

# FREZELEMEDE ÇOK AMAÇLI GENETİK ALGORİTMA YAKLAŞIMI İLE KESME KOŞULLARININ OPTİMİZASYONU

Ali ÜNÜVAR<sup>a,\*</sup>, Emine TOSUN<sup>b</sup>

<sup>a,\*</sup> Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

Tel: 0-332-2231910 [aunuvar@selcuk.edu.tr](mailto:aunuvar@selcuk.edu.tr) Konya/TÜRKİYE

<sup>b,\*</sup> Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği

Konya/TÜRKİYE

## Özet

Bu çalışmada, genetik algoritma yaklaşımı ile frezeleme işleminde optimum kesme koşullarını belirlemek için amaç fonksiyonları oluşturulmuş ve matematiksel model kurulmuştur. Çok amaçlı optimizasyon problemi olarak geliştirilen modelin GA yardımıyla optimizasyonu yapılmıştır ve optimum kesme koşulları elde edilmiştir. Frezeleme işleminde optimum kesme koşullarının belirlenmesinde GA metodun çok etkin olarak kullanılabileceği ve performanslarının kullanılan parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Genetik Algoritma, Optimum Kesme Koşulları, Optimizasyon, Frezeleme

## 1. Giriş

Genetik algoritmalar (GA), özellikle optimizasyon problemlerinin çözümünde çok etkili olarak kullanılmaktadır. GA' nın çok amaçlı modellerdeki eş zamanlı optimizasyon yeteneği, endüstriyel problemlerin çözümünde GA kullanımını diğer yapay zeka tekniklerine göre daha ön plana çıkarmaktadır. Talaş kaldırma şartları için optimizasyon problemlerini çözmeye literatürde rapor edilen bazı metotlar şunlardır; Performans zarfı (Crookall, 1969), Lagrange çarpanları (Bhattacharyya et al, 1970), Geometrik programlama (Ermer, 1971, Petro poulos, 1973), Lineer programlama (Ermer ve Patel, 1974), Dinamik programlama (Agapiou, 1992, Shin ve Joo, 1992), Grafik metotlar (Kiliç ve ark., 1993), Tamsayı programlama (Gupta et al, 1993) ve yapay zekadır. Yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıdadır;

İşleme parametrelerinin optimizasyonu çalışmaları tek pasolu operasyonlarla başlamıştır. Taylor (1907) tek pasolu tornalama operasyonlarında talaş kaldırma hızını maksimum yapmak için optimum kesme hızını belirlemiştir. Gilbert (1950) tek pasolu tornalama işlemlerinde işleme maliyetini minimum yapan kesme hızını belirleyen analitik metot kullanılmıştır. Wu ve Ark.(1966) Optimum işleme koşullarını tayininde maksimum kar kriterini kullanmışlardır. Bhattacharyya ve Gonzales, (1970) optimum talaş kaldırma koşullarının tayininde yüzey pürüzlülüğü için regresyon analizi yapmışlardır. Walvekar ve Lambert (1970) pratik kısıtlara maruz işlemede ilerleme ve hızın optimal olarak belirlenme işlemini

geometrik programlamayla çözüp simülasyon yapmışlardır. Ermer, (1971) geometrik programlamayı kısıtlı işleme koşullarında işleme koşullarının optimizasyonunda kullanmışlardır. Lambert, ve Walvekar, (1978) çok pasolu talaş kaldırma işlemlerinde optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Rao ve Hati, (1978), NN kullanarak işleme operasyonlarının çok amaçlı optimizasyonunu yapmışlardır. Ermer ve Kromodihardjo (1981) tek pasolu tornalama operasyonları için minimum toplam işleme maliyetinin optimizasyon modelini önermişlerdir. Burada minimum maliyetli kesme şartları için ilerleme mümkün olan en yüksek değerinde seçilmiştir. Agapiou (1992) optimum işleme şartlarının belirlenmesi için minimum üretim maliyeti ve minimum üretim zamanı kriterlerine göre amaç fonksiyonunu belirlemiştir. Her paso için optimum kesme hızı ve ilerleme bağımsız olarak Nelder-Mead Simplex Araştırma Metodu ile belirlenmiştir. Wang, (1993), NN kullanarak işleme operasyonlarının çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Gupta (1995) çok pasolu tornalama işlemlerinde maksimum kar kriterini kullanan optimizasyon modeli önermişlerdir. Problemin çözümünde geometrik programlama ve lineer programlamayı kullanmışlardır. Tolouei-Rad ve Bidhendi (1997) hem tek pasolu hem de çok pasolu frezeleme operasyonlarında minimum üretim maliyeti, minimum üretim zamanı ve maksimum kar amaç fonksiyonları için matematiksel modeller önermişlerdir. Çakır ve Gürarda (1998) mevcut optimizasyon modellerini minimum üretim maliyeti amaç fonksiyonu için hem çok pasolu tornalama, hem de frezeleme operasyonları için uygulamalı göstermişlerdir. Kesilecek hacim çeşitli alanlara bölünüp, her bölüm tek paso operasyonu olarak ilerleme, kesme hızı, kesme gücü, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü kısıtları ile işlenmiştir. Optimum işleme parametrelerini çeşitli araştırma metotları ile bulmuşlardır. Wang, (1998), parmak freze işlemlerinde bilgisayar destekli optimizasyon çalışması yapmıştır. Arezoo (2000) prolog programlama dilini kullanarak tornalama operasyonlarında kesici takım seçimi için uzman sistem geliştirmiştir. Sistem ile takım tutucu, kesici uç, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğini seçebilmektedir. İşleme şartlarının optimizasyonunda dinamik programlamayı kullanmışlardır. Shunmugam ve ark., (2000). GA kullanarak çok pasolu alın frezeleme işlemlerinde optimum koşulların seçimini yapmışlardır. Al-Ahmari (2001) pratik işleme kısıtlarıyla minimum üretim maliyetini temel alan çok pasolu tornalama operasyonları için kesme derinliğini tekrar bölerek işleme parametrelerinin optimizasyonunu nonlineer program modeli olarak göstermiştir. Balic, J., ve Cus, F., 2002. GA kullanarak işleme koşullarının seçimi üzerine çalışmışlardır. Baskar ve ark. 2002 ve 2003, konvansiyonel olmayan metotlar ve PSO tekniği kullanarak frezelemede optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Wang (2002) çok pasolu tornalama operasyonlarında kesici takım ve kesme parametrelerinin optimal seçimi için genetik algoritmaları kullanmışlardır. Amaç fonksiyonu operasyondaki tüm pasoların işleme performans ölçümünü içerir. Ağırlık faktörü konfigürasyonu ile farklı işleme performansının ölçümünde optimizasyon prosedürünün kontrolünde bunu kullanmışlardır. Baskar ve ark. 2005, konvansiyonel olmayan metotlar kullanarak çok takımlı frezeleme işlemlerinde optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Yüksek hızlı tornalamada amaç fonksiyonu olarak maksimum üretim hızını alarak kesme parametrelerinin belirlenmesi çalışmalarını Bouzid (2005) yapmıştır. Kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü için modeller oluşturmuştur. Modelin katsayıları deneysel olarak bulunmuştur. Minimum üretim zamanını veren kesme hızı ve ilerleme değerlerini hesaplamıştır. Deshmukh ve ark. 2002 Yüzey pürüzlülük tahmin modelinin optimizasyonu için GA yaklaşımı kullanmışlardır.

