

Kanat profili dizaynında genetik algoritma kullanımı

Abdurrahman HACIOĞLU*, **İbrahim ÖZKOL**

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, kanat profili dizaynı amacıyla kullanılacak reel kodlu genetik algoritmalar için yeni bir yaklaşım olan Titreşim kavramı ve bu kavramının uygulamasıyla ortaya çıkan Titreşimli Mutasyon tekniği açıklanmıştır. Titreşim kavramının arkasında yatan temel fikir, genetik algoritmanın arama/bulma etkinliğinin artırılması için popülasyonun periyodik olarak çözüm uzayına yayılmasıdır. Bu amaçla kullanılan Titreşimli Mutasyon Tekniği ile popülasyondaki tüm bireyler periyodik olarak mutasyon işleminden geçirilir ve popülasyonda etkin bir çeşitlilik sağlanır. Vizkoz olmayan, sesaltı, sıkıştırılmaz akış şartlarındaki kanat profili dizaynı uygulamaları yöntemin etkinliğini göstermiş ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği hesabı sayısı önemli ölçüde azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Titreşimli genetik algoritma, kanat profili dizaynı.*

Using genetic algorithm in airfoil design

Abstract

In this study, new approaches to genetic algorithms used for aerodynamic design and optimization, called Vibration concept and its applications are made. Vibrational Mutation technique resulting from Vibration concept, and the method of Vibrational Genetic Algorithm, which uses this technique, are detailed. Vibration concept is based on the idea that the population is spread out over the design space periodically to make exploration/exploitation of the genetic algorithm more effective. The aim of Vibrational Mutation is to get effective diversity in the population by using mutation operator. Values of the individuals in the population are changed periodically in mutational manner by using vibrational mutation technique during genetic process. So, the individuals concentrated on some region in the design space, spread out over the design space again. Thus, it is possible to escape local optimums quickly and to explore more fitting individuals. Therefore, genetic process gets faster and solution can be obtained by making less CFD calculation. Application of the method to a test function has given good results; genetic process have become faster about two times for aerodynamic optimization. Applying it to inverse airfoil design for subsonic, inviscid, incompressible flow condition, and the number of Computational Fluid Dynamics calculations are decreased considerably shows effectiveness of this method.

Keywords: *Vibrational genetic algorithm, airfoil design.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Abdurrahman HACIOĞLU. a.hacioglu @hho.edu.tr; Tel: (212) 663 24 90 dahili: 4341. Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Aerodinamik dizayn ve optimizasyonda genetik algoritma kullanımı" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 26.09.2003 tarihinde dergiye ulaşmış, 22.10.2003 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.04.2004 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Bir kanat profilinin tersten (inverse) dizaynı ile, hedeflenmiş olan bir basınç dağılımına karşılık gelen kanat profili elde edilir. Genetik algoritma (GA) bu amaçla kullanıldığı zaman yapılan ilk işlem, hedef basınç dağılımı için aday çözüm olan başlangıç profillerinin (başlangıç popülasyonu) üretilmesidir. Bundan sonra Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) hesabı gerçekleştirilir ve amaç fonksiyona bağlı olarak popülasyon içerisinde uygun profiller seçilir. Bunu takiben seçilmiş olan uygun profillerden yeni bir popülasyon üretilir. Bütün bu işlemler belirlenmiş olan bir yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar devam eder. Bu şekilde yapılan bir dizayn çalışması sırasında yüzlerce popülasyonun üretilmesi ve binlerce HAD hesabı yapılması gerekir. Toplam hesap süresi, kullanılan HAD tekniğine bağlı olarak, saatleri hatta günleri bulabilir. İşte bu nedenle, daha az işlemle ve dolayısıyla daha kısa sürede aerodinamik dizayn yapılmasını sağlayacak genetik algoritmalara ihtiyaç vardır.

Geçtiğimiz yakın zaman içerisinde bazı hızlı GA yöntemleri ortaya atılmıştır. Falco ve diğerleri (1996) Breeder Genetik Algoritması'nı (Mühlenbein ve Schlierkamp-Voosen, 1993) aerodinamik dizayn ve optimizasyon için uygulamışlar ve hızlı yakınsama sağlamışlardır. Aerodinamik dizayn ve optimizasyonda kullanılacak olan ve hesap süresini azaltan bir mutasyon tekniği yine Falco ve diğerleri (1998) tarafından geliştirilmiştir. Vicini ve Qualiarella (1999), gradyan esaslı yöntemle GA tekniğini birleştiren hibrid bir metot geliştirerek işlem sayısını azaltmışlardır. Tse ve Chan (1999), mikro genetik algoritma ile yapay sinir ağı kullanımını birlikte yaparak hızlı bir algoritma elde etmişlerdir.

Titreşimli Genetik Algoritma (TGA), etkin bir çeşitlilik (diversity) ile arama ve bulmayı (exploration/exploitation) sağlaması nedeniyle yakınsama performansını arttıran bir yöntemdir. Titreşimden kastedilen, genetik işlemlerde kullanılan birtakım parametrelerde meydana getirilen bazı dalga formlarındaki salınımdır. Titreşim yaklaşımı hem mutasyon hem de çaprazlama işlemleri için kullanılabilir.

