

KOMPRESÖR BAĞLANTI ELEMANININ OPTİMUM TASARIMI

Ferruh ÖZTÜRK*
Kadir ÇAVDAR**

ÖZET

Bu yayında Bilgisayar Destekli Optimum Tasarım mantığının tasarım adımlarında uygulanmasını içeren bir çalışma verilmiştir. ANSYS paket programı OPT algoritması kullanılarak bir kompresör bağlantı elemanının optimum tasarımı yapılmıştır.

ABSTRACT

Optimum Design of Compressor Holding Device

In this paper, Computer Aided Design Optimization (CADO) of a compressor holding device is outlined. ANSYS optimisation procedure OPT routine is used to determine the optimum design based on the design aspects of stress distribution and natural frequency modal analysis. A case study is presented to show how a parametric study can be utilized for the design optimization.

1. GİRİŞ

Günümüz tasarım mühendislerinin amacı, istenen bir işlevi yerine getiren sistemin en iyi sistem olarak tasarlanmasıdır. Tasarlanan yapının rekabet gücünün yüksek olabilmesi için en az maliyette ve en kısa sürede tamamlanması

* Doç. Dr.; U. Ü., Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Bölümü, Bursa.

** Araş. Gör.; U. Ü., Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Bölümü, Bursa.

gerekmektedir. Tasarımın en iyi olması demek, rekabet gücü yüksek yapıtların *optimum tasarımlarının* oluşturulması demektir. Optimizasyon bu çabalara yardımcı bir araçtır ve dört temel aşamadan oluşan tasarım sürecinin her aşamasında yer alabilir^{1,2}.

Makina elemanlarının tasarımında optimizasyona yönelik çalışmalar, özellikle bilgisayar donanımı ve yazılımında gözlenen değişimlere paralel bir evrim içinde gelişmektedir. Tasarım optimizasyon konularında yapılan çalışmalar mevcut teorileri kullanarak yeni çözüm algoritmaları oluşturulması veya mevcut algoritmaların yeniden düzenlenmesi şeklindedir. Amaç, bilgisayar desteğinden faydalanarak fonksiyonun optimum noktasının mümkün olduğunca az işlem ile bulunmasıdır. I-DEAS, ANSYS gibi birçok CAE (Computer Aided Engineering) yazılımları optimizasyon modülünü içermektedir^{3,4}. CADO optimizasyon algoritmaları, CAD programlarının modelleme tekniklerinden elde edilen tasarımların veri tabanlarını kullanmaktadır. ANSYS, FEM (Finite Element Method) modelleme mantığını ve OPT algoritmasını kullanarak parametrik tasarım optimizasyon işlemine olanak tanımaktadır^{5,6}.

CAE çalışmalarında I-DEAS, ANSYS gibi programları RISC tabanlı iş istasyonları üzerinde kullanılmaktadır, bu tür çalışmaların PC tabanlı donanımlarda kolaylıkla yapıldığını göstermek için kompresör bağlantı elemanının tasarım optimizasyon çalışmaları 386DX PC bir bilgisayar ile yapılmıştır.

2. OPTİMİZASYON PROBLEMİ

Tasarımcı tasarımın matematiksel modelini oluştururken, tasarım parametreleri ile tanımlanan ve amaç fonksiyonuyla ifade edilen bir kriteri gözönüne alır. Bir makina elemanının tasarım problemini matematiksel modelin oluşum yapısına göre iki şekilde ifade edebiliriz: Sınırlayıcı koşul içeren ve içermeyen tasarım problemleri^{7,8}. Pratikte karşılaşılan tasarımların matematiksel modelleri genelde doğrusal değildir ve sınırlayıcı koşullar içerir. X tasarım parametrelerinden oluşan amaç ve sınırlayıcı fonksiyonlardan meydana gelir. Sınırlayıcı içermeyen tasarım probleminin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir:

$$\text{Amaç Fonksiyon : } F(x_1, \dots, x_N)$$
$$x_1, \dots, x_N : \text{Değişkenler}$$

Pratikte karşılaşılan tasarım problemlerinin birçoğu sınırlayıcı koşul içeren modellerdir, aşağıda verilen matematiksel model ile ifade edilirler:

$$\text{Amaç Fonksiyon : } F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_N)$$
$$\text{Sınırlayıcı Koşullar : } G_k(x) = 0 \quad k = 1, \dots, p$$
$$H_l(x) \leq 0 \quad l = 1, \dots, r$$
$$x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N$$

x_1, x_2, \dots, x_N : Tasarım parametreleri.

$x_{i,\min}$ ve $x_{i,\max}$: Tasarım parametrelerinin alt ve üst sınırları.

Yukarıda verilen tasarım modellerinde, amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize eden ve sınırlayıcı koşulları sağlayan bir (x_1, \dots, x_N) tasarım kümesi, problemin optimum çözümdür.

3. OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

Doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinde amaç ve sınırlayıcı fonksiyonların yapısına göre çeşitli teknikler kullanılır^{9,10,11}. Tasarım optimizasyon problemlerinde kullanılan sayısal çözüm yöntemleri, özel amaçlı veya arama (search) yöntemleridir^{7,8,9}. Arama yönteminde, önce bir başlangıç çözüm seti tahmin edilir. Bu başlangıç değeri genelde optimallik koşullarını sağlamadığı için bu değerle iyileştirmeler yapılarak iteratif bir yapı içerisinde koşullar sağlanıncaya kadar işlemler tekrarlanır. Sınırlayıcı koşul içeren ve içermeyen optimizasyon problemlerinin çözüm algoritmaları temelde iteratif mantığı kullanır. Sınırlayıcı koşul içeren algoritmalarda, optimum değer için yön vektörü ve adım değerleri sınırlayıcı koşullara göre değerlendirilir. Bazı kriterler konarak genel bir gruplama yapılabilirse de doğrusal olmayan problemler için uygun tek bir algoritmayı en iyi çözüm alternatifi olarak göstermek oldukça zordur. Problemin yapısına bağlı olarak bir takım yöntemlerin seçimi yapılabilir. Mümkün olduğunca problem doğrusal hale dönüştürülmeli veya ceza parametreleri kullanılarak amaç fonksiyonu ve sınırlayıcı koşullar tek bir fonksiyon olarak ifade edilir. Böylece, sınırlanmamış minimizasyon veya maksimizasyon tekniklerini kullanabiliriz. Bu tekniklerin en çok kullanılanlarından birisi SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique) yöntemidir. ANSYS optimizasyon yönteminde olduğu gibi, birçok sayısal çözüm yönteminde ceza (penalty) fonksiyonu ve SUMT çözüm yöntemi uygulanır.

Optimizasyon yöntemlerinde minimum veya maksimum noktasında sağlanması gereken koşullar optimallik koşulları olarak adlandırılır^{7,8}. Eşitlik sınırlayıcı fonksiyonları içeren problemler Lagrange fonksiyonu oluşturularak çözülür. $H(x)=0$ şeklinde sınırlayıcı koşul fonksiyonları içeren bir $f(x)$ ifadesi Lagrange fonksiyonu olarak aşağıda verilen şekilde yazılır:

$$\phi(x, v) = f(x) + \sum_{j=1}^m v_j h_j(x)$$

v_j ($j=1, \dots, m$) : Lagrange çarpanları.

Fonksiyonun optimum çözüm noktasında Lagrange çarpanları cinsinden ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$\nabla f(x) + \sum_{i=1}^m v_j \nabla h_j(x) = 0$$

Eşitlik ve eşitsizlik şeklinde sınırlayıcı koşul fonksiyonları içeren matematiksel modellerin optimizasyonunda Khun-Tucker (K-T) koşulları kullanılır^{7,8}. Eşitsizlik fonksiyonları da içeren matematiksel modellerde u, v Lagrange çarpanları kullanılarak Lagrange fonksiyonu,

$$\phi(x, u, v) = f(x) + \sum_{i=1}^l u_i g_i(x) + \sum_{j=1}^m v_j h_j(x)$$

şeklinde ifade edilir ve optimum çözüm noktasında aşağıda verilen ifadeler geçerlidir:

$$\nabla f(x) + \sum_{i=1}^l u_i \nabla g_i(x) + \sum_{j=1}^m v_j \nabla h_j(x) = 0$$

$$u_i g_i(x) = 0 \quad \text{ve} \quad u_i \geq 0$$

ANSYS optimizasyon yöntemi, ceza parametrelerinden oluşan ceza fonksiyonunu kullanır³. Bazı koşullara bağlı olarak tanımlanan ceza parametreleri optimum nokta elde edilinceye kadar tekrarlanan bir süreç içinde ayarlanır. Bu mantığı kullanan çözüm yöntemi SUMT olarak adlandırılır^{9,10,11}. SUMT tekniği, sınırlayıcıların çözüm alanındaki etkisini ceza fonksiyonları ile tanımlar. Eşitlik ve eşitsizlik şeklinde sınırlayıcı koşullar içeren matematiksel modelimizi aşağıda verilen dönüşüm fonksiyonu ile tanımlayabiliriz:

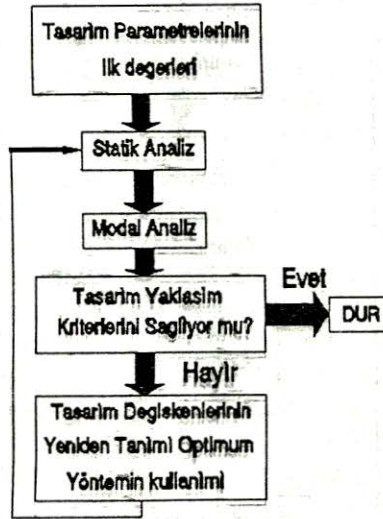
$$\phi(x, r) = f(x) + P(h(x), g(x), r)$$

r: ceza parametrelerini kontrol eden vektör

P ceza fonksiyonunun yapısı kullanılan prosedüre bağlıdır. Önce bir $x^{(0)}$ başlangıç değeri seçilir ve fonksiyon tanımlanır. Ayrıca, r parametrelerinin başlangıç değerleri seçilir ve fonksiyonun optimumu bulununcaya kadar r parametresinin yeni değerleriyle işlemler tekrarlanır. Bu tekniğin kullandığı mantıkta çözüm süreci bir başlangıç çözümü ile başlar ve arama süreci ile sürdürülür. Sonuçta ulaşılan x çözüm vektörü problemin optimum çözümüdür.

4. ANSYS TASARIM OPTİMİZASYON ALGORİTMASI

CADO mantığını kullanarak kompresör bağlantı elemanının tasarımıyla ilgili tasarım optimizasyon adımları şekil 1'de verilmiştir.



Şekil: 1. Kompresör bağlantı elemanı optimum tasarım adımları

ANSYS programında optimizasyon algoritması FEM yöntemi içinde yer almaktadır. FEM modelleme tekniği ile model tanımlanır ve OPT algoritması ile optimize edilir. ANSYS optimizasyon algoritması işlem adımları şekil 2'de gösterilmiştir.

ANSYS optimizasyon yönteminde kullanılan SUMT tekniğinde, amaç fonksiyona eklenen ceza fonksiyonu terimleri çözümün kabul edilebilir (feasible) alanda kalmasını sağlar.

