

Bilgisayar Yardımıyla Tolerans Seçimi Kavramı ve Eğitim Amaçlı Bir Tolerans Seçimi Yazılımı

Bahadır Ateş
Y. Lisans Öğrencisi

Can Çoğun
Doç. Dr.

Makina Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi
06570 ANKARA

Bu çalışmada, bilgisayar yardımıyla tolerans seçimi tekniklerinin son 10 yılda gösterdiği gelişim incelenmiştir. Taranan çalışmalarda kullanılan tolerans seçim teknikleri üç gruba ayrılmış (tolerans zincir tekniği, tasarımın analizi ve sentezi tekniği ve maliyet-tolerans algoritması tekniği) ve yapılan çalışmalar bu başlıklar altında özetlenmiştir. Ayrıca, bu çalışmanın yazarları tarafından dBASE IV veritabanı yazılımı kullanılarak toleransların seçimi için geliştirilen ve eğitim amaçlı olarak halen kullanılmakta olan bir yazılımın çalışma sistematigi, yazılım esasları ve örnek çıktıları verilmiştir.

GİRİŞ

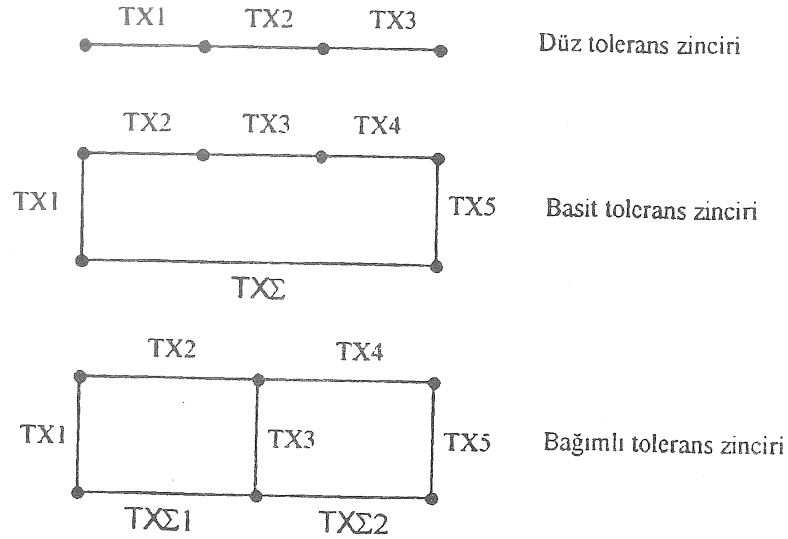
Günümüz teknolojisinde varolan imal usulleri ve tezgahlarla mükemmel ölçülerin elde edilmesi mümkün olmadığından imal usullerinden ve tezgahlardan gelen kısıtlamalar ölçülere tolerans bilgisi ilave edilerek giderilir. Tasarım gereksinimlerinin imalatçı tarafından doğru anlamlandırılıp doğru imalatın yapılabilmesi için endüstride geometrik ölçülendirme ve toleranslandırma için bir metot geliştirilmiştir. Bu metot bazı kurallardan, sembollerden ve bunların gösteriminden oluşmaktadır. Toleransların ifadesi için birçok standartlar bulunmaktadır. Örneğin Amerikan Milli Standartlar Enstitüsünün ANSI 14.5M 1982 [1] nolu yayınında ölçülendirmede kullanılan toleransların gösterilmesi ile ilgili kabul edilmiş metodlara yer verilmiştir (en büyük ve en küçük ölçünün yazılması veya anma ölçüsünü takiben artı ve eksi işareti kullanarak toleransın belirtilmesi gibi) [2]. Parçaların ölçülendirilmesinde kullanılacak toleransların bulunmasında esas alınan tolerans tabloları (tolerancing charts) ise 1950'lerden bu yana kullanılmaktadır. 1950'li yıllarda bu tablolar daha çok uçak ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktaydı [3, 4]. Araştırmacılar bu dönemlerde tablo tekniğinin basitleştirilebilmesi için çeşitli yöntemler ileri sürdüler [5-8]. Sack'ın çalışmasının [9] yayınlandığı 1982 tarihine kadar tolerans tablo tekniği zaman alıcılığı ve hatalara açık olma özelliğini devam ettirdi. 1980'li yıllarda bilgisayar teknolojisinin gösterdiği büyük gelişim imalat teknolojisini de etkiledi. Sack'ın bilgisayarlı çalışmasında tolerans tablolarının otomatik işlem planlamasında (automatic process-planning) yazılımın bir parçası olarak yer alması, günümüzde bilgisayarlı tolerans tablo tekniği veya tolerans zinciri tekniği dediğimiz

yeni yöntemin ilk kullanımı olarak kabul edilir. Yine aynı yılda Lagodimas ve Scarr'ın [11] bilgisayar yardımıyla geçmelerin seçimi için hazırladığı işlem sırası diyagramı bu konuyla ilgili ilk girişimlerden sayılır.

Bu çalışmanın, 2, 3 ve 4 nolu bölümlerinde, bilgisayarlı tolerans seçimi teknikleri ile ilgili şimdiye kadar yayınlanan makalelerin tolerans zinciri tekniği, tasarımın analizi ve sentezi tekniği, maliyet-tolerans algoritması ve tasarımı tekniği başlıkları altında sınıflandırılıp incelenmesi yer alacaktır. 5 ve 6 nolu bölümlerde ise yazarlar tarafından geliştirilen ve dBASE IV veritabanı yazılımı kullanılarak hazırlanmış bir tolerans seçimi programının çalışma sistematigi, yazılım özellikleri ve örnek çıktıları verilecektir.

TOLERANS ZİNCİRİ TEKNİĞİ

Tolerans zinciri tekniği yüzyılın başından beri varlığı bilinen ancak zaman alıcılığı ve hata olasılığının yüksekliği açısından, bilgisayarların yaygın kullanımının başlamasına kadar yaygınlaşmamış bir yöntemdir. Björke [10] bilgisayarlı tolerans zinciri ile ilgili kitabında, kendisi tarafından geliştirilen endüstriyel uygulamalarda toleransları hesaplayan etkileşimli yazılımdan (TOLTECH) bahsetmiştir. Burada zincir kavramı birbirini ardaşık takip eden ölçü elemanları anlamında kullanılmıştır. Bu sistemde her ölçü elemanı kendinden önceki ve sonraki ölçü elemanına bağlıdır (zincir yapı). Şekil 1'de Björke tarafından tanımlanan düz, basit ve bağımlı tolerans zincirleri gösterilmektedir. Bu teknikte toleransların doğruluğunun kontrolü ölçülerin matematiksel toplanması esasına bağlıdır. Genelde mekanik montajlarda bazı ölçüler montajın işlevlerini diğer ölçülerden daha fazla etkilerler. Bu tür kritik ölçüler işlevsel ölçü (functional dimension) veya toplam ölçü (sum



Şekil 1. Björke [10] Tarafından Tanımlanan Tolerans Zinciri Tipleri.