Titreşimli genetik algoritma

Obayashi ve diğerlerinin (1999) belirttikleri gibi, reel kodlu GA'lar için kullanılan mutasyon oranının, ikilik sistemde kodlanmış (binary coded) GA'larda kullanılana göre daha büyük değerler alması gerekir. Bunun nedeni, ikilik sistemde kodlanmış bir sayının bir hanesinde yapılacak bir değişikliğin, sayı değerini büyük oranda değiştirebilecek olmasıdır. Oysa reel kodlu bir sayı için benzeri bir işlemin önemli bir değişikliğe yol açma şansı daha azdır. Dolayısıyla, ikilik sistemdeki bir GA ile aynı mutasyon oranını kullanan reel kodlu bir GA dizayn uzayını arama açısından daha zayıf kalacaktır. Reel kodlu GA kullanılırken mutasyon oranının yüksek tutulması, popülasyonun fazla bozulmasına yol açacağından performansı olumsuz etkiler. Ancak, bu olumsuzluğun giderilmesi halinde yüksek mutasyon oranı GA'nın dizayn uzayını tam olarak araştırılabilmesini sağlayacaktır. Bu düşünce, önermiş olduğumuz ve takip eden bölümde açıklanacak olan *Titreşimli Mutasyon* tekniği ile gerçekleştirilebilir. Bu mutasyon esaslı titreşim yaklaşımı, dizayn uzayının değişik bölgelerinden eş zamanlı olarak örnekleme yapılması ve böylece global optimumun mümkün olduğunca çabuk yakalanabilmesi ilkesine dayanır. Bu amaçla, popülasyondaki her birey titreşim yaklaşımı ile periyodik olarak mutasyon geçirir ve popülasyonun dizayn uzayına yayılması sağlanır. Böylece yerel optimumlardan çabuk kurtulmak ya da bunlara hiç yakalanmamak, daha uygun bireyleri keşfetmek mümkün olabilecektir.

Titreşim yaklaşımını kullanan GA, tarafımızdan *Titreşimli Genetik Algoritma* (TGA) olarak isimlendirilmiştir. Yöntemin ilk uygulaması (Hacıoğlu ve Özkol, 2002) ile yapılmıştır. Metodun tersten kanat profili dizaynı problemine uygulaması yapılacak ve etkinliği sonuçlar bölümünde verilecektir. HAD hesapları için, kanat profili etrafındaki iki boyutlu, viskoz olmayan, sıkıştırılamaz akışlarda kullanılan girdap panel yöntemi (Kethe ve Chow, 1998) kullanılacaktır.

Titreşimli mutasyon

Mutasyon esaslı titreşim yaklaşımı yenilemeden hemen sonra uygulanır. Uygulama, Şekil 1'de

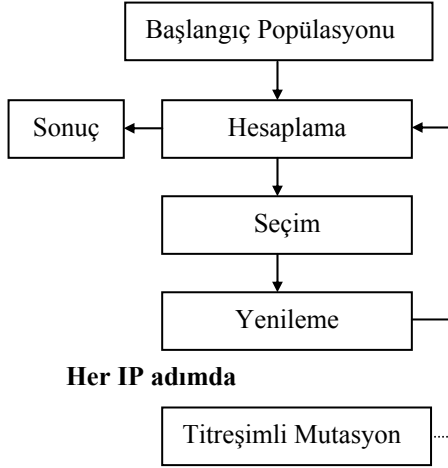
gösterildiği gibi, genetik sürecin başlangıcından itibaren periyodik olarak gerçekleştirilir. İlk adımı takiben, genliği rassal bir şekilde değişen bir dalga popülasyona etki ettirilir. Titreşimli mutasyon sırasında, popülasyondaki bütün kromozomların (bireyler) tüm genleri aşağıdaki dalgaya bağlı olarak mutasyon geçirirler:

$$y_i^m = y_i^m \cdot [1 + w \cdot MA \cdot (0.5 - u)]$$

$$m = 1, \dots, n$$

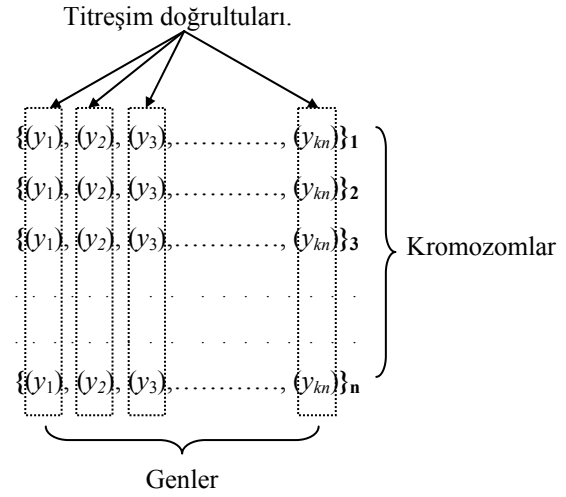
$$i = 1, \dots, kn$$
(1)

Burada y gen (kontrol noktası), kn kromozomdaki toplam gen sayısı, n popülasyondaki toplam birey (kromozom) sayısı, MA ana genlik ve u $[0,1]$ aralığında rassal bir reel sayı olup, w , bir civarında reel bir sayıdır.