## 2. Amaç Fonksiyonları ve Matematiksel Modelin Kurulması

Optimizasyon, bir problemin mümkün çözümleri arasından en iyisinin belirlenmesi işlemidir. İmalat sanayindeki temel üretim işlemlerinin şüphesiz en önemlisi talaş kaldırarak üretilmektedir. Üretim prosesinde talaş kaldırma, istenmeyen malzemenin uzaklaştırılmasıyla metal parçaların şekillendirilmesi olayıdır. Üretimi gerçekleştirecek tezgahların, en düşük maliyet be en kısa sürede istenen boyutta ve yüzey kalitesinde parçayı üretmesi gerekir. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği gibi teknolojik değerler çok geniş aralıkta olması sebebiyle geçmiş tecrübelerden ve Çizelgelerden alındığı için üretim her zaman optimum verim ve maliyetle gerçekleştirilmemektedir. İşleme sırasında büyüklüğü ve kaynağı belli olmayan bir takım bozucu faktörler oluşur. Gerek optimum değerde

çalışmak gerekse bozucu etkilerini telafi etmek için talaş kaldırma işlemlerine optimizasyon yöntemleri uygulanmaktadır. İşleme operasyonlarının başarılı ve verimli olmasında işleme parametrelerinin önemli rolü olduğundan dolayı en iyi ya da optimum işleme şartlarının bulunması hala çoğu araştırmacının konusudur. Yüksek maliyetleri dolayısıyla CNC tezgahlarda optimum şartlar daha önemlidir. Optimum işleme parametrelerine en büyük ilgi pazardaki rekabette anahtar rolü oynayan üretim çevrelerinden olmaktadır. Yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetleri sebebiyle geri ödeme zamanının kısalması için CNC tezgahların daha verimli kullanılması gerekmektedir. İşleme operasyonlarının birinci amacı düşük maliyet ve yüksek kaliteli ürünleri üretmektir. Bu amacın başarılmasında işleme parametrelerinin optimum seçilmesi önemli bir rol oynar.

## 2.1. Amaç Fonksiyonları

İşleme parametrelerinin optimizasyonu genellikle iki adımdan oluşur. Birinci adım matematiksel bir optimizasyon modeli oluşturmaktır. Model çeşitli kısıtlar ve işleme şartlarını temel alarak gerçekleştirilir. İkinci adım ise optimal yada optimale yakın uygun çözüm prosedürleri araştırmaktır. İşleme parametrelerinin optimizasyonu tek ve çok pasolu talaş kaldırma işlemlerine ayrı ayrı uygulanabilir. Tek pasolu operasyonlarda toplam arzulanan kesme derinliği tam bir pasoda gerçekleştirilir. Pratikte bu nadiren başarılabilir. Bu yüzden işleme parametrelerinin belirlenmesi için çok pasolu işleme yaklaşımı dikkate alınır.

Optimizasyon modeller geliştirilirken amaç fonksiyonları optimizasyon kriteri olarak belirlenir. İşleme parametrelerinin optimizasyonunda beş şekilde amaç fonksiyonu belirlenebilir.

Minimum üretim maliyeti

Minimum üretim zamanı veya maksimum üretim hızı

Maksimum kar oranı

Maksimum yüzey kalitesi

Çeşitli amaç fonksiyonlarının ağırlıklı kombinasyonu

Günümüzde optimizasyon problemlerinin çözümünde analitik ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Analitik çözümlerde belirli bir aşamadan daha ileriye gidilememesi, birçok sayısal yöntemin geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. Sayısal yöntemlerde tekrarlı (iteratif) işlemler bilgisayar kullanımı ile kısa sürede çözülmüştür.

## 2.2. Matematiksel Model

Kesme derinliği, ilerleme ve kesme hızı işleme operasyonlarının başarısında en büyük etkiye sahiptir. Pratikte sadece bu parametreler dikkate alınır. Kesme derinliği iş parçası geometrisi tarafından önceden belirlenir. Frezeleme operasyonlarında çok kesme kenarı vardır ve bir kesme kenarı işleme zamanının yalnızca bir kısmı için iş parçası ile temastadır. Frezeleme tipi işleme operasyonlarında aktif kesme kenar sayısına göre sınıflandırılır. Her bir kesici ucun işleme ömrü tek ağızlı takım operasyonları ile mukayese edildiği zaman  $Q$  ile artırılır. Bu düzlem frezeleme, alın frezeleme, kanal frezeleme, cep frezeleme gibi frezeleme tipi ve kesme işlemindeki aktif açığa göre gerçekleştirilir.

### 2.2.1. Uygunluk Fonksiyonları

Frezeleme optimizasyonu iki amaç fonksiyonuna göre tek takımlı ve çok takımlı operasyonları için gerçekleştirilir. En düşük birim üretim zamanı, en düşük birim üretim maliyeti, bunlar aynı karaktere sahiptir ve aynı formda yazılabilirler

#### 2.2.1.1. Tek Takımlı İşler İçin Uygunluk Fonksiyonu

Tek takımlı Frezeleme operasyonları için birim üretim maliyeti; malzeme maliyeti, hazırlık veya ayar maliyeti, işleme maliyeti ve takım değiştirme maliyeti toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

##### 2.2.1.1.1. Birim Üretim Maliyeti

Birim üretim maliyeti malzeme maliyeti, hazırlık veya ayar maliyeti, işleme maliyeti ve takım değiştirme maliyeti toplamıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C_u = c_{mat} + (c_1 + c_o)t_s + (c_1 + c_o)t_m + (c_1 t_c + c_1 + c_o t_c) (T_m/T)$$

Hazırlık ve ayar maliyeti; işçilik ve üst yönetim maliyetleri toplamıdır. Takım değiştirme maliyeti; işçilik, kesici takım ve üst yönetim maliyetleri toplamıdır. Yeniden düzenlenirse,

$$C_u = c_{mat} + (c_1 t_s + c_1 t_m + (c_1 + t_c + c_1) \frac{T_m}{T})$$

Frezeleme operasyonları için işleme zamanı

$$T_m = \frac{K}{F} = \frac{K}{fzN}$$

$N = 1000 V/\pi d$  ve  $K_2 = \pi d K / 1000 z$  alınır;

$$T_m = K_2 V^{-1} f^{-1}$$

olur. Freze çakısının takım ömrü tornalama operasyonları için kullanılan Kronenberg'in verilerinden tahmin edilir. Frezeleme takımının her bir takım ucu bir tek ağızlı takım olarak simüle edilir. Bu özel uç için Kronenberg verileri uygulanır.