dimension) olarak adlandırılır ve $TX\Sigma$ olarak gösterilir (Şekil 1). Bu kritik ölçüler hesaplamada esas alınır ve diğer tolerans elemanları bu değeri (değerleri) sağlayacak şekilde biraraya getirilir. TOLTECH yazılımının zayıf yönlerinden biri tolerans hesaplamasında işlem kısıtlamalarını (process capability constraints) gözönüne almamasıdır. Ahluwalia ve Karolin [12] geliştirdikleri CATC (Computer-Aided Tolerances Control) adlı yazılımda işleme toleranslarının hesaplamasını bir tür grafik teknik kullanarak yapmışlar ve analiz neticelerini bilgisayar çıktısı tablolar (charts) şeklinde sunmuşlardır. Bu yazılımın zayıf tarafı ise programın bir optimizasyon modeline sahip olmamasıdır. Davies ve Xiaoqing [13] çalışmalarında tolerans zinciri esaslı matriks-ağaç zinciri metodundan faydalanmışlar ve bilgisayarın her aşamada hesapladığı tolerans değerlerini tekrar yazılıma girerek gerekli ayarlama ve düzeltmeleri yazılıma yaptırmışlardır. Bu yazılımda kaynak tablolara ve tecrübeye dayalı ilk (başlangıç) tolerans değerleri kullanıcı tarafından girilmekte, daha sonra bu değerler yazılım tarafından imalat gereksinimlerine göre değiştirilmektedir. Bu yazılım sadece 2-boyutlu problemler için geliştirilmiş olup, 3.cü boyuttaki açılı yüzeylerin (elemanların) toleranslarının hesaplanmasında yetersizdir. Zang [14], hassas imalat için geliştirdiği bilgisayar yardımıyla işlem planlaması (CAPP) yazılımında da ölçülerin ve toleransların hesaplanmasında tolerans zinciri tekniğini kullanmıştır. Bu yazılım, tolerans

zinciri tekniğini 3-boyutta grafiksel olarak kullanarak tüm işleme operasyonları için ölçüleri, toleransları ve payları bulmaktadır. Irani, Mittal ve Lehtihet [15] 'in çalışmaları ise tolerans tablolarının optimizasyonunu sağlama açısından en yapıcı çalışmalardan biridir. Bu çalışmada, toleransların yerleştirilmesinin optimizasyonu doğrusal programlama (linear programming) modeli ile yapılmakta olup programın amaç fonksiyonu (objective function) tüm parçadaki ölçü ve toleransları gözönüne alarak parçadaki olası boşlukları (slacks) en aza indirmeye çalışmaktadır. Bu yazılım, bulunan tolerans değerlerine göre işleme yöntemini ve tezgah tipini seçen bir maliyet modeli de içermektedir. Zhang ve Mei [16], Irani, Mittal ve Lehtihet'in çalışmalarındaki eksiklikleri; ölçü ve toleransların bulunmasında NC (sayısal denetimli) tezgahların ayarlarının, referans elemanlarının, her işlenecek ölçü için başlama ve bitme noktalarının koordinatlarının, hassasiyet gereksinimlerinin karşılanabilmesi için bağlama aparatlarının kullanımının yazılıma bilgi olarak girilmemiş olması şeklinde sıralamışlardır. Zhang ve Mei çalışmalarında çözüm detaylarını vermemekle birlikte bu kısıtlamaların kendilerinin yapmış olduğu bilgisayar yardımıyla işlem planlaması programında giderildiğini ifade etmişlerdir [16]. 2-boyutta tolerans hesaplama için hazırlanan Weill ve Bourdet [17]'in geliştirdiği yazılım oldukça kapsamlı olup endüstriyel kullanımı sağlayabilmek için mikro-bilgisayarlarda kullanılabilir şekilde tasarlanmıştır. Bu yazılımda kullanılan teorinin

klasik tolerans zinciri teorisinden farklı yönü işleme toleransları yanında ölçülerin konum toleranslarının da gözönüne alınmasıdır. Bu farklılık ise toleransları etkileyen işleme hataları, tezgah ayar hataları, iş parçası bağlama ve konumlandırma hataları ve takım aşınması gibi faktörlerin hesaba katılmasını mümkün kılmaktadır.

MALİYET-TOLERANS ALGORİTMALARI

Wu ve Elmaraghy [18] çalışmalarında, imal edilecek parçaların tasarım toleranslarının, üretkenliğin artırılmasında, ürün kalitesinin denetiminde ve tasarrufun sağlanmasında taşıdığı önemi vurgulamıştır. Yazarlar çalışmalarında sekiz tolerans analiz modelini ve beş maliyet-tolerans fonksiyonu modelini (Sutherland fonksiyonu, ters kare fonksiyonu, eksponansiyel fonksiyon, Michral-Siddall fonksiyonu gibi) tanıtmışlardır. Chase ve Greenwood [19, 20] ise çalışmalarında tolerans analizine daha çok tasarımcı açısından ağırlık vermişlerdir. Toleransların belirlenmesi ile ilgili çalışmalarında, Lagrange çarpanları (multipliers), maliyet-tolerans fonksiyonunun optimizasyonu gibi teknikler kullanılmış olup, yazarlar daha ileri seviyeli bir tolerans analizi ve optimizasyonu için işleme kabiliyetleri ve maliyetleri arasındaki ilişkilerin kalite kontrol teknikleri ile bulunup yazılıma girilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Dong ve Soom [21], optimum tasarım toleranslarının bulunabilmesi için kapsamlı bir üretim maliyet modeli geliştirmişlerdir. Bu model ölçü zincirinin minimum maliyeti esasına göre formüle edilmiştir. Modelde kullanılacak olan üretim bilgisinin sınıflandırılmasında ve modele girilmesinde, kullanılacak üretim-maliyet tolerans ilişkilerinin seçilmesinde ve son safha olarak tasarım toleranslarının bulunmasında bir uzman sistem (expert system) kullanılmıştır. Model ve uzman sistemin kullanımı örnek bir tasarım probleminde gösterilmiştir. Oswald ve Blake [22] parça maliyetinin tolerans değerlerinin bir fonksiyonu olarak tanımlandığı yeni bir metot geliştirmiştir. Bu yaklaşımda, girilen her tolerans değeri için modelden bir maliyet değeri hesaplanmakta, daha sonra bu bilgiler başka araştırmacılar tarafından geliştirilen ve halen kullanılan maliyet-tolerans fonksiyonu eğrilerinin üzerine çizilmekte ve hangi eğrinin (fonksiyonun) kendi modellerine daha yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Aynı çalışmada imal usullerinin değişik yönlerinin maliyet-tolerans modelleri içine dahil edilmesinin yolları anlatılmıştır. Kim ve Knott [23] ise en düşük maliyetli tolerans zincirinin