Şekil 1. Titreşimli mutasyonun akış şeması

Dalga uygulaması, ilk kromozomun belirli bir sırasındaki genden başlar ve Şekil 2'de gösterildiği gibi diğer kromozomlardaki aynı sıradaki genler boyunca devam eder. Bu işlem popülasyondaki tüm bireylere her IP periyotta uygulanır. IP bir tam sayı olmak üzere, mutasyon oranı $P_m=1/IP$ 'dir. Genetik süreç boyunca iyi bir performans yakalanması için titreşim periyodu IP 'nin uygun bir değere sabitlenmesi gereklidir. Bu periyod değerinin (dolayısıyla mutasyon oranı P_m değerinin) büyüklüğü metodun performansını etkileyecektir.



Şekil 2. Titreşim doğrultuları

Titreşim uygulaması, yeni popülasyondaki bireylerin çözüm bölgesinde (dizayn uzayı) rassal bir şekilde yayılmasını sağlar. Bu yeni popülasyondan itibaren genetik süreç belli bir süre (IP periyoduna göre) titreşim uygulaması olmaksızın devam eder. Çünkü titreşim sonucu ortaya çıkan popülasyondan en uygun bireylerin elde edilebilmesi biraz zaman alacaktır. Sonra tekrar titreşim uygulaması yapılarak en son adımda bulunmuş olan popülasyonun çözüm bölgesine yayılması sağlanır. Titreşimle ortaya çıkan, rassal bir şekilde çözüm bölgesine yayılmış popülasyon, yerel optimumlardan çabuk kurtulmayı ya da bunlara hiç takılmamayı sağlar. TGA'nın en önemli özelliği budur. Öte yandan, genetik süreç devam ederken popülasyonun ortalama uygunluk değerine dikkat edilmesi gereklidir. Ortalama uygunluk değeri artarken, titreşim amacıyla kullanılan dalganın ana genliği azaltılmalıdır. Ortalama uygunluk değerinin artmasıyla global optimuma yaklaşılabileceği için, titreşim uygulaması sırasında popülasyonun başlangıçtaki gibi çok geniş bir bölgeye yayılması gereksiz olacaktır ve bu aynı zamanda performansı olumsuz etkileyecektir. Bununla beraber, global optimuma yaklaşıırken popülasyonu dar bir aralıkta titreşime maruz bırakmak global optimumu yakalamayı hızlandıracaktır. Bu nedenle ana genlik değeri MA genetik süreç boyunca aşağıdaki gibi belirlenir:

$$MA = \left[\frac{\log(1 + AF_0)}{\log(1 + AF_k)} \right]^r \quad (2)$$

AF_0 ve AF_k sırasıyla genetik sürecin başlangıç adımındaki ve içinde bulunulan adımındaki ortalama uygunluk değerleri olup r reel bir sayıdır. Genetik sürecin ilk adımında MA 1 olacaktır. Eğer ilk adım için 1'den farklı bir sayı arzu edilirse, MA bir parametre ile çarpılarak istenen ayarlama yapılabilir. MA , olabilecek enbüyük dalga genliğini belirler. Denklem (2)'deki r , MA değerinin azalma hızını belirler. Hızlı bir azalma için r büyük bir değer almalı, yavaş bir azalma için ise r küçültülmelidir.

Bu bölümde verilen formüller FORTRAN programlama dilinde aşağıdaki gibi yazılır:

```

MA=(log(1+AF0)/log(1+AFk))*r
  do j=1, kn
    do i=1,n
      y(i,j)=y(i,j)*(1+w*MA*(0.5-u))
    enddo
  enddo

```

Titreşimli mutasyon işlemlerini (aynı zamanda yukarıdaki FORTRAN kodun) kısaca sözlü olarak şu şekilde özetleyebiliriz: Genetik sürecin ilk adımında, uygunluk değerlerinin hesaplanması, uygun bireylerin seçimi ve yenileme işlemlerini takiben ortaya çıkan yeni bireylere titreşim uygulaması yapılır. İlk olarak, bütün kromozomların ilk sıradaki genleri ($j=1$) baştan sona ($i=1$ 'den n 'e kadar) titreşime tabi tutulur. Bunu takiben bütün kromozomların ikinci sırasındaki ($j=2$) genler aynı şekilde ($i=1$ 'den n 'e kadar) titreşimden geçer. Tüm kromozomların son sırasındaki genler ($j=kn$) de titreşimden geçtikten sonra başlangıç adımı için titreşim uygulaması sona erer. Genetik süreç, bunu takip eden $IP-1$ adımında (mutasyon oranı $P_m = 1/IP$), titreşim uygulaması olmaksızın mutataşım şeklinde (uygunluk değerlerinin hesaplanması, seçim, yenileme) devam eder. IP nci adımda, aynı ilk adımda olduğu gibi titreşim uygulaması yapılır. Bu uygulama genetik süreç devam ederken her IP adımda bir tekrarlanır.