Takım ömrü aşağıdaki gibidir;

$$T = \frac{K_e}{V^\alpha f^\alpha a^\gamma}$$

$$K_e = \frac{60 C_{vm}^\alpha}{5^{g/n}} \quad \alpha = 1/n$$

$$K_e = \frac{60 Q^{-1} c^\alpha}{5^{g/n}} a^{g-w/n}$$

$$K_3 = \frac{K_2}{K_e}$$

$$C_u = c_{mat} + (c_1 + c_o)t_s + (c_1 + c_o) K_2 V^{-1} f^{-1} + (c_1 t_c + c_1 + c_o t_c) K_3 V^{[(l/n)-1]} f^{[(t(w+g)/n) - 1]}$$

##### 2.2.1.1.2. Birim Üretim Zamanı

Frezeleme operasyonları için birim üretim zamanı;

$$T_u = t_s + t_m + t_c(T_m/T)$$

şeklindedir. Birim üretim zamanı hazırlık zamanı, işleme ve takım değiştirme zamanları toplamıdır. Tek takımlı frezeleme operasyonlarında sadece eskimiş takımın değiştirilmesi ihtiyacı vardır. Her parça için takım değiştirme zamanı işleme zamanının takım ömrüne bölümüne bağlı hesaplanır.

$$T_u = t_s + K_2 V^{-1} f^{-1} + t_{tc} K_3 V^{[(l/n)-1]} f^{[(t(w+g)/n) - 1]}$$

Tek takımlı işler için çok kriterli optimizasyon uygunluk fonksiyonu, w1 ve w2 ağırlıklı değerleri olmak üzere:

$$F(x) = w_1 C_u + w_2 T_u$$

### 2.2.1.2. Çok Takımlı İşler İçin Uygunluk Fonksiyonu

Çok takımlı Frezeleme operasyonları için birim maliyet;

$$C_u = \sum_{i=1}^m c_{2i} V_i^{-1} f_i^{-1} + \sum_{i=1}^m c_{3i} V_i^{n-1} f_i^{w+g-1}$$

şeklindedir. Burada; katsayılar aşağıdaki gibi bulunur.

Birinci operasyon için (alın frezeleme)                      İkinci operasyon için (cep frezeleme)

$$c_{21} = (c_1 + c_0) K_{21}$$

$$c_{22} = (c_1 + c_0) K_{22}$$

$$K_{21} = \pi d K / 1000 z$$

$$K_{22} = \pi d K / 1000 z$$

$$c_{31} = c_{t1} K_{31}$$

$$c_{32} = c_{t2} K_{32}$$

$$K_{31} = 5^{9/n} \pi d K a^{w-9/n} / 60 000 z c^{1/n}$$

$$K_{32} = 5^{9/n} \pi d K a^{w-9/n} / 60 000 z c^{1/n}$$

Çok takımlı Frezeleme operasyonları için birim üretim zamanı;

$$T_u = t_s + \sum_{i=1}^m K_{li} V_i^{-1} f_i^{-1} + \sum_{i=1}^m t_{tci}$$

Hazırlık ve takım değiştirme zamanları işleme parametrelerinden etkilenmez ve amaç fonksiyonu eşitliğinden çıkarılabilirler. Böylece çok takımlı frezelemede birim üretim zamanı için optimizasyon modeli haline gelir.

$$t_m = \sum_{i=1}^m K_{li} V_i^{-1} f_i^{-1}$$

Bu eşitlik gerçek işleme zamanını gösterir.

### 2.2.3 Yüzey Pürüzlülüğü

Frezeleme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve diğer bağımsız değişkenler arasındaki ilişki şu şekilde gösterilir;

$$R_a = C \cdot V^e \cdot f^b \cdot a^c \cdot r^d$$

Burada C bir sabit olup; a, b, c, d birer üsttür.

Sabitlerin ve üstlerin belirlenmesini kolaylaştırmak amacıyla; aşağıdaki gibi bir dönüştürme yapmak suretiyle bu matematiksel modelin lineer hale getirilmesi gerekecektir.

$$\ln R_a = \ln C + a \cdot \ln S + b \cdot \ln f + c \cdot \ln a + d \cdot \ln r$$

Sabitler ve üsler C, a, b, c ve d en küçük kareler yöntemi ile belirlenebilir. En küçük kareler yöntemini kullanan yukarıdaki fonksiyonel ilişkiden geliştirilen birinci dereceden lineer model şu şekilde de gösterilebilir;

$$Y_1 = Y - \epsilon = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4$$

#### 2.2.4. Kısıtlar

Değişken parametrelerimiz;  $v$ ,  $f$ ,  $a$  olmak üzere  $v$  kesme hızını,  $f$  ilerleme hızını ve  $a$  ise kesme derinliğini temsil etmektedir. Bu parametreler ayrıca kısıt olarak kullanılacaktır. Kısıtlarımızın yanında kullandığımız sabit parametrelerde matematiksel modelimizde yer alacaktır.

$$\begin{array}{llll} \text{Kısıt 1} & a \geq a_{min} & \text{Kısıt 3} & f \geq f_{min} & \text{Kısıt 5} & v \geq v_{min} \\ \text{Kısıt 2} & a \leq a_{max} & \text{Kısıt 4} & f \leq f_{max} & \text{Kısıt 6} & v \leq v_{max} \end{array}$$

### 3. Freze İşleminde Optimum Koşulların Belirlenmesinde Ga Yaklaşımı

GA, doğadaki evrim mekanizmasını örnek alan bir arama metodudur. GA'lar doğada geçerli olan en iyinin yaşaması kuralına dayanarak sürekli iyileşen çözümler üretir (Golberg,1992,1989;Lawrence,1990).

GA'lar, araştırma ve optimizasyon algoritmaları olup, canlılardaki doğal gelişim prensibine dayanmaktadırlar. Olasılık karakterleri ve çoklu mümkün çözümleri araştırma gibi önemli özelliklere sahip olmaları ve amaç fonksiyonunun gradyanının bilinmesine ihtiyaç duymamaları en önemli avantajlarından (Holland, 1975; Pham ve Karaboğa, 2000).

Optimum koşulların belirlemek için yapılan optimizasyon işleminde öncelikle genetik algoritma yaklaşımı tek amaçlı optimizasyon problemleri için uygulanmış olup, daha sonra çok amaçlı optimizasyon problemleri için genişletilmiştir. Çok amaçlı optimizasyon problemleri için GA'ların temel amacı tek amaçlı optimizasyon problemi için olanla aynıdır. Yani, tek amaçlı optimizasyon problemleri için kodlama yöntemi ile çok amaçlı optimizasyon yöntemi için kullandığımız kodlama yöntemi aynı şekildedir. Üreme, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerin yaklaşım mantığı da tek amaçlı optimizasyon ile çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yaklaşım mantığı farklılıklar içerir. Örneğin değerlendirme, seçim gibi genetik operatörlerde ve seçkinci stratejide çok amaçlı optimizasyon problemleri için değişiklik yapılması gerekir. Yaptığımız çalışmada ilk olarak çok amaçlı optimizasyon problemlerimizin arka planını açıklayıp, çok amaçlı genetik algoritma kurulacaktır.

#### Çok Amaçlı Optimizasyon Tekniğinin Aşamaları

Adım0(Başlatma)	Rasgele bir şekilde, $N_{pop}$ 'un popülasyon büyüklüğü olduğu $N_{pop}$ dizgilerinden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturunuz.
Adım1(değerlendirme)	Dizgilerin kodlarını fenotip dünyası içindeki çözümlere göre çözüünüz. Ardından her bir çözüm için $n$ sayıdaki amacın değerini hesaplayınız. Daha sonra tahmini bastırılmamış çözümler dizisini güncelleyiniz.
Adım 2 (seçim)	$N_{pop}$ dizgilerini yaratmak amacıyla, izleyen ana baba dizgilerini seçme prosedürünü tekrarlayınız. uygunluk fonksiyonu içindeki $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ ağırlık

	değerlerini rasgele bir şekilde belirleyiniz.. Seçim ihtimaline göre bir ana baba dizgisi seçiniz.
Adım 3 (Çaprazlama)	Çaprazlama operatörlerini ikinci adımda seçilen çiftlerin her birine uygulayınız.
Adım 4 (Mutasyon)	Oluşturulan dizgilerin her birine $P_m$ mutasyon olasılığı ile mutasyon operatörü uygulayınız.
Adım5(seçkinci strateji)	$N_{elite}$ çözümlerini oluşturulan $N_{pop}$ çözümlerinden rasgele bir şekilde atınız (çıkarınız) ve tahmini bastırılmamış çözümler dizisinden rasgele bir şekilde seçilmiş olan $N_{elite}$ çözümlerini ekleyiniz.
Adım6 (Sonlandırma testi)	Eğer önceden belirlenmiş durdurma koşulundan memnun kalınmışsa, algoritmayı durdurunuz. Aksi halde, Adım 1'e dönünüz.