oluşturulabilmesi için bir Pseudo-Boolean yaklaşımı kullanmıştır. Bu yaklaşımda tolerans değerleri iki yönden analiz edilmektedir. Bunlardan birincisi Ostwald ve Huang [24] tarafından geliştirilen tamsayı programlama (integer programming) yaklaşımını kullanarak yapılan aritmetik incelemedir. İkincisi ise montajdaki parçaların toleranslarının doğal değişimidir (varyans). Böylece model hem aritmetik hem de istatistik unsurları taşımaktadır. Michael ve Siddal [25, 26] ise imal usullerinde kullanılacak optimum toleransların seçilebilmesi konusu üzerinde çalışmıştır. Çalışmalarında, üretim maliyetini en aza indirgeyebilmek için toleranslarla ilgili mühendislik sisteminin düzensiz (random) değişkenlerine alt ve üst sınırlar konulmuştur. Ayrıca bu çalışmada sistemden (imalattan) çıkacak hurda miktarının önceden isabetli tahmin edilmesinde kullanılabilir olan hücre tekniği (cell technique) tanıtılmıştır. Sayed ve Kheir [27]'in geliştirdiği yazılımda, minimum maliyetli toleransları bulmak için yazılıma parçanın geometrisi, parçanın anma ölçüleri, toleranslarla ilgili maliyet bilgileri girilmekte, çıktı olarak da parçanın tümü için en düşük maliyeti veren tolerans seti elde edilmektedir. Yazarlar, geliştirdikleri tekniği ve yazılımı tanıtabilmek için örnek olarak elektronik endüstrisinde kullanılan bir parçayı vermişlerdir. Zhang ve Wang [28], tasarım ve imalat toleranslarının seçiminde daha çok işleme yöntemi (tezgah) seçeneğinden bilgi alan, doğrusal olmayan (nonlinear) bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, en az maliyet amaç fonksiyonu kullanılarak aynı anda tasarım toleranslarının, toleransların yerleştirilmesinin ve imal usulü seçiminin optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Optimizasyon modelinde simülasyon algoritması (simulation annealing) kullanılmıştır [29, 30]. Kapur ve Raman [31] toleransların tasarımında kalite kayıp fonksiyonu (quality loss function) yaklaşımını kullanmışlardır. Bir parçanın kalite özelliğinin, kalite kayıp fonksiyonu ile ifade edilmesi ilk defa Chen ve Kapur [32] ve Taguchi [33] tarafından önerilmiştir. Bu çalışmalarda kayıp, daha çok parçanın boyut bozukluklarının, parçanın imal süresinin uzunluğunun (parçanın kullanımdan uzak olduğu süre), parçanın imali sırasında meşgul edilen tezgahların sayılarının ve zamanlarının, tezgahların bozulma/bakım sürelerinin, parçaların hurdaya ayrılma ihtimallerinin bir analitik eşitlikte yerine koyularak bir kayıp indeksinin bulunması anlamındadır. Kapur ve Raman bu analitik eşitlikleri (fonksiyonları) parçanın maliyetini

verecek şekilde değiştirmiş ve bu fonksiyonların optimizasyonu sağlayacak bir algoritma hazırlamıştır. Çalışmada kalite kayıp fonksiyonunun kuadratik formda olması halinde optimizasyonun, fonksiyonun ilk iki momentü alınarak yapılması gerektiği belirtilmiştir. Ancak geliştirilen fonksiyon ve yaklaşım gerçek bir tasarım problemine uygulanmamıştır. Fainguelernt [34] diğer araştırmacılarından farklı olarak yazılımını mikrobilgisayarlar için geliştirmiştir. Yazılım, boyutların ayarlanması, boyutların konumlanması, işleme toleranslarının hesaplanması yanında, fonksiyonel gereksinimleri ve tezgah kabiliyetlerini gözönüne alarak tolerans aralıklarının optimizasyonu için strateji önerebilmektedir. Program etkileşimli olarak çalışmakta olup boyut toleranslarının seçilmesinde yardımcı olmak üzere küçük bir veritabanı ve bir grafik ekranla teçhiz edilmiştir. Yazılımın kısıtlamaları ise 3-boyutlu modelleme yapamaması ve geometrik toleransları gözönüne almamasıdır [34]. Stantsikopoulos [35] yazılımında maliyet ile tolerans arasında analitik bir fonksiyona dayalı yeni bir maliyet optimizasyonu kullanmıştır. Modelden çıkan maliyet bilgilerinin İngiliz Maliyet Bilgi Standartlarına (British Standard Cost Data) uygunluğu kullanılan analitik fonksiyonun doğruluğunu vurgulamaktadır. Benzer bir çalışmada He [36] maliyet ve toleranslar arasında 3 farklı analitik amaç fonksiyonu önermiş ve bu fonksiyonları kendi geliştirdiği maliyet optimizasyon modülü içinde kullanmıştır. Program en ekonomik toleranslar yanında, girilecek tasarım gereksinimlerine ve imal usullerine göre en ekonomik olacak boyutları da verebilmektedir.

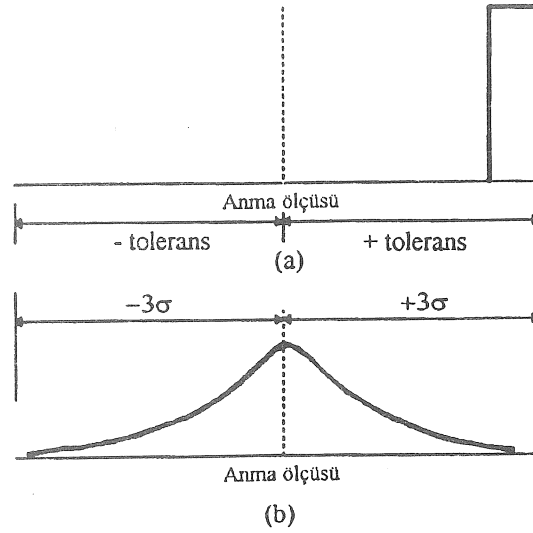
TOLERANS ANALİZİ VE SENTEZİ TEKNİĞİ

Tolerans analizi ve sentezi tekniği, toleransların hesaplanmasında veya seçilmiş toleransların analizinde istatistik yöntemlerin ve bilgilerin ağırlıklı kullanımını içeren bir tekniktir. Toleransların analizi ile ilgili olarak en yaygın bilinen iki teknik (en kötü durum (worst case) ve kareler toplamının kökü (root sum squares teknikleri) Greenwood ve Chase [20] tarafından detaylı olarak ele alınmıştır (Şekil 2). Greenwood ve Chase [37] en kötü durum (tüm parçalar tolerans limitine yığılmış) ve kare toplamının kökü (parçalar anma ölçüsü ortalamasında normal dağılmış) tekniklerinden elde edilecek değerleri en uç durumlar olarak kabul edip, bu iki durum arasında değer verebilecek her türlü simülasyon modelinin genel modeli büyük çapta

geliştirebileceğini ileri sürmüştür. Bu mantığı esas alarak tolerans analizinde kullanılmak üzere geliştirdikleri ve toleransların tek modeli (unified model of tolerances) adını verdikleri yeni analiz modellerinde, işleme yöntemlerinden elde edilebilecek tolerans ortalama değerlerinin gösterdiği sapmaları (kaymaları) da hesaplayabilmektedirler.

Bilgisayar tolerans simülasyon yazılımlarının en tanınmışlarından biri Lehtühet ve Dindelli [38] tarafından geliştirilen TOLCON adlı yazılımdır. TOLCON'un yazılım algoritmasında, parçanın işlevsel gereksinimleri ile ölçü ve toleransları arasındaki ilişkiler matematiksel eşitlikler şeklinde ifade edilmiştir. Yazılıma bağlı bir veritabanında, ölçülerin ve imal usullerinden elde edilecek toleransların stotastik modellemesi için istatistik model fonksiyonları bulunmaktadır. Yazılım, modellemeyi takiben istatistik değişkenlerin bir arada hesaba sokulabilmesi için Monte Carlo simülasyonu yapmakta ve sonuçları grafiksel olarak vermektedir [38]. Toleransların analizi ve sentezi tekniği ile ilgili çalışmalardan bir diğeri Lee ve Woo [39] tarafından toleransların yığılma koşulunu (stack up condition) sağlamak üzere geliştirilen tolerans yerleştirme modelidir (Şekil 3). Modelin genel amacı, parça maliyetini istatistiki analiz ve sentez metotları kullanarak en aza indirmektir. Aynı yazarlar diğer bir çalışmalarında [40] toleransların yığılma koşulunu yerine getirecek ve farklı imal usullerini kullanarak optimum toleransları seçebilecek yeni bir yaklaşım (branch and bound) kullanan bir yazılım geliştirmişlerdir.

