufacturing, ASME, 118, 539-544, 1996.
8. Ji, P., Computer Aided Operational Dimensions Calculation, Master Thesis, Beijing University of Aeronautics and Astronautics.
9. Wade, O.R., Tolerance Control, T.J. Dorzda, C. Wick (Eds) Tool and Manufacturing Engineers Handbook, The Society of Man. Eng., 1, 1-60, Dearborn, Michigan, 1983.
10. Ji, P., A Tree Approach for Tolerance Charting, Int. J. of Prod. Re., 31, 1023-1033, 1993.
11. He, J.R., Lin, G.C.I., Computerised Trace Method for Establishing Equations for Dimensions and Tolerance in Design and Manufacture, Int. J. of Adv. Man. Tech., 7, 210-217, 1992.
12. Irani, S.A., Mittal, R.O., Lehtihet, E.A., Tolerance Chart Optimisation, Int. J. of Prod. Research, 27, 1531-1552, 1989.
13. Ngoi, B.K.A., Fang, S.L., Computer Aided Tolerancing Charting, Int. J. of Production Research, 32, 1939-1954, 1994.
14. Xiaoging, T., Davies, B.J., Computer Aided Dimensional Planning”, International Journal of Production Research, 26, 283-297, 1988.
15. Çavdar, K., Bilgisayar Destekli Tolerans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ

- Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü, 1993.
16. Ping, J.I., Mingyang, K.E., Ahluwalia, R.S., Computer-Aided Dimensioning for Process Planning, *Int. Journal of Mach. Tools Man.*, 35, 10, 1353-1362, 1995.
  17. Ping, J., Automatic Tolerance Assignment approach For Tolerance Charting, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9, 6, 362-368, 1994.
  18. Zhang, H.C., Huang, S.H., Mei, J., Operational Dimensioning And Tolerancing In Process Planning: Setup Planning, *International Journal of Prod. Research*, 34, 7, 1841-1858, 1996.
  19. Juster, N. P., A Graph Based Approach To tolerance Analysis, Doktora Tezi, University of Leeds, 1988.
  20. Konakalla, S., Gavankar, P., Object-Oriented System For Tolerance Charting, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8, 4, 239-250, 1997.
  21. Ngoi, B.K.A., Agarwal, M., Chua, C.S., Noded Graph Approach to Stack Analysis, *International Journal of Advanced Manufacturing*, 14, 5, 343-349, 1998.
  22. Ngoi, B.K.A., Agarwal, M., Chua, C.S., The Generic Capsule Approach to Tolerance Stack Analysis, *International Journal of Production Research*, 36, 12, 3273-3293, 1998.
  23. Ngoi, B.K.A., Gob, L. C., 'Stepper' Approach to Tolerance Charting, *Proc. of The Institution Of Mechanical Engineering Part B: J. of Eng. Man.*, 211, B7, 539-546, 1997.
  24. Ngoi, B.K.A., Tan, C. S., Graphical Approach To Tolerance Charting – A 'Maze Chart' Method, *International Journal of Advanced Manufacturing*, vol.13, n.4, 282-289, 1997.
  25. Ngoi, B.K.A., Min, O. J., Concurrent Tolerance Charting For Component and Assembly Using 'Modified Tree' Approach, *Int. J. of Advanced Man.*, 13, 10, 729-737, 1997.
  26. Ngoi, B.K.A., Cheong, K. C., Apparent Path Tracing Approach To Tolerance Charting, *International Journal of Advanced Manufacturing*, 14, 8, 580-587, 1998.
  27. Ngoi, B.K.A., Agarwal, M., Chua, C.S., Nonlinear Optimization in Tolerance Chart – A Study Of Objective Functions, *Int. Journal of Advanced Man.*, 14, 6, 423-427, 1998.
  28. Ngoi, B.K.A., Lim, L. E. N., Ong, A.S., Lim, B. H., Applying the Coordinate Tolerance System to Tolerance Stack Analysis, *Int. Journal of Advanced Man.*, 15, 6, 404-408, 1999.
  29. Ngoi, B.K.A., Lim, L. E. N., Ang, P.S., Ong, A.S., Assembly Tolerance Stack Analysis for Geometric Characteristics in From Control – The 'Catena' Method, *International Journal of Advanced Manufacturing*, 15, 4, 292-298, 1999.
  30. Ngoi, B.K.A., Lim, B. H., Ong, A.S., Nexus Method For Evaluation Geometric Dimensioning and Tolerancing Problems With Position Callout, *Proceeding of The Institution Of Mechanical Engineering Part B: J. of Eng. Man.*, 214, 3, 253-241, 1999