### 3.1. Örnek Uygulama

Bu aşamada GA metodoloji ile geliştirilen model yardımıyla freze işleminde optimum kesme koşulların analizi yapılmıştır. Birim üretim maliyetini ve birim üretim zamanını minimize etmek üzere kurulan matematiksel model, verilen sınırlar ve kısıtlar çerçevesinde optimize edilmiş ve optimum kesme hızı ( $v$ ) ve optimum ilerleme hızı ( $f$ ) değerleri ve kesme derinliği ( $a$ ) değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Geliştirilen programın ana arayüzü Sekil 1'de görülmektedir.

Matematik modeli oluşturmak için ve GA algoritmasını çalıştırmak için örnek olarak alınan sabitler ve modelin bu sabitlere göre oluşturulması aşağıda verilmiştir.

$d=50$  mm,  $K=450$  mm,  $z=6$ ,  $c_t=49.5$  Helis açısı  $15^\circ$ ,  $l_a=45^\circ$ ,  $c_{mat}=0.9$  TL,  $c_0=2.6$  TL,  $c_1=0.8$  TL,  $c_2=89.5$  TL,  $c_{at}=5^\circ$ ,  $g=0.14$ ,  $n=0.3$ ,  $c=100.05$ ,  $a=10$  mm,  $w=0.28$ ,  $t_s=2$  dk,  $t_{tc}=0.5$  dk

Buna göre;

$K_2=11.78$  ve  $K_3=3,055 \times 10^{-8}$  bulunur.

Tek takımlı işler için çok kriterli optimizasyon uygunluk fonksiyonu,  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık değerleri olmak üzere;

$F(x)=w_1C_u + w_2T_u$  olarak tanımlanır.

Amaç fonksiyonları hız ve ilerlemeye bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$C_u = 4.3 + 22.382 V^{-1} f^{-1} + 154,25 \times 10^{-8} V^{2,334} f^{0,4}$$

$$T_u = 2 + 11.78 V^{-1} f^{-1} + 1,5275 \times 10^{-8} V^{0,234} f^{0,4}$$

Çok takımlı işler için uygunluk fonksiyonu

Çok takımlı Frezeleme operasyonları için birim maliyet;

$$c_m = \sum_{i=1}^3 c_{2i} V_i^{-1} f_i^{-1} + \sum_{i=1}^3 c_{3i} V_i^{\frac{1}{n}-1} f_i^{\frac{w+g}{n}-1}$$

gibi bulunur.

şeklindedir. Burada katsayılar aşağıdaki

Birinci operasyon için (alın frezeleme):  $K_{21}=11.78$ ,  $c_{21}=22.382$ ,  $K_{31}=3.055 \times 10^{-12}$ ,  $c_{31}=1.51 \times 10^4$

Birinci operasyon için (cep frezeleme):  $K_{22}=3.53$ ,  $c_{22}=6.715$ ,  $K_{32}=1.9145 \times 10^{-12}$ ,  $c_{32}=1.445 \times 10^{-11}$

Birinci operasyon için (kanal frezeleme):  $K_{23}=0.30$ ,  $c_{23}=0.573$ ,  $K_{33}=1.63 \times 10^{-13}$ ,  $c_{33}=1.51 \times 10^{-12}$

Burada maliyet denklemini yeniden düzenlenirse;

$$c_m = 22,382V_1^{-1}f_1^{-1} + 1,51 \times 10^{-6}V_1^{2,33}f_1^{0,4} + 6,715V_2^{-1}f_2^{-1} + 1,445 \times 10^{-11}V_1^{6,67}f_1^{1,8} + 0,573V_3^{-1}f_3^{-1} + 1,23 \times 10^{-12}V_3^{6,67}f_3^{1,8}$$

Çok takımlı frezelemede üretim zamanı:

$$t_m = K_{21}V_1^{-1}f_1^{-1} + K_{22}V_2^{-1}f_2^{-1} + K_{23}V_3^{-1}f_3^{-1}$$

$$t_m = 11,78V_1^{-1}f_1^{-1} + 3,53V_2^{-1}f_2^{-1} + 0,30V_3^{-1}f_3^{-1}$$

Bu eşitlik gerçek işleme zamanını gösterir.

Çok takımlı işler için tek takımlıda olduğu gibi çok kriterli optimizasyon uygunluk fonksiyonu,  $w_1$  ve  $w_2$  ağırlık değeri olmak üzere;

$$F(x) = w_1c_m + w_2t_m \quad \text{olarak tanımlanır.}$$

Tek takımlı operasyonlar için kısıtlar:

$$g_1 = V - 150 \leq 0$$

$$g_2 = 50 - V \leq 0$$

$$g_3 = f - 0,3 \leq 0$$

$$g_4 = 0,08 - f \leq 0$$

$$g_5 = 0,07576Vf^{0,8} - 1 \leq 0$$

$$g_6 = 3,198f - 1 \leq 0$$

Çok takımlı operasyonlar için kısıtlar:

Birinci operasyon için kısıtlar aşağıdaki gibi verilir.

$$g_1 = V - 150 \leq 0$$

$$g_2 = 50 - V \leq 0$$

$$g_3 = f - 0,3 \leq 0$$

$$g_4 = 0,05 - f \leq 0$$

$$g_5 = 0,07576Vf^{0,8} - 1 \leq 0$$

$$g_6 = 3,198f - 1 \leq 0$$

İkinci operasyon için kısıtlar aşağıdaki gibi verilir.

$$g_1 = V - 80 \leq 0$$

$$g_2 = 20 - V \leq 0$$

$$g_3 = f - 0,3 \leq 0$$

$$g_4 = 0,05 - f \leq 0$$

$$g_5 = 0,05369Vf^{0,8} - 1 \leq 0$$

$$g_6 = 0,993f^2 - 1 \leq 0$$

Üçüncü operasyon için kısıtlar aşağıdaki gibi verilir.