Yukarıda 2, 3 ve 4'de bahsedilen bilgisayarlı tolerans seçimi tekniklerine göre sınıflandırılmayan ancak bahsetmeye değer diğer bir çalışma ise Manivannan ve Egbelu [41] tarafından geliştirilen ROSCAT adlı uzman (expert) yazılımdır. Bu yazılım IBM4381 sisteminde LISP(VM) dilinde hazırlanmış olup, sadece silindirik dönel parçaların geçme tiplerinin ISO standartlarına göre seçimi için kullanılmaktadır. Panchal ve Raman [42, 43]'ün benzer bir çalışmasında AutoCAD 10.0 [44] paketi kullanılarak hazırlanan teknik resimlerdeki parçaların bağlanma detayları bir uzman sistem tarafından yapılmaktadır. Bu çalışmada el kitaplarında tavsiye edilen tolerans bilgileri bir tolerans veritabanında toplanmış olup, kullanıcı ile etkileşimli bir haberleşme sonucunda boyutların toleransları otomatik olarak seçilmektedir. Hazırlanan yazılım sadece konsantrik dönel parçaların boy ve çap boyutlarının toleranslarının seçiminde kullanılabilir.



Şekil 2. Varsayılan (a) En Kötü Durum ve (b) Karelerin Toplamı Modelleri [37].

İleriye Dönük Çalışmalar

Bilgisayar yardımıyla toleransların seçimi ve optimizasyonu konusunda ileriye dönük çeşitli çalışmalara ihtiyaç olmakla beraber ilk aşamada üzerinde durulması gereken konular şu şekilde özetlenebilir:

1) Şu ana kadar yapılan çalışmaların hemen hemen hepsinde bilgisayarlı tolerans-boyut seçimi ve optimizasyonu bağımsız yazılımlarla yapılmaktadır. Bu yazılımların katı modelleme (solid modelling) tekniği kullanan CAD yazılımları ile ve bilgisayarlı işlem planlaması (CAPP) yapan programlarla biraraya getirilmesi gereklidir. CAPP programları ile bu yazılımların birleştirilmesi gerek varyant (variant) gerekse jeneratif (generative) tip işlem programlarında optimum işlem planlarının elde edilmesini sağlayacak, katı modellenen CAD programları ile beraber kullanılması ise tasarım aşamasını takip eden bilgisayarlı imalat (CAM) işleme toleranslarının etkin denetimini sağlayacaktır.

2) Geliştirilen bilgisayarlı tolerans-boyut seçimi ve optimizasyonu yazılımları genelde mini ve ana bilgisayarlarda (main frame) geliştirilmiş olup mikrobilgisayarlar için geliştirilen yazılım sayısı çok azdır. Programların endüstride yaygın kullanımını sağlamak için mikrobilgisayarda çalışan yazılımların hazırlanması gerekmektedir.

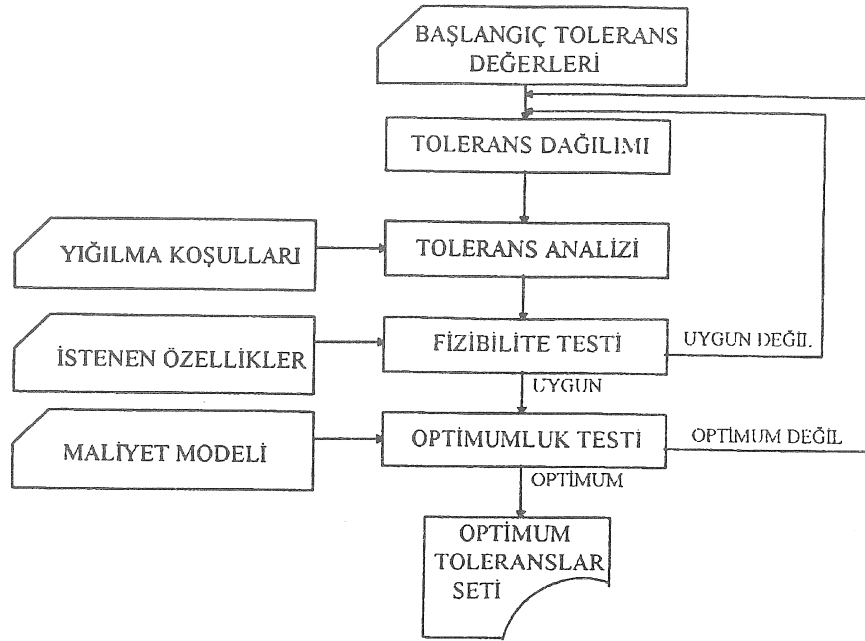
3) Günümüzde kullanılan tolerans standartlarının ve uygulamalarının CAD veritabanlarında birleştirilmesi ve bu veritabanlarının araştırmacı ve kullanıcılar

tarafından kullanılabilmesi için standart formatlara sokulması gereklidir. Bu tür bir çalışma özellikle katı modelleme ile çalışan CAD yazılımları için çok gerekli olan bir veritabanının oluşmasını sağlayacaktır.

4) Tolerans analizlerinde doğrusal olmayan (nonlinear) modeller kullanım zorlukları nedeniyle yaygınlaşmamıştır. İstatistiksel modeller ve özellikle "en kötü durum" (worst case) modelinin çözümlerinde doğrusal olmayan modellerden biri olan konveks programlama tekniği kullanılmalıdır. Bu tür doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, ardışık doğrusal programlama (successive linear programming) çözüm teknikleri önerilmektedir.

5) İstatistiksel metodların tolerans seçiminde yaygın kullanımını sağlayabilmek için imal yöntemlerinin değişkenlerinin istatistiksel anlamda belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle her farklı imal usulü kendi (istatistiksel) değişkenleri cinsinden bir modelde ifade edilmelidir. Bu modellemenin kolaylıkla yapılabilmesini sağlayacak sistematik bir metodoloji geliştirilmelidir.

6) Bahsedilen uzman sistemlerin daha da geliştirilmesi yanında sinir ağ sistemlerine (neural networks) geçişte bu sahada büyük bir ilerleme sağlayacaktır. Bilindiği gibi sinir ağ sistemlerine gerekli olan zaman ve tecrübe (eğitim) verildiğinde bu sistemler bir uzmanın kendilerine bilgi girmesine gerek duymaksızın çevre sistemlerden (domain) tüm yeni bilgileri kendi veritabanlarına aktarabilmektedir. Neticede çoğu uzmanın bilmediği birçok teknolojik bilgiyi



Şekil 3. Lee ve Woo [39] Tarafından Geliştirilen Tolerans Sentezinin Ana Şeması.

biraraya getirebilmektedir.

TOLERANS SEÇİMİ İÇİN VERİTABANI ESASLI BİR YAZILIMIN GELİŞTİRİLMESİ

Makalenin bu kısmında Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde makina parçalarının toleransların seçimi için geliştirilmiş veritabanı esaslı bir yazılımın esasları ve uygulamaları verilmiştir.

Programın Mantığı

ISO BS 4500 standartlarında, 0-3150 mm anma çapları arasındaki mil ve/veya deliklerin toleranslarını içeren ve bunlara bağlı hesaplamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiş tablolar bulunmaktadır [45]. Bunun yanısıra çeşitli kaynaklarda tecrübeye dayalı tolerans (nominal çapa göre tolerans harfi ve IT kalite sayısı) önerileri de bulunmaktadır [13, 40-43, 46-48]. Geliştirilen yazılımın amacı, çeşitli kaynaklarda bahsedilen bu önerileri sistematik olarak veritabanlarında biraraya getirmek ve veritabanlarındaki bu önerilerden faydalanıp BS 4500 standartlarındaki tablo bilgilerin bulunduğu

veritabanını kullanarak, tolerans değerlerini, en büyük ve en küçük çapları, en büyük ve en küçük boşlukları, alıştırma toleransını ve geçme tipini bulmaktır.