Test fonksiyonuna uygulama

Test fonksiyonu Denklem (3)'te tanımlanan Griewank fonsiyonudur:

$$f_{Griewank} = \sum_{i=1}^{10} \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^{10} \cos \left[\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right] + 1 \quad (3)$$

Fonksiyonun -600 ile 600 aralığında global optimumu bulunacaktır. Bu fonksiyon $x_i=0$, $i=1, \dots, 10$ için $f_{Griewank}=0$ olacak şekilde global minimuma sahiptir. Griewank fonsiyonu belirtilen aralıkta çok fazla yerel optimumu olan bir fonksiyondur.

Uygulama için, çaprazlama yöntemi BLX- α (Eshelman ve Schaffer, 1993) ve $\alpha=0.5$; mutasyon oranı $P_m = 0.2$, yani $IP=5$ olarak alınmıştır. Popülasyon büyüklüğü 50'dir. Mutasyon oranı $P_m = 0$ (titreşim uygulaması yok) hali de test edilmiştir. Çaprazlama oranı $P_c=1$ olup denklem (2)'deki r değeri 0.1 olarak alınmıştır. Seçim yöntemi "Stochastic Universal Sampling" (SUS) yöntemidir (Baker, 1987). Başlangıç popülasyonu $[-600.0, 600.0]$ aralığında rassal olarak oluşturulmuştur.

Şekil 3'de gösterilen sonuçlara göre TGA ($P_m=0.2$ durumu) çok iyi bir performansa sahiptir. TGA kullanılan durumda en iyi uygulunun 10^{-15} değerine ulaşması 1100 yineleme (üretilen nesil) ile gerçekleşmiştir. Diğer taraftan titreşim uygulaması yapılmayan durumda ($P_m=0$) en iyi uygunluk değeri 100000 yineleme sonunda ancak 10^{-2} değerine ulaşmıştır.

Kanat profili dizaynı için GA işlemleri
Hedeflenen kanat profiline ait basınç katsayısı dağılımı, C_p girdi olarak verilir. Hedeflenen kanat profiline ulaşmak için çözüme NACA0012 gibi bilinen bir kanat profili ile başlanır. Bu tür problemler için çoğunlukla kullanılan hedef fonksiyonu literatürde:

$$J(\lambda) = \int_{\lambda} (C_{p\lambda} - C_{p_t})^2 d\lambda \quad (4)$$

olarak verilir. Burada $C_{p\lambda}$ ve C_{p_t} sırasıyla, kanat profili yüzeyi λ üzerindeki hesaplanan ve

hedeflenen basınç katsayılarıdır. Popülasyondaki kanat profillerinin uygunluk değeri için uygunluk fonksiyonu Denklem (5)'teki gibi olacaktır:

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{J(\lambda)} \quad (5)$$

Buna göre problem tipik bir enbüyük değeri elde etme problemi olur. Uygunluk değerinin sonsuza gitmesi durumunda hedeflenen kanat profili ile ulaşılan kanat profi tam olarak çakışmış olacaktır.

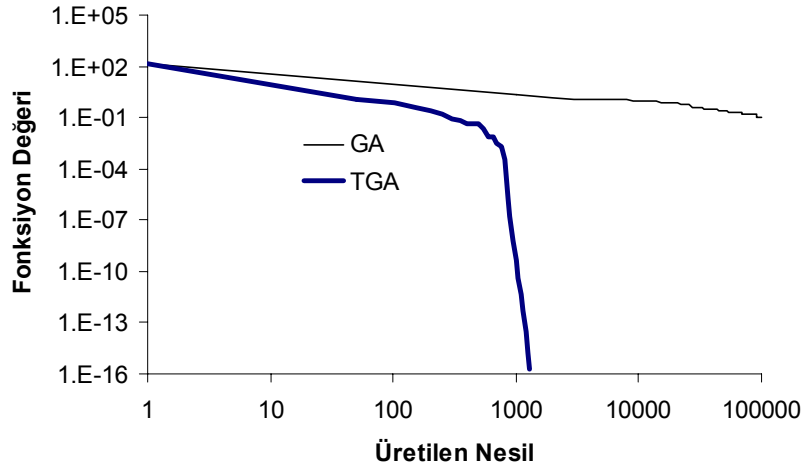
Genetik algoritma ile kanat profili dizaynındaki en önemli işlemlerden biri de kanat profili geometrisinin temsildir. Bu amaçla, kanat profilinin bir yüzeyine ait eğriyi m adet nokta ile ifade etmeyi sağlayan, ve aşağıda denklemleri verilen Bezier eğrisi temsili kullanılacaktır:

$$y(t) = \sum_{i=0}^m C_m^i t^i (1-t)^{m-i} y_i \quad (6)$$

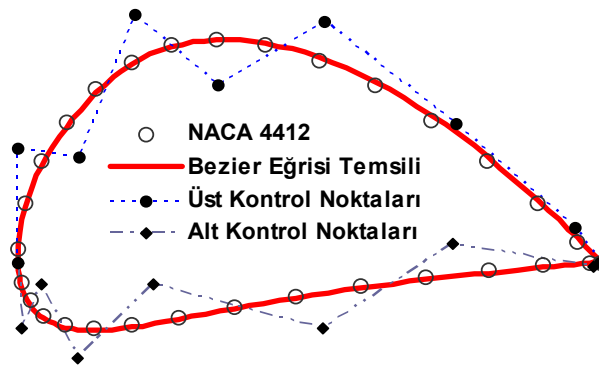
$$x(t) = \sum_{i=0}^m C_m^i t^i (1-t)^{m-i} x_i \quad (7)$$