$$g_1 = V - 60 \leq 0$$

$$g_2 = 20 - V \leq 0$$

$$g_3 = f - 0,3 \leq 0$$

$$g_4 = 0,05 - f \leq 0$$

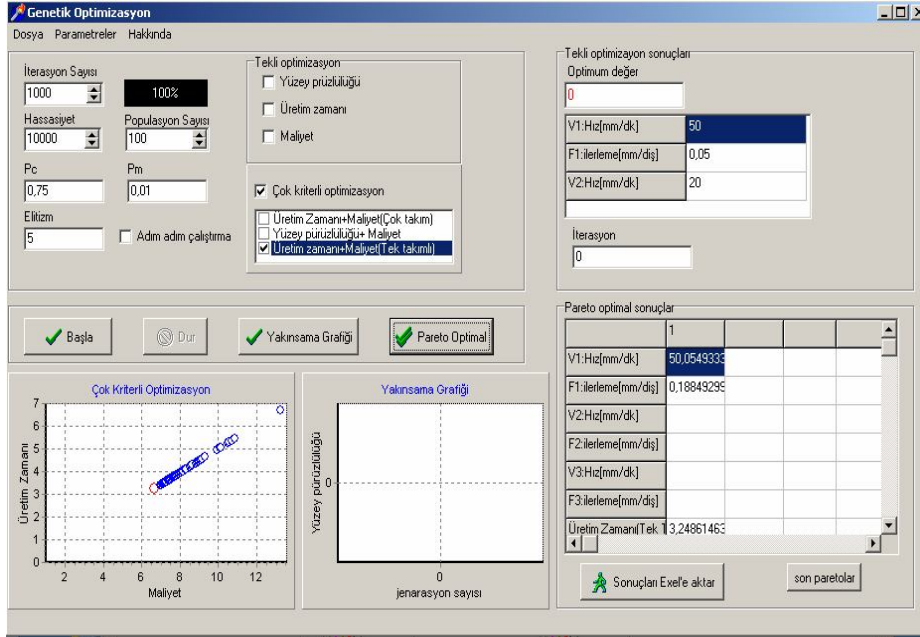
$$g_5 = 0,0505Vf^{0,8} - 1 \leq 0$$

$$g_6 = 0,828f^2 - 1 \leq 0$$



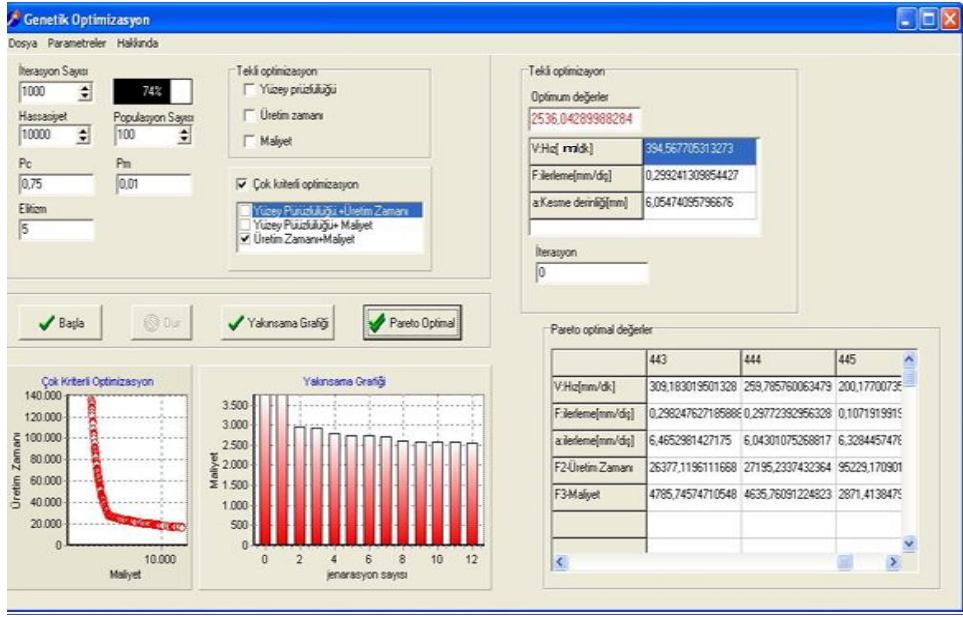
Sabit olarak belirlediğimiz değerlerden bazıları ise; burun yarıçapı ( $r$ ), diş sayısı ( $z$ ), freze yarıçapı ( $d$ ),  $K$  sabitleri, üssel indisler ve alt indisler olmak üzere Çizelge 1.3 de gösterilmiştir.

Genetik algoritmaya ait parametreler popülasyon sayısı, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve elitizm kullanıcı tarafından girilebilmektedir. Ayrıca çok takımlı ve tek takımlı optimizasyon seçeneklerini konularak her iki değerlendirmeyi de yapma imkanı sunulmuştur. Bulunan pareto optimal sonuçlar grafik olarak çizdirilmekte ve Excel'e aktarılmaktadır.



Şekil 1a. Tek takımlı işler için program ana arayüzü

Tek takımlı operasyonlar için Genetik algoritma parametreleri için alınan değerler Çizelge 1' de verilmiştir. Yapılan frezeleme işlemi farklı kısıt aralıklarında alın frezeleme ve parmak frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir ve yazılım programından elde edilen sonuçlar alın frezeleme ve parmak frezeleme işlemi için elde edilen sonuçlar doğrultusunda kıyaslanmıştır. Formülasyon işleminde kullandığımız sabit değerler Çizelge 2' de gösterilmiştir.



Şekil 1b. Yazılım Programı Başlangıç Parametrelerinin Kullanıldığı Arayüz

Kısıt aralıkları olarak belirlediğimiz değerler Çizelge 3 ve Çizelge 4' de gösterilmiştir. Bu değerler frezeleme işlemine ait kataloğlardan en uygun değerler olarak alınmıştır. Mutasyon oranı ve çaprazlama oranı için parametre literatürde bulunan değer aralıklarından 0,75 ve 0,01 değerleri alınmış, üreme işlemleri için ise parametre optimizasyonu optimizasyonu ile belirlenmiş en iyi kombinasyon olan "rulet tekerleği" yöntemi kullanılmıştır. Popülasyon sayısı 100 olarak belirlenmiş, alın frezeleme ve parmak frezeleme için yazılım programı 1000 kez çalıştırılmış ve optimum kesme koşulları elde edilmiştir. Hassasiyet değerini 10000 olarak alarak  $P_c$  ve  $P_m$  değerlerini ifade eden değerler de sırasıyla çaprazlama ve mutasyon oranlarıdır.

Çizelge 1. Çok Amaçlı Fonksiyon İçin Başlangıç Değerleri

Popülasyon Sayısı	İterasyon Sayısı	Hassasiyet	$P_c$	$P_m$	Elitizm
100	1000	10000	0,75	0,01	5

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	V1	f1	V2	Q	V3	B	Üretim Za	Maliyet(Tek takım)	
2	50,02441	0,188737					3,24776	6,67792	
3	50,02441	0,188737					3,24776	6,67792	
4									
5									
6									

Şekil 3. Tek takımlı işler için Pareto optimal sonuçları

Çok takımlı işler olarak da Alın frezeleme, Cep frezeleme ve Kanal frezeleme ele alınmış ve üretim zamanı ve maliyet optimize edilmiştir. Çok takımlı işler için parametrelerin değer aralıkları Çizelge 4 de verilmiştir. Elde ettiğimiz her optimum kesme koşulu değeri için Çizelge 4. ve Çizelge 5 de belirtilen problem aşamasında kullandığımız minimum ve maksimum değer aralıkları verilen  $V$ ,  $f$  ve  $a$  değerleri kullanılmıştır. Çizelge 4' de verilen değerlerin çözüm sonuçlarının bir kısmı Çizelge 5.' de belirtilmiştir. Çok takımlı işler için programı arayüzü Şekil 5 de görülmektedir. Çok takımlı işler için Popülasyon sayısı 100, iterasyon sayısı 1000 çaprazlama oranı  $P_c=0.75$  ve  $P_m=0.01$  değerleri verilerek gerçekleştirilen optimizasyonun pareto optimal sonuçlar Şekil 6 da görülmektedir.