A) Önerilerin kullanımı: Toleransların belirlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, tecrübelerle dayalı tolerans önerileri 3 ana kısımda toplanabilir:

1. İmal edilecek parçanın kullanım alanına göre (Tablo 1),
2. Alıştırma derecesine göre (Tablo 2),
3. Kullanılan imal usulüne göre (Tablo 3).

Geliştirilen yazılım, 1, 2 ve 3 no'da belirtilen seçeneklere uygun olarak tolerans harflerini ve IT kalite sayılarını önermektedir.

B) Standart tabloların kullanımı: Kullanıcı bir makina elemanının nominal çap, tolerans harfi ve IT kalite sayısı bilgilerini biliyorsa, ISO standart tablolarının bulunduğu veritabanından yararlanarak delik ve/veya mil için yukarı ve aşağı ölçü farklarını (DYÖF, DAÖF, MYÖF, MAÖF), en büyük ve en küçük çaplarını (DEBÇ, DEKÇ, MEBÇ, MEKÇ), tolerans değerlerini, en büyük ve en küçük boşluk değerlerini (EBB, EKÇB), geçme tipini ve alıştırma toleransını (ALTOR) hesaplatır. Kullanıcı, bu bilgilere sahip değilse, yazılımın "öneriler" (A) kısmında

Tablo 1. Makina Elemanlarının Kullanım Alanlarına Göre Tolerans Önerileri [45-47].

MAKİNA ELEMANLARININ KULLANIM ALANLARINA GÖRE TOLERANS ÖNERİLERİ

- 1) Büyük tutukluk kuvveti için, dişli çark, volan ve teker göbekleri, mil flanşları .
- 2) Orta tutukluk kuvveti için, kavrama göbekleri, GG-göbekleri üzerine bronz yataklar; gövde, tekerlek ve piston kollarında yataklar için
- 3) Motor miline geçen endüviler ve göbeğe geçen dişliler. Mil üzerine geçen göbekler ve yataklar için.
- 4) Bir defaya mahsus olmak üzere makina ve elektrik motoru millerine (d=55 ile 120 mm) geçirilmiş kasnaklar, kavramalar ve dişliler için.
- 5) Kasnaklar, kavramalar, dişliler, kamalı volanlar, rulmanlı yatakların iç bilezikleri, sabit tekerlekler ve kollar için.
- 6) Kolayca çıkarılması gereken kasnaklar, dişliler, tekerlekler, yataklar ve benzeri için.
- 7) Sık sık sökülüp takılması gereken tekerler, tezgahların hareketli kısımları, yatakların dış bilezikleri, kavramalar ve boru merkezleme flanşları için.
- 8) Mil üzerinde hareket eden transmisyon hareket bilezikleri, kayış kasnakları, el tutamakları, dişliler, kavramalar, v.b. için.
- 9) Kayabilir dişliler, kavramalar, piston kolu yatağı, ölçme cihazları silindirleri için.
- 10) Takım tezgahlarının ana yatakları, krank milleri ve piston kolları yatakları, bütün regülötör yatakları, kaygan muflar v.b. için.
- 11) Krank millerinin ana yatakları, piston kolu yatakları, kaygan yataklar için.
- 12) Takım tezgahlarında çok yataklı miller için.
- 13) Vinçlerin ve transmisyonların uzun millerindeki yataklar, avara kasnaklar, ziraat makineleri yatakları, salmastra kutuları için.
- 14) Kamalar ve kama yuvalarında, nakil vasıtaları ve ziraat makinelerinin aks burçları, transmisyon yatakları, avara kasnaklar için.
- 15) Ziraat makinelerinde miller üzerine vidalanmış, çakılmış veya sıkıştırılmış parçalar, ara burçları, menteşe pimleri için.
- 16) Büyük toleranslı parçaların hareketlerini devamlı olarak temin etmek için.
- 17) Kısa transmisyon milleri, kapatma pimleri, v.b. için.
- 18) Lokomotif regülötör milleri, yay ve fren çubukları için.

Tablo 2. Makina Elemanlarının Alıştırma Derecelerine Göre Tolerans Önerileri [45-47].

MAKİNA ELEMANLARININ ALIŞTIRMA DERECELERİNE GÖRE TOLERANS ÖNERİLERİ

- 1) HASSAS ALIŞTIRMA
- 2) İNCE ALIŞTIRMA
- 3) ORTA ALIŞTIRMA
- 4) KABA ALIŞTIRMA

Tablo 3. Makina Elemanlarının İmal Usullerine Göre Tolerans Önerileri [45-47].

MAKİNA ELEMANLARININ İMAL USULLERİNE GÖRE TOLERANS ÖNERİLERİ	
1) KUM DÖKÜM	8) FREZELEME
2) ŞAHMERDANDA DÖVME	9) TORNALAMA
3) KALIP DÖKÜM	10) TIĞ ÇEKME
4) PRES VE EXTRÜZYON	11) HONLAMA
5) PLANYALAMA	12) BİLEME
6) MATKAPLA DELİK DELME	13) LEPELEME
7) DELİK İŞLEME	

bahsedilen tolerans önerileri arasından seçimini yapar.

Programın Geliştirilmesi ve Veritabanı Kullanımı

Veritabanı Yapısı: Bu çalışmada iki farklı bilgi grubunu içeren veritabanları kullanılmıştır. Bunlar, i) çeşitli kaynaklardan derlenen önerileri biraraya getiren veritabanları (ilişkisel veri yapısı), ii) standart tolerans tablolarındaki [45] rakamsal değerleri içeren veritabanlarıdır.

Çalışmada dBASE IV programlama dili düşünülen uygulama için uygun görülmüş ve tüm bilgilerin toplandığı 4 veritabanı hazırlanmıştır. Bunlardan Makiso.dbf ve Derece.dbf veritabanları sırası ile 1 ve 2 nolu önerileri biraraya getirmek için geliştirilmiş veritabanları olup normal delik, normal mil sistemleri için tolerans harflerini, IT kalite sayılarını ve geçme tiplerini içermektedir. Pro.dbf veritabanı, 3 nolu öneriler grubu için geliştirilmiş olup imal usulü, tolerans ve kalite bilgilerini içermektedir. Tolerans.dbf ise standart tolerans tablolarındaki sayısal değerleri içeren bir veritabanıdır. Oluşturulan veritabanı dosyaları sırasıyla 3954, 3924, 3947 ve 3702 byte'lık bilgi içermekle beraber istenildiği zaman yeni bilgilerle genişletilebilmekte veya güncellenebilmektedir. Dosyalarda (veritabanları da) bulunan bilgiye ulaşım "karşılaştırmalı erişim sistemiyle" olmaktadır. Bu sistemde, dosya verilerinin sıralanış şeklini belirlemek için INDEX dosyası içerisindeki bilgilerle olur. Veritabanlarına programdan erişim ve diğer programlama detayları Şekil 4'te görülmektedir.

Programın Yapısı: dBASE programlamada karmaşık ve zaman alıcı problemlerin çözümü genelde "modül" ve "prosedür" (procedure) elemanları kullanılarak

sağlanmaktadır. dBASE yazılımlarında programın genel işlemlerini yapan programlar modül, sık sık tekrarlanan standart işlemleri yapan programlar ise prosedür olarak tanımlanmaktadır. Prosedür dBASE'de başlı başına bir işi gerçekleştiren bağımsız bir işlem (yazılım) bloku olmasına rağmen başka bir prosedüre de işlem yaptırabilir. Programcı tarafından yazılan ve işlevsel olarak iş yapan her program bloku bir modülü oluşturur. Modüller birleşerek "ana programı" oluştururlar.