Kanat profilinin bir yüzeyinin 8 nci mertebeden temsilinde 9 adet kontrol noktası kullanılır ve bunlardan, hücum kenarı ile firar kenarında olan 2 tanesi sabittir. $C_m^i = \frac{m!}{i!(m-i)!}$ olup, t , $[0,1]$

aralığında değişen değerler alan bir parametredir. Kontrol noktalarının koordinatları (x_i, y_i) ile verilmiştir. Burada x_i 'ler sabit tutularak, genetik süreçte yalnızca y_i değerleri kullanılır. Kanat profilinin yüzeyini ifade eden kontrol noktalarının tamamı bir kromozom oluştururken, herbir kontrol noktası da bir gen olacaktır. NACA4412 profilinin Bezier eğrisiyle temsili Şekil 4'de gösterilmiştir.



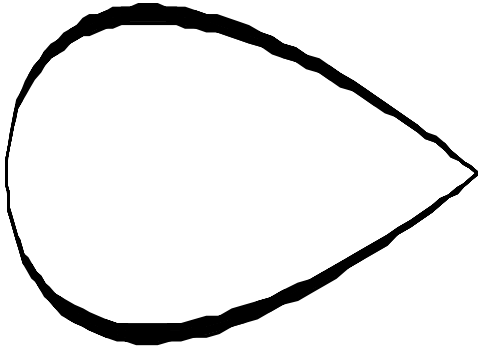
Şekil 3. Değişik GA'larla Griewank fonksiyonunun ulaştığı değerler



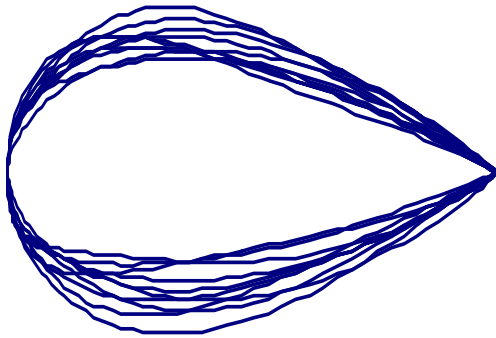
Şekil 4. NACA4412 profilinin Bezier eğrisi ile temsili

Uygulamalar

NACA4412 profilinin sıfır derece hücum açısındaki basınç katsayısı dağılımı, C_p , hedef olarak alınacaktır. Çözüme NACA0012 kanat profili ile başlanarak hedeflenen profile (NACA4412) ulaşılmaya çalışılacaktır. HAD tekniği olarak girdap panel metodu (Kueth ve Chow, 1998) kullanılacak ve hesaplarda kanat profili için 120 panel alınacaktır. NACA0012'nin kalınlık oranı ± 5 oranında düzgün bir şekilde değiştirilerek başlangıç popülasyonu oluşturulacaktır. Şekil 5'de başlangıç popülasyonu, Şekil 6'da ise ilk titreşimli mutasyon uygulamasından sonraki popülasyon görülmektedir. Uygulama farklı popülasyon büyüklükleri ile yapılacaktır.



Şekil 5. Başlangıç kanat profili popülasyonu



Şekil 6. Titreşimli mutasyon uygulamasından sonraki popülasyon

Popülasyon büyüklüğü, n ; 10, 20 ve 30 olarak alınacaktır. Çaprazlama oranı, $P_c=1$ olup mutasyon oranı, P_m , titreşimli mutasyon uygulamasının periyoduna (IP) bağlıdır. Seçim için SUS yöntemi kullanılacaktır.

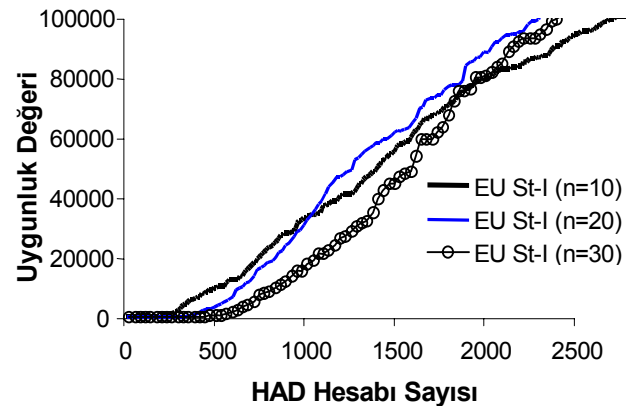
Uygulama aşağıdaki değişik stratejiler ile yapılacaktır:

- Strateji I: Çaprazlama tekniği BLX- α ve $\alpha=0.7$, $P_m=0$.
- Strateji II: Çaprazlama tekniği BLX- α ve $\alpha=0.7$, ilave olarak;
 - II.a. $P_m=1/7$ (Her 7 adımda titreşimli mutasyon yapılacak demektir.)
 - II.b. $P_m=1/8$
 - II.c. $P_m=1/9$
 - II.d. $P_m=1/10$

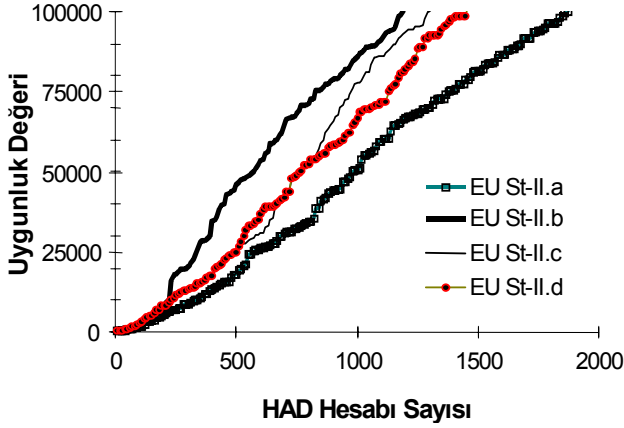
Titreşimli mutasyon uygulaması için denklem (2)'deki $r=4$ alınacaktır. Yapılan uygulamalarda yakınsama için uygunluk değerinin 100,000 olması yeterli olacaktır. Bu değer objective fonksiyonun değerinin 10^{-5} olmasına karşılık gelir. Verilecek olan sonuçların herbiri, 10 farklı denemenin ortalamasıdır. Kullanılan grafiklerde yatay eksen yapılan CFD hesabı sayısını, dikey eksen ise uygunluk değerini gösterecektir. Popülasyon büyüklüğü n olmak üzere, genetik prosesin herbir adımda n adet CFD hesabı yapıldığına dikkat edilmelidir.

Sonuçlar

Yukarıda NACA4412 profili için verilen stratejiler farklı popülasyon büyüklükleri ile uygulanmıştır. Şekil 7'de değişik popülasyon büyüklükleri için strateji I (St-I)'e ait eniyi uygunluk değerleri gösterilmiştir. Şekil 7'deki sonuçlara göre, farklı popülasyon büyüklükleri, St-I ile elde edilen sonuçları pek değiştirmemektedir. St-I ile yaklaşık 2500 CFD hesabı ile 100000 uygunluk değerine ulaşılmıştır. Şekil 8'de $n=10$ için elde edilen St-II'ye ait sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlardan St-II.b'nin en iyi sonucu verdiği görülmektedir. St-II.b ve $n=10$ için 1200 CFD hesabı ile 100,000 uygunluk değerine ulaşılmıştır.



Şekil 7. St-I için eniyi uygunluk (EU) değeri



Şekil 8. St-II için eniyi uygunluk (EU) değeri (n=10)

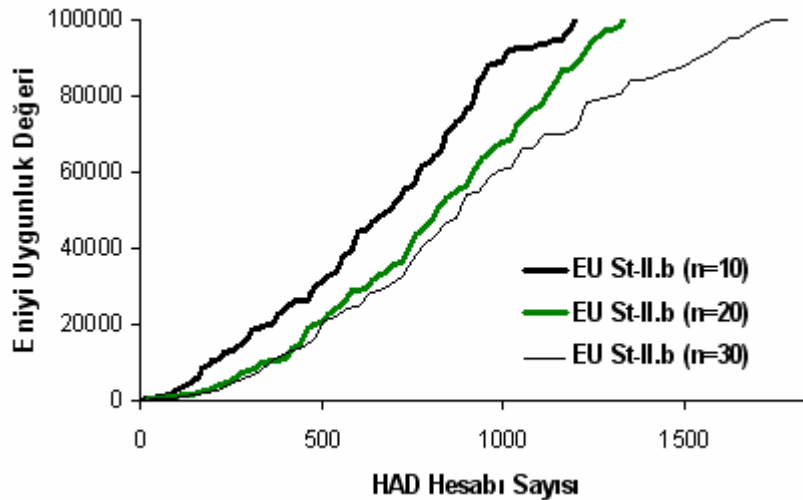
St-II.b'nin değişik popülasyon büyüklükleri ile nasıl sonuç verdiği Şekil 9'da görülmektedir. Buna göre n=10 için yöntemin daha iyi olduğu (n=10 için 1200, n=20 için 1350 ve n=30 için 1800 CFD hesabı) söylenebilir. Bu son iki sonuçtan, titreşimli mutasyonun en iyi performansı n=10 ve $P_m=1/8$ için gösterdiği söylenebilir.

Titreşim uygulamasının popülasyon üzerindeki etkisi, popülasyonun ortalama uygunluk değeri üzerinden görülebilir. Şekil 10'da St-II.b için olan ortalama uygunluk değerleri değişik popülasyon büyüklükleri için; St-I'e ait olan ortalama uygunluk değeri n=30 için gösterilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde, n=30 ve St-I için olan ortalama uygunluk değerinin düzgün bir şekilde değiştiği görülürken, St-II.b'ye ait olanlarda

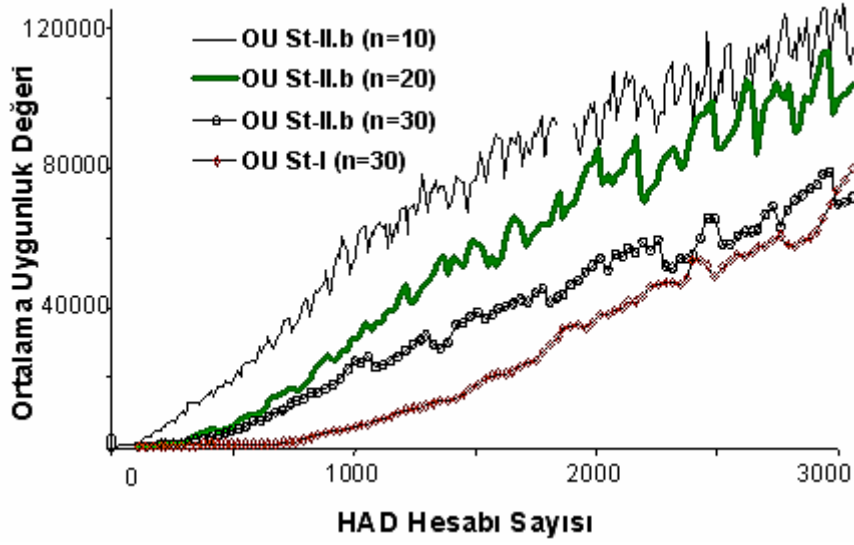
titreşim olduğu ve bu titreşimin popülasyon büyüklüğü azalırken yoğunlaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, daha küçük popülasyon seçildiğinde, mutasyon oranı aynı olmasına karşın, daha fazla titreşim uygulaması yapılacak olmasıdır. Örnek olarak, $P_m=1/10$ ve n=30 için, 3000 CFD hesaplaması yapıldığında toplam 10 titreşim uygulaması yapılırken (10 adımda bir); n=10 için aynı durumda toplam 30 titreşim uygulaması yapılacaktır. Bu durum, n=10 için olan ortalama uygunluk değeri grafiğinde daha yoğun bir titreşim ortaya çıkarmaktadır. Yapılan titreşim uygulamasının performansı üzerindeki etkisi ise Şekil 11'de görülmektedir. St-II.b ve n=10 ile 100,000 uygunluk değerine 1200 CFD hesabı ile ulaşıırken, St-I ve n=10 ile bu değere 2750 CFD hesabı ile ulaşılmıştır. Şekil 9'dan da görülebileceği gibi, St-I ile n=20 ve n=30 için yaklaşık 2500 CFD hesabı ile bu uygunluk değerine ulaşılabilir. Bu sonuçlardan da görülebileceği gibi titreşim uygulaması performansı en az %100 artırmaktadır.

Şekil 12'de ise, n=30 için yukarıda verilen stratejilerle elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, St-II.b, St-I'den çok daha iyi bir performans göstermiştir.

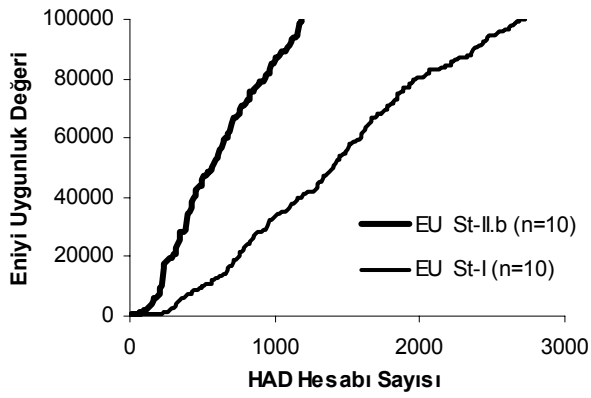
Şekil 13 ve 14'de, yapılan çalışmada elde edilen hesaplanmış kanat profili ve hesaplanmış C_p dağılımı verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi elde edilen çözümlerle hedeflenen çözümler arasında mükemmel bir uyum vardır.



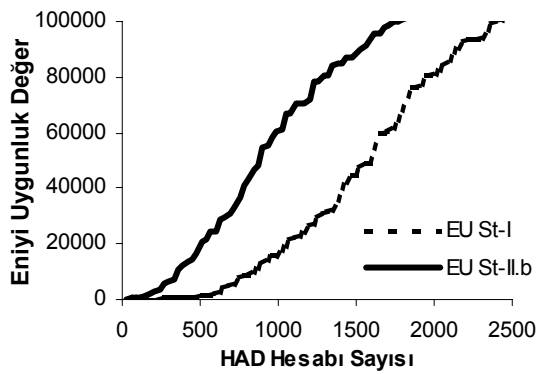
Şekil 9. Farklı popülasyon büyüklükleri ile St-II.b için eniyi uygunluk değeri



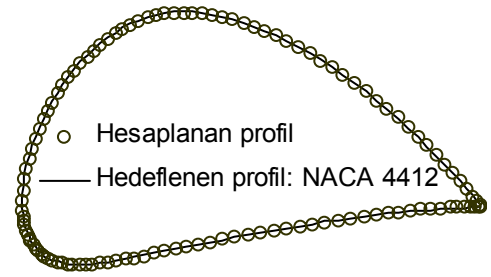
Şekil 10. Farklı strateji uygulamaları için ortalama uygunluk değerleri



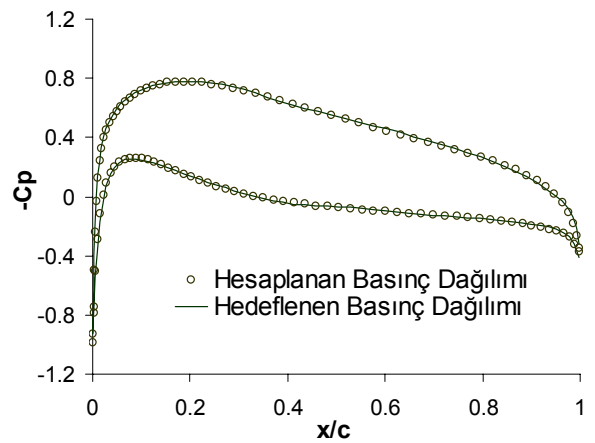
Şekil 11. St-I ve St-II.b için olan eniyi uygunluk (EU) değerlerinin karşılaştırılması (n=10)



Şekil 12. Farklı stratejilerle elde edilen sonuçların karşılaştırılması (n=30)



Şekil 13. Hesaplanan ve hedeflenen kanat profilleri



Şekil 14. Hesaplanan ve hedeflenen basınç katsayısı dağılımları

Analiz ve sonuç

Yukarıda verilen sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki değerlendirmeleri yapmak mümkündür:

- i. Titreşim stratejisi yakınsama performansını arttırmaktadır.
- ii. Mutasyon esaslı titreşim uygulamasında en uygun mutasyon oranı $P_m = 1/8$ olarak bulunmuştur (bakınız Şekil 8).
- iii. Mutasyon esaslı titreşim uygulaması yapılırken popülasyon büyüklüğünün küçülmesi performansı artırmakta ve en iyi performans $n=10$ için alınmaktadır (Şekil 9). Titreşim uygulaması yapılmadığında popülasyon büyüklüğü sonucu önemli derecede etkilememektedir (bakınız Şekil 7).

Yapılan bu değerlendirmelere göre TGA, tersten kanat profili dizaynı için hızlı sonuç veren bir metottur. Bununla birlikte, TGA, Ermiş ve diğerlerinin (2002) yaptığı gibi, başka mühendislik problemlerine de uygulanabilecek bir yöntemdir.

Kaynaklar

- Baker, J. E., (1987). Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm, *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, 14-21.
- Ermiş M., Ülengin, F. ve Hacıoğlu A., (2002). Vibrational Genetic Algorithm (Vga) for Solving Continuous Covering Location Problems, *Lecture Notes in Computer Science*, **2457**, 293-302.
- Eshelman, L. J. ve Schaffer, J. D., (1993). Real Coded Genetic Algorithms and Interval Schemata,

Foundations of Genetic Algorithms 2, Morgan Kaufmann Publishers, 187-202.

Falco, I. D., Cioppa, A. D., Balio, R. D. ve Tarantino, E., (1996). Breeder Genetic Algorithms for Airfoil Design Optimisation, *IEEE International Conference on Evolutionary Computing*, Nagoya.

Falco, I. D., Cioppa, A. D., Lazzetta, A. ve Tarantino, E., (1998). Mijm Mutation Operator for Airfoil Design Optimisation, *Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*, Springer Verlag, 211-220.

Hacıoğlu, A. ve Özkol, İ., (2002). Vibrational Genetic Algorithm as a New Concept in Aerodynamic Design, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **74**, 3.

Kuethel, A. M., ve Chow, C-Y, (1998). *Foundation of Aerodynamics*, John Wiley and Sons, 161-163.

Mühlenbein, H. ve Schlierkamp-Voosen, D., (1993). Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm I. Continuous Parameter Optimization, *Evolutionary Computation*, **1**, 25-49.

Obayashi, S., Takanashi, S. ve Takeguchi, Y., (1999). Niching and Elitist Model for MOGAs, Paralel Problem Solving from Nature-PPSN V, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, 260-269.

Tse, D. C. M. ve Chan, L. Y. Y., (1999). Application of Micro Genetic Algorithms and Neural Networks for Airfoil Design Optimization, RTO-MP-035 RTO-MP-035 Aerodynamic Design and Optimisation of Flight Vehicles in a Concurrent Multi-Disciplinary Environment.

Vicini, A. ve Quagliarella, D., (1999). Airfoil and Wing Design Through Hybrid Optimization Strategies, *AIAA Journal*, **37**, 5.