Çizelge 2. Alın Ve Parmak Frezeleme İçin Sabit Değerler

Sabitler	Girilen Değerler	Sabitler	Girilen Değerler	Sabitler	Girilen Değerler
a	0	$C_{mat}$	10	n	0,15
b	0,5359	$C_1$	4	g	0,14
c	0,110	$C_o$	16	w	0,28
d	0,1737	D	50	r	1,2
$b_0$	-0,3192	K	2,24	$t_s$	3
$b_1$	0,01097	$K_1$	0,015	$t_{tc}$	11
$b_2$	0,02173	$K_2$	0,016	z	8
$b_3$	0,1191	$K_e$	0,0175		
$b_4$	0,1200	$K_3$	0,0135		
C	0,2094	&	0,02		

Çizelge 3. Alın Frezeleme Parametre değerleri

Değişkenler	Minimum	Maksimum	Değişkenler	Minimum	Maksimum
V : (m/dk)	200	400	V : (m/dk)	150	450
f : (mm/diş)	0,08	0,30	f : (mm/diş)	0,10	0,30
a : (mm)	6	10	a : (mm)	10	20

Çizelge 4. Parmak Frezeleme Param.

Yapılan çalışmada çoklu optimizasyona yapılmış olup, amaç fonksiyonlarımız şu şekilde eşleştirilmiştir

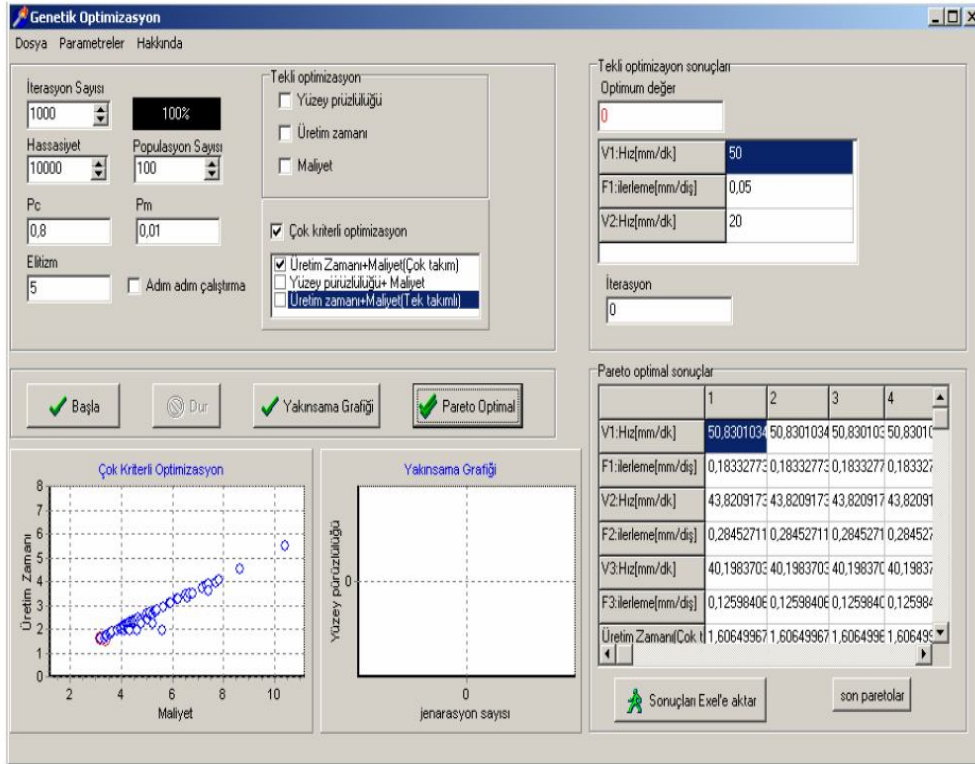
Yüzey pürüzlülüğü + Üretim zamanı

Yüzey pürüzlülüğü + Maliyet

Üretim zamanı + Maliyet

çoklu amaç fonksiyon için elde edilen değerler ve kullandığımız alın frezeleme parametreleri için üretim zamanı + maliyet amaç fonksiyonlarından oluşan optimizasyon sonuçları Çizelge 5.' de verilmiştir.

$F_1$  yüzey pürüzlülüğü fonksiyonu,  $F_2$  üretim zamanı fonksiyonu ve  $F_3$  maliyet fonksiyonu olmak üzere Pareto optimizasyonunu kullanarak elde ettiğimiz  $V$ ,  $f$  ve  $a$  Pareto optimal değerleri şu şekildedir;



Şekil 4. Çok takımlı işler için program arayüzü

Yapılan Pareto optimizasyonuna göre 1000 iterasyon sonucu elde ettiğimiz sonuçların tamamı verdiğimiz kısıtlar arasında kalan değerlerdir. Yukarıda verilen  $F_2$  ve  $F_3$  fonksiyonlarının bileşiminden oluşan Pareto optimizasyonuna göre elde ettiğimiz optimum sonuçlar ise Çizelge 1.6. 'da verilmiştir. İlk etapta kısıtları sağlayan ve minimum maliyetle birlikte minimum üretim zamanını veren  $V$ ,  $f$ ,  $a$  üçlüsü 1000 iterasyon sonucu hep yenilenmiştir. Yapılan çalışmada 47,85745... TL., maliyeti veren 263,771196... dak., üretim zamanını veren  $V$ ,  $f$ ,  $a$  üçlüsünün değerleri sırası ile şu şekildedir; 309,1830195 m/dak. ; 0,2982476227 mm/diş ve 6,465298142 mm.' dir. Her iterasyonda elde ettiğimiz değerler değişirken minimize ettiğimiz fonksiyonları bize veren optimum kesme koşulları belirlenmiştir. Üretim zamanı ve maliyet olarak adlandırılan  $F_1$  ve  $F_2$  çiftini minimize eden optimum değerler yazılım programından kopyalanan arayüz olarak gösterilen Şekil 6'da verilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	V1	f1	V2	f2	V3	f3	Üretim Zarı	Maliyet(Çok Takım).	
2	50,8301	0,183328	43,82092	0,284527	40,19837	0,125984	1,6065	3,196478	
3	50,8301	0,183328	43,82092	0,284527	40,19837	0,125984	1,6065	3,196478	
4	50,8301	0,183328	43,82092	0,284527	40,19837	0,125984	1,6065	3,196478	
5	50,8301	0,183328	43,82092	0,284527	40,19837	0,125984	1,6065	3,196478	
6	50,8301	0,183328	43,82092	0,284527	40,19837	0,125984	1,6065	3,196478	
7	50,58696	0,182374	51,86366	0,239866	34,13984	0,242561	1,59798	3,341652	
8	50,86673	0,17962	50,36348	0,279629	53,32987	0,126728	1,584355	3,357173	
9	50,44557	0,186341	53,58806	0,247089	49,52727	0,160775	1,55745	3,374649	
10									
11									

Şekil 5. Çok takımlı işler için Pareto optimal sonuçlar

Çizelge 5. Pareto Modeline Göre Problem Sonuçları

İterasyon Sayısı	İterasyon 1	İterasyon 2	İterasyon 3
V: hız (m/dk)	309	259	200
f: ilerleme(mm/diş)	0,298	0,209	0,107
a:kesme derinliği(mm)	6,4	6,04	6,3
$F_2$ :Üretim zamanı	263	271	952
$F_3$ : Maliyet	47	46	28

Pareto optimizasyon tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlara göre minimum üretim zamanını ve minimum maliyeti veren  $V$ ,  $f$ ,  $a$  üçlüsünün optimum değerleri sırası ile şu şekildedir; 394,567705313273 m/dak; 0,299241309854427 mm/diş ve 6,05474095796676 mm.' dir. Sonuçları incelediğimizde Pareto optimizasyonu ile yaptığımız çalışmada GA kullanarak elde edilen değerler kısıtları sağlayarak a, kesme derinliği, değeri için minimum sınıra yakın değerler; f, ilerleme hızı, değeri için maksimum sınıra yakın değerler ve V, kesme hızı, değeri için yine maksimum sınıra yakın Pareto optimal sonuçlar bize amaç fonksiyonlarımızı minimize etmektedir.