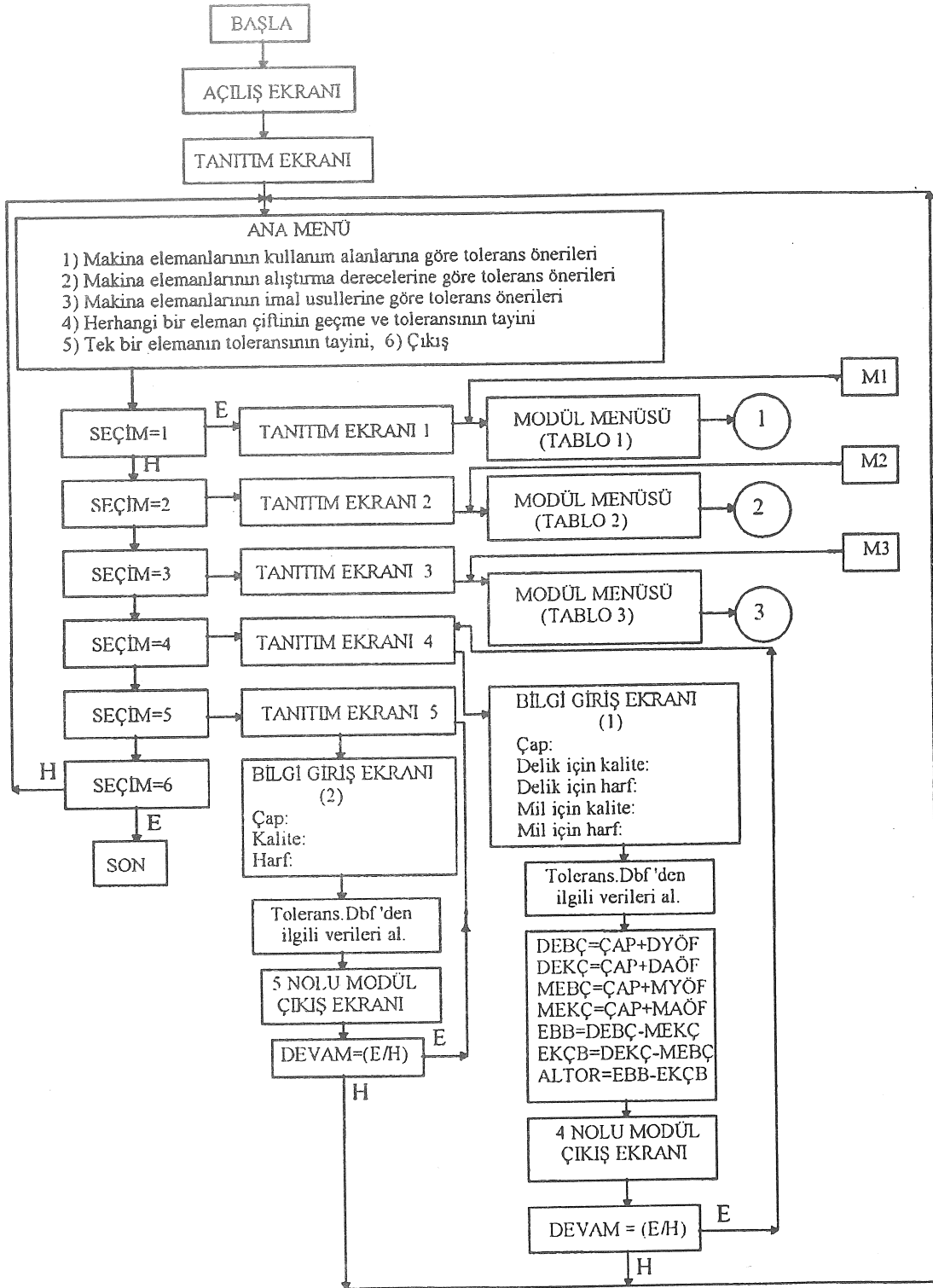
Geliştirilen yazılımda "modül" ve "prosedür"ler kullanılarak veritabanı dosyalarına erişilmekte, verilen koşulları sağlayan kayda ulaşmakta ve elde edilen verilerle gerekli hesaplamalar yapılmaktadır. Şekil 4'teki akış şemasında modül ve prosedürler kullanılarak hazırlanan yazılımın çalışma sistematığı görülmektedir. Geliştirilen program 6 ana modül, 2 mini modül ve 12 prosedürden oluşmaktadır. Bunlarla ilgili özet bilgiler aşağıda verilmiştir:

1) MENU.PRG: Ana menüyü oluşturur ve diğer program modüllerine geçişi sağlar. Bu modüle bağlı Demo.Prg ve Ylkekr.Prg mini modülleri ana programın başlangıç ekran formlarını oluşturmaktadır.

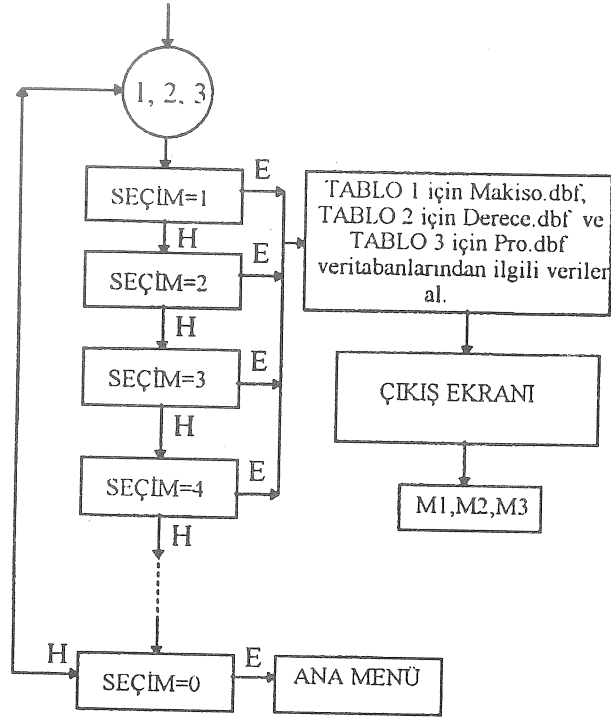
2) MAKINA.PRG: Makina elemanlarının kullanım alanlarına göre önerilen ISO alıştırmaları konusunda kullanıcıya yardım eder. Bu modül, önce Tablo 1'de verilen ön bilgi ve seçenek menüsünü, daha sonra kullanıcının bu menüden yapacağı seçeneğe göre önerilen tolerans harflerini ve IT kalite sayılarını ekrana getirir. Bu modül Makiso.dbf veritabanını kullanmaktadır.

3) ISO.PRG: Kullanıcının Tablo 2'den yapacağı seçime göre (alıştırma derecelerine göre tolerans önerileri) önerilen tolerans harflerini ve IT kalite sayılarını ekrana getirir. Bu modül Derece.dbf veritabanını kullanmaktadır.

4) PROSES.PRG: Farklı imal usullerine



Şekil 4. Yazılımın Çalışma Esaslarını Gösteren Akış Diagramı.



Şekil 4. (devamı)

göre kullanıcıya IT kalite sayılarını ve tolerans harflerini önerir. Bu modül Pro.dbf veritabanını kullanmaktadır.

5) TEKTOL.PRG: İki eleman çifti için verilen anma çapına, IT kalite sayılarına ve tolerans harflerine göre toleransları, yukarı ve aşağı ölçü farklarını, en büyük ve en küçük çapları, boşluk değerini, alıştırma toleransını ve geçme tipini hesaplar. Bu modül Tolerans.dbf veritabanını kullanmaktadır.