Tekli optimizasyon

Optimum değerler

2536,04289988284

V:Hız[ m/dk]	394.567705313273
F:ilerleme[mm/diş]	0,299241309854427
a:Kesme derinliği[mm]	6,05474095796676

İterasyon

0

Şekil 6. Üretim Zamanı ve Maliyet Fonk.unu Minimize Eden Optimum parametreleri veren Arayüz

#### 4. Elde Edilen Sonuçlar

Çok amaçlı optimizasyon problemlerine örnek olarak bir frezeleme işleminde alın ve parmak frezelemenin belirlenen amaç fonksiyonlarına göre Pareto tarafından geliştirilen modelin, GA operatörlerinin etkinliği incelenmiş ve en uygun çaprazlama ve mutasyon kombinasyonunun literatürde bulunan aralıklara bağlı olarak seçilmiştir. Literatürde çaprazlama oranları 0,5 ile 0,9 arasında olması ve mutasyon oranının da 0,01 ile 0,05 arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Analizini yaptığımızda bu modelin çözümünde kullanılacak mutasyon ve çaprazlama oranlarının sırasıyla 0,75 ve 0,01 olarak seçilmiştir. GA yardımı ile elde edilen sonuçların tahmin edilen normal standart sonuçlara yakınlığı gözlenmiştir. Pareto tarafından geliştirilen çözümlerde ikili (binary) sayılı kodlama sistemi kullanılmış ve daha etkin sonuçlar elde edilmiştir, dolayısıyla gerçek sayılı kodlama sistemi yerine, binary (ikili) sayılı kodlama sisteminin daha etkin olabileceği düşünülmektedir.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde GA' ların kullanılması istenilen sonuçlara ulaşmayı kolaylaştırmaktadır. Optimizasyon problemlerinin klasik çözümlerinde genellikle tek amaç hedeflenmektedir ve amaç sayısı arttığında klasik teknikler yetersiz kalmaktadır. Oysa GA, problem çözümünde tüm amaçları göz önünde tutabilmekte ve es bu amaçları sağlayabilmektedir.

Optimizasyon problemlerinde tek amaçlı fonksiyonlardan çok amaçlı fonksiyonlara doğru çözüm aranmaya başlandığı noktada, çözümlerin bulunması güç olmaktadır. GA kullanılarak optimizasyonu yapılan problemlerde amaç fonksiyonlarımızı tek tek belirleyerek ve belirlediğimiz amaç fonksiyonlarının tekli optimizasyonu yapılabilmektedir. Ayrıca, amaç fonksiyonlarımız birleştirilerek çok kriterli optimizasyona dönüştürülerek GA tekniği ile optimize edilmekte ve çözüm aranmaktadır. Pareto modelini kullanarak yaptığımız çalışmada öncelikle amaç fonksiyonlarımızın tekli optimizasyonu yapılmıştır, daha sonra amaç fonksiyonlarımız birleştirilerek GA tekniği ile yeniden optimize edilmiştir.

Yapılan çalışmada binary (ikili) sayılı kodlama tekniği kullanılmıştır. Bu teknik gerçek sayı sistemli GA kodlamalarından daha iyi çözümler verdiği görülmüştür. Gerçek sayılı GA kodlama sistemleri daha hızlı çözüm bulmasına rağmen, binary (ikili) sayılı GA kodlama sistemleri evrimi daha iyi simle etmekte ve daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle Pareto metodu ile GA tekniği kullanılarak yapılan optimizasyon işlemlerinde binary (ikili) sayı sistemlerin kullanılması daha uygundur. Yapılan çalışmada seçim aşamasında elitizm modelini kullanarak seçim yapılmıştır. Yani her iterasyon sonucunda paretooptimal sonuçlardan bir miktar birey (kromozom) rasgele olarak alınır ve bir sonraki popülasyona ilave edilir. Elitizm için alınacak paretooptimal çözüm miktarı 5-10

birey (kromozom) arasında değişir. Yapılan çalışmada elitizm için paretooptimal sonuçlardan rasgele seçilecek birey (kromozom) sayısı 5 olarak belirlenmiştir. Her iterasyon sonucu 5 birey (kromozom) bir sonraki popülasyona ilave edilmistir.

GA kullanılarak optimize edilecek problemler için kullanılacak çaprazlama oranları 0,5 ile 0,9 arasında, mutasyon oranları ise 0,01 ile 0,05 arasında değişmektedir. Yapılan çalışmada literatürde belirtilen degerlere göre çaprazlama oranı ve mutasyon oranı literatürde bulunan değerlerden seçilmiştir. Seleksiyonda Rulet tekerleği yöntemi kullanılmıştır. Çaprazlama da tek noktali çaprazlama esas alınmıştır. Mutasyonda ise bit mutasyon işlemi uygulanmıştır. Bu anlatılan işlemler belirlediğimiz kısıt aralıkları içerisinde ve verdiğimiz değişken parametreleri aralıkları arasında, sabit değerleri de kullanarak alın ve parmak frezeleme işlemleri için uygulanmıştır. Alın frezeleme ve parmak frezeleme işlemleri belirlediğimiz amaç fonksiyonları aynı fonksiyonlar olup; minimum üretim zamanında, minimum maliyette en kaliteli yüzeye sahip parçaların frezeleme işleminde alın ve parmak frezeleme yöntemlerini kullanarak islenmesinin analizi Pareto optimizasyon tekniği kullanılarak analiz edilmistir. Pareto tarafından geliştirilen modelin GA yardımı ile çözümü irdelenmiştir. Modelimizde kullandığımız amaç fonksiyonlarını optimize edecek V ve f parametreleri ikilik bitlerle kodlanmıştır. V parametresi 15 bit ve f parametresi 15 bit olarak kodlanmıştır. Her iterasyonda kullanılan parametre değerleri kodladığımız bit sayısına göre ve verdiğimiz kısıt aralıklarına göre yeni değerler alarak isleme sokulmuştur. Çoklu optimizasyon tekniğinde Pareto modelini kullanarak GA tekniği ile optimizasyon yapılan problemlerde birden fazla çözüm noktası elde edilir. Bu çözüm noktaları birbirleri ile kıyaslanacaktır ve uygun olmayan çözümler elimine edilecektir, uygun olan çözümler ise çözüm kümesine aktarılacaktır. Bu çalışmada tek takımlı ve çok takımlı isler için frezeleme optimum koşulları belirlenmiştir. Bu çok kriterli bir problemin paretooptimal çözümleri GA metodu kullanılarak irdelenmiştir ve çıkan Pareto optimal çözümler her iki işlem için kıyaslanmıştır. Elde edilen paretooptimal sonuçlar üretici için alternatif çözümler sunmaktadır. Klasik yöntemlerle kıyaslandığında daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