6) TOLER.PRG: TEKTOL.PRG yazılımının yaptığı işlemleri tek bir eleman için yapar.

UYGULAMALAR

Uygulama 1

Ana menü: SEÇİM=1 (Makina elemanlarının kullanım alanlarına göre tolerans önerileri)

Modül menüsü 1: SEÇİM=1 (Büyük tutukluk kuvveti için dişli çark, volan ve teker göbekleri, mil flanşları)

Ekran görüntüsü:

NORMAL DELİK	: H8/x8
NORMAL MİL	: K7/H6
GEÇMENİN KONUMU	: PRESLE GEÇME
NORMAL DELİK	: H8/u8

NORMAL MİL : K7/h6
 GEÇMENİN KONUMU : PRESLE GEÇME
 Devam etmek için ENTER'a basınız.

Uygulama 2

Ana menü: SEÇİM=2 (Makina elemanlarının alıştırma derecelerine göre tolerans önerileri)

Modül menüsü 2: SEÇİM=1 (Hassas alıştırma)

Ekran görüntüsü:

NORMAL DELİK	NORMAL MİL	GEÇMENİN KONUMU
H6/p5	P6/h5	sıkı geçme (hareketsiz geçme)
H6/n5	N6/h5	çakma geçme (hareketsiz geçme)
H6/k6	K6/h5	tutuk geçme (hareketsiz geçme)
H6/j6	J6/h5	kakma geçme (hareketsiz geçme)
H6/h5	H6/h5	kaygın geçme (hareketli geçme)

Devam etmek için ENTER'a basınız.

Uygulama 3

Ana menü: SEÇİM=3 (Makina elemanlarının imal usullerine göre tolerans önerileri)

Modül menüsü 3: SEÇİM=2 (Şahmerdanda dövme)

Ekran görüntüsü:

İMAL USULÜ	TOLERANS [μ]	KALİTE
Şahmerdanda dövme (küçük)	0.8	15
Şahmerdanda dövme (büyük)	1.6	16

Devam etmek için ENTER'a basınız.

Uygulama 4

Ana menü: SEÇİM=4 (Herhangi bir eleman çiftinin geçme ve toleransının tayini)
Bilgi Giriş Ekranı (1):
Çap = 125 mm
Delik için kalite = 7
Delik için harf = H
Mil için kalite = 6
Mil için harf = g

Ekran görüntüsü:

DELİK İÇİN (boyutlar mm cinsinden)

ÇAP : 125
KALİTE : 7
YUKARI ÖLÇÜ FARKI : 0.400
AŞAĞI ÖLÇÜ FARKI : 0
EN BÜYÜK ÇAP : 125.0400
EN KÜÇÜK ÇAP : 125
TOLERANS : 0.0400

MİL İÇİN (boyutlar mm cinsinden)

ÇAP : 125
KALİTE : 6
YUKARI ÖLÇÜ FARKI : - 0.0140
AŞAĞI ÖLÇÜ FARKI : - 0.0390
EN BÜYÜK ÇAP : 124.9860
EN KÜÇÜK ÇAP : 124.9610
TOLERANS : 0.0250

EN BÜYÜK BOŞLUK: 0.0790

EN KÜÇÜK BOŞLUK : 0.0140

ALIŞTIRMA TOLERANSI : 0.0650

GEÇME : hareketli geçme (clearance fit)

Devam etmek için ENTER'a basınız.

Uygulama 5

Ana menü: SEÇİM=5 (Tek bir eleman toleransının tayini)

Bilgi Giriş Ekranı (2) :

Çap = 156 mm

Kalite = 8

Harf = D

Ekran görüntüsü:

DELİK İÇİN (boyutlar mm cinsinden)

ÇAP : 156
KALİTE : 8
YUKARI ÖLÇÜ FARKI : 0.2080
AŞAĞI ÖLÇÜ FARKI : 0.1450
TOLERANS : 0.0630

Devam etmek için ENTER'a basınız.

Kullanıcı tarafından girilen bilgiler neticesinde tolerans ve buna bağlı değerler tanımsız olduğu takdirde ekran temizlenir, 3 defa uyarı sinyal sesi duyulur ve ekrana şu mesaj gelir: "BU DURUM İÇİN TOLERANS TANIMSIZDIR, LÜTFEN GİRDİ DEĞERLERİNİZİ KONTROL EDİNİZ". Uyarı herhangi bir tuşa basılana kadar bekler, tuşa basıldığında program, yeni değerler girilmesine izin verir.

SONUÇ

Bu çalışmada, son yıllarda oldukça önem kazanan bilgisayar yardımıyla tolerans seçimi konusunda yapılan çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalar belli bir sistematik çerçevesinde üç gruba ayrılmış ve her gruptaki çalışmaların konuya katkısı özetlenmiştir. İleriye dönük olarak üzerinde öncelikle çalışılması gereken konular vurgulanmıştır. Ayrıca, bu makalenin yazarları tarafından mikrobilgisayarlarda çalışmak üzere geliştirilen dBASE IV veritabanı esaslı bir tolerans seçimi programının detayları verilmiştir. Eğitim amaçlı olarak düşünülen yazılım kullanıcının seçenekleri doğrultusunda (imal edilecek parçanın kullanım alanına veya alıştırma derecesine veya kullanılacak imal usulüne göre) tolerans harfi ve IT kalite sayısı önerebilmekte ve bu öneriler için makina elemanının veya eleman çiftinin tolerans değerlerini, en büyük ve en küçük çaplarını ve boşluklarını, alıştırma toleransını ve geçme tipini hesaplamaktadır. Kaynaklar taranarak oluşturulan tecrübe ve uygulamalara dayalı öneriler ve BS4500'den alınan tolerans hesaplama tabloları 4 veritabanında toparlanmıştır. Halen 6 ana modül, 2 yardımcı modül, 12 prosedür ve 4 veritabanından oluşan yazılım yeni bilgilerle genişletilebilecek ve güncellenebilecek yapıda hazırlanmıştır.

THE-STATE-OF-ART OF COMPUTER AIDED SELECTION OF MANUFACTURING TOLERANCES AND DEVELOPMENT OF A EDUCATIONAL SOFTWARE FOR SELECTION OF TOLERANCES

In this study, the published works in the last decade in the field of computer-aided selection of manufacturing tolerances is surveyed. The computer-aided tolerance selection techniques are classified systematically into three groups, namely, tolerance chain technique, analysis and synthesis of design technique and cost-tolerance algorithm technique. The published works are summarized under the above mentioned headings. In this paper, the algorithm, software details and sample outputs of a dBase IV software prepared by the authors of this study to select the manufacturing tolerances is presented.

KAYNAKÇA

- [1] Amerikan Milli Standartlar Enstitüsü (American National Standard Institute), *Dimensioning and Tolerancing for*

- Engineering Drawings*, ANSI 14.5M, ASME, New York, 1982.
- [2] Giesecke, F.E., Mitchell, A., Spencer, H.C., Hill, I.L. ve Dygdon, J.T., *Technical Drawing*, Mac Millan, Publishing, New York, (1980), 335-356.
- [3] Marks, C.F., Tolerance Charts Control Production *Machining, American Machinist*, 97 (5), Mart (1953), 114-116.
- [4] Anderson, J.P., Assembly Tolerance Charts Same Time and Money, *The Tool Engineer*, 37 (6), Aralık (1956), 95-97.
- [5] Johnson, A., Index Tolerance Chart Simplifies Production, *The Tool Engineer*, 32 (2), Şubat (1954), 53-62.
- [6] Mooney, C.T., How to Adjust Tolerance Charts, *The Tool Engineer*, 35 (4), Ekim (1955), 75-81.
- [7] Gadzalla, J.D., *Dimensional Control in Precision Manufacturing*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [8] Wade, O.R., *Tolerance control in Design and Manufacturing*, Industrial Press Inc., New York, 1967.
- [9] Sack Jr., C.F., Computer Managed Process Planning - a bridge between CAD and CAM, *AUTOFACT4*, 7.15-7.31, Philadelphia, Pennsylvania, 30 November - 2 December, 1982.
- [10] Björke, O., *Computer-Aided Tolerancing*, ASME Press, New York, 2nd ed., 1989.
- [11] Lagodimas, A.G. ve Scarr, A.J., Computer-Aided Selection of Interference Fits, *Computer in Mechanical Engineering*, 2 (2) (1983), 49-55.
- [12] Ahluwalia, R.S. ve Karolin, A.V., CATC - A Computer-Aided Tolerance Control System, *Journal of Manufacturing Systems*, 3 (1986), 153-160.
- [13] Xiaoqing, T. ve Davies, B.J., Computer-Aided Dimensional Planning, *Int. J. of Production Research*, 26 (1988), 283-297.
- [14] Li, J.K. ve Zhang, C., Operational Dimensions and Tolerance Calculation in CAPP System for Precision Manufacturing, *Annals of CIRP*, 38 (1), (1989), 403-406.
- [15] Irani, S.A., Mittal, R.O. ve Lehtihet, E.A., Tolerance Chart Optimization, *Int. J. of Production Research*, 27 (9), (1989), 1531-1552.
- [16] Zhang, C., Mei, J., et al., Operational Dimensioning and Tolerancing in CAPP, *Annals of CIRP*, 40 (1), (1991).
- [17] Weil, R. ve Bourdet, K., Integrating Dimensions and Tolerancing in Computer-Aided Process Planning, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 4 (1/2), (1988), 41-48.
- [18] Wu, Z., El Maraghy, H.A. ve El Maraghy, W.H., Evaluation of Cost-Tolerances Algorithms for Design Tolerances Analysis and Synthesis, *Manufacturing Review*, 1 (3), Kasım (1988), 168-179.
- [19] Chase, K.W., Greenwood, W.H., Least Cost Tolerance Allocation for Mechanical Assemblies with Automated Process Selection, *Manufacturing Review*, 3 (1), Mart (1990), 49-59.
- [20] Chase, K.W. ve Greenwood, W.H., Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis, *Manufacturing Review*, 1 (1), (1988), 50-59.
- [21] Dong, Z. ve Soom, A., Optimal Tolerancing Design with Automatic Incorporation of Manufacturing Knowledge, *IEE Integrated Systems Conference*, 1989.
- [22] Oswald, P.F. ve Blake, M.O., Estimating Cost Associated with Dimensional Tolerance, *Manufacturing Review*, 2 (4), (1989), 277-282.
- [23] Kim, S.H. ve Knott, K., A Pseudo-Boolean Approach to Determine Least Cost Tolerances, *Int. J. of Production Research*, 26 (1), (1988), 157-167.
- [24] Oswald, P.F. ve Huang, J., A Method for Optimal Tolerance Selection, *ASME Trans., J. of Engineering for Industry*, Ağustos (1977), 358-363.
- [25] Micheal, W. ve Siddal, J.N., "The Optimization Problems with Optimal Tolerance Assignment and Full Acceptance, *ASME Trans., J. of Mechanical Design*, 103, Kasım (1981), 842-845.
- [26] Michael, W. ve Siddal, J.N., The Optimal Tolerance Assignment with Less Than Full Acceptance, *ASME Trans., J. of Mechanical Design*, 104, Kasım (1982), 855-860.
- [27] Sayed, S.E. ve Khcir, N.A., *An Efficient Technique for Minimum Cost Tolerancing Assignment*, Simulation, Nisan 1985.
- [28] Zhang, C. ve Wang, H.P., Simultaneous Optimization of Design and Manufacturing Tolerances with Process (Machine) Selection, *Annals of CIRP*, 41 (1), (1992), 569-572.
- [29] Zhang, C. ve Wang, H.P., *The Discrete Tolerance Optimization Problem*, Dept. of Industrial Eng., Makale No: 91-28, The University of Iowa, 1991.

- [30] Laarhoven, P.J.M. ve Aarts, E.H.L., *Simulated Annealing: Theory and Applications*, D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland, Raman, 1987.
- [31] Kapur, K.C., Raman, S. ve Pulat, P.S., Methodology for Tolerance Design Using Quality Loss Function, *Computer in Industrial Eng.*, 19 (1-4), (1990), 254-257.
- [32] Chen, G. ve Kapur, K.C., Quality Evaluation Systems Using Loss Function, *The Proc. of Int. Industrial Eng. Conf.*, Toronto, Canada, May 1989.
- [33] Taguchi, G., *Systems of Experimental Design* (İngilizceden Tercüme), Cilt 1, UNIPUB/KRAUS Int. Publ., Dearborn, MI, 1987.
- [34] Fainguelernt, D., Weil, R. and Bourdet, P., *Annals of CIRP*, 35 (1986), 381-386.
- [35] Stantsikopoulos, M.M., A Cost-Tolerance Analysis Approach for Design and Manufacturing, *Int. J. of Advanced Manuf. Tech.*, 5 (1990), 126-134.
- [36] He, J.R., Tolerancing for Manufacturing via Cost Minimization, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 31 (4), (1991), 455-470.
- [37] Chase, K.W. ve Greenwood, W.H., A New Tolerance Analysis Metod for Designers and Manufacturers, *Trans. ASME, J. of Engineering for Industry*, 109 (1987), 112-116.
- [38] Lehtihet, E.A. ve Dindelli, B.A., TOLCON: Microcomputer Based Module for Simulation of Tolerances, *Manufacturing Review*, 3, Eylül 1989.
- [39] Lee, W. ve Woo, T.C., Tolerances: Their Analysis and Synthesis, *Trans. ASME, J. of Engineering for Industry*, 112 (1990), 113-119.
- [40] Lee, W. ve Woo, T.C., Optimum Selection of Discrete Tolerances, *J. of Mechanisms Transmissions and Automation in Design*, 111, Haziran (1989), 243-249.
- [41] Manivannan, S., Lehtihet, E.A. ve Egbelu, P.J., A Knowledge Based System for the Specification of Manufacturing Tolerances, *J. of Manufacturing System*, 8 (2).
- [42] Raman, S., Panchal, K. ve Pulat, P.S., Computer-Aided Tolerance Assignment, *Computer in Industry*, 21 (1-4), (1991), 67-71.
- [43] Panchal, K., Raman, S. and Pulat, P.S., Computer-Aided Tolerance Assignment Procedure (CATAP) for Design Dimensioning, *Int. J. Production Research*, 30 (3), (1992), 599-610.
- [44] Autodesk Inc., *AutoCAD Release 10*, Reference Manual, 1989a.
- [45] BS 4500 (British Standards), *Specifications for ISO Limits and Fits*, 1969.
- [46] Öztürk, F., Çavdar, K. ve Alankuş, O., TOL-AP: Bilgisayar Yardımıyla Tolerans Analizi Programı, 6. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı, 105-114, ODTÜ, 1994.
- [47] Bağcı, M. ve Bağcı, C., *Teknik Resim - Cilt 1*, Bağcı Yayınevi, Ankara, 1977.
- [48] *TS 1845 (Türk Standartları), Tolerans ve Alışturmalar Sistemi*, Bölüm I - Genel Esaslar, Toleranslar ve Sapmalar, Şubat 1975.