## Notasyonlar

- $a_a$ (mm) Aksenal kesme derinliği  
 $a_r$ (mm) Radyal kesme derinliği  
 $a, b, c, d$ (mm) Yüzey pürüzl. denk. üstel sabitler  
 $C$  Yüzey pürüzlülüğü denk. sabiti  
 $C_o$  (TL) İşçilik ve üst yönetim maliyeti  
 $C_1$ (TL) Ayar maliyeti  
 $C_{mat}$ (TL) Hazırlık maliyeti  
 $C_u$ (TL) Birim üretim maliyeti  
 $D$ (mm) Freze çapı  
 $f$ (mm/diş) İlerleme hızı  
 $F$ (Newton) Tezgah kuvveti  
 $K$  İşleme zamanı katsayısı  
 $K_e$  Takım ömrü katsayısı  
 $K_1$  Birim üretim zamanı katsayısı  
 $K_2$  İşleme zamanı katsayısı  
 $K_3$  Birim üretim zamanı katsayısı  
 $\epsilon$  Üstel hata sembolü  
 $\&$  Takım ömrü eşitliği üstel sabiti  
 $n, g, w$  birim üretim zamanı üstel sabitleri  
 $N$ (dev/dak) Devir sayısı  
 $P$ (KW) Tezgah gücü  
 $R_a$ ( $\mu$ ) Yüzey pürüzlülüğü değeri  
 $R_i$  (TL) Kar oranı  
 $r$ (mm) Takım burun açısı  
 $T$ (dakika) Takım ömrü  
 $t_m$ (dakika) İşleme zamanı  
 $t_{tc}$ (dakika) Takım değiştirme zamanı  
 $t_s$ (dakika) Hazırlık zamanı  
 $t_u$ (dakika) işleme zamanı  
 $V$  (m/dak) Kesme hızı  
 $x_0$  Yüzey pürüzlülük denk. sabit  
 $x_1$ (m/dak) Kesme hızını kodlanmış değeri  
 $x_2$ (mm/diş) İlerleme hızını kodlanmış değeri  
 $x_3$ (radyan) Talaş açısını kodlanmış değeri  
 $x_4$ (mm) Burun yarıçapı kodlanmış değeri  
 $z$ (adet) Freze bıçağı üzerindeki diş sayısı



## Kaynaklar

- [1] Taylor, F.W., 1907. "On The Art Of Cutting Metals" , Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs., 28
- [2] S.M. Wu, D.S. Ermer, 1966, Maximum profit as the criterion in the determination of the optimum machining condition, J. Eng. Ind. Trans. ASME 88 435–442.
- [3] Bhattacharyya, A. , Gonzales, R. 1970. " Regression Analysis For Predicting Surface Finish And Its Application In The Determination Of The Optimum Machining Condition", Transactions of The ASME, Journal of Engineering For Industry, s.711-716
- [4] Ermer, D.S., 1971. "Optimisation Of The Constrained Machining Economics Problems By Geometric Programming". Computers Ind. Trans. ASME 93, 1067-1072
- [5] B.K. Lambert, A.G. Walvekar, 1978, Optimization of multi-pass machining operations, Int. J. Prod. Res. 16 (4) 259–265.
- [6] S.S. Rao, S.K. Hati, 1978, Computerised selection of optimum machining conditions for a job requiring multiple operations, J. Eng. Ind. Trans. ASME 100 356–362
- [7] Agaiou, 1992, The optimization of machining operations based on a combined criterion. Part 2. Multipass operations, Trans. ASME J. Eng. Ind. 114, 508–513.
- [8] Wang, J., 1993. "Multi-Objective Optimization Of Machining Operations Based On Neural Networks", Int. J. Adv. Manuf. Techol., 8, 235-243
- [9] Wang, J., 1993, "Constrained Optimization Of Rough Milling Operations", Ph. D. Thesis, The University Of Melbourne, Australia
- [10] R. Gupta, et al., Determination of optimal subdivision of depth of cut in multi-pass turning with constraints, Int. J. Prod. Res. 33 (1995) 2555–2565.
- [11] M. Tolouei-Rad, et al., On the optimization of machining parameters for milling operations, Int. J. Mach. Tool. Manuf. 37 (1) (1997) 1–16
- [12] J. Wang, (1998) Computer aided economic optimisation of end milling operations, Int. J. Prod. Econ. 54 307–320.
- [13] M.S. Shunmugam, et al., (2000) Selection of optimal conditions in multi-pass face milling using genetic algorithm Int. J. Mach. Tool Manuf. 40 () 401–414.
- [14] Arezzo, B. , Ridgway, K. 2000 , "Selection of Cutting Tools And Conditions of Machining Operations Using An Expert System" Computers Industry, Number: 42, s.43-58
- [15] Al-Ahmari, A.M.A., 2001 "Mathematical Model For Determining Machining Parameters In Multipass Turning Operations With Constraints" , International Journal Of Production Research, Volume 39, Number 15, 15, s. 3367-3376.
- [16] Balic, J., Cus, F., 2002, "Optimization of cutting process by GA approach "; Faculty of Mechanical Engineering, Production Engineering Institute of Maribor, Smetanova 17, P.O. Box 224, SI-2000 Maribor, Slovenia

- [17] N. Baskar, P. Asokan, R. Saravanan, G. Prabhakaran, Selection of optimal conditions in multi-pass face milling using non conventional methods, in: Proceedings of the 20th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, 2002, pp. 61–69.
- [18] N. Baskar, P. Asokan, R. Saravanan, G. Prabhakaran, 2003, Optimization of machining parameters for milling operations using particle swarm optimization algorithm, in: Proceedings of the MOSIM'03, pp.D13–21
- [19] K.-K. Kim, et al., A study on the precision machinability of ball end milling by cutting speed optimization, J. Mater. Process. Technol. 130/131(2002) 357–362.
- [20] Deshmukh, S., Suresh, P. and Venkaeswara, R., 2002, ' A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model ' ;Mechanical Engineering Department, Indian Institute of Technology, Delhi, New Delhi-110016, India Received 2 November 1999, received in revised form 3 January 2002; accepted 9 January 2002
- [21] N. Baskar, P. Asokan, R. Saravanan, G. Prabhakaran, 2005, Optimization of machining parameters for multi-tool milling operations using non-conventional methods, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 25 ( ) 1078–1088.
- [22] Goldberg, D.E., 1989, 'Genetic Algorithms In Search Optimization And Machine Learning'. Addison Wesley Publishing Company, USA.
- [23] Holland, J.H., 1992, "Genetic algorithms," Sci. Am. Pp. 66-72.
- [24] Holland, J.H., 1975, "Adaptation In Natural And Artificial Systems" University Of Michigan Press, Ann Arbor
- [25] Lawrence, D., 1990. Handbook Of Genetic Algorithms, Addison Wesley Machining Data Handbook., 1980. Vol. 1, 3rd Edition. Machinability Data Center, OHJ.J.
- [26] Wassila Bouzid, 2005, 'Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning' Journal of Materials processing Technology, 161(2005)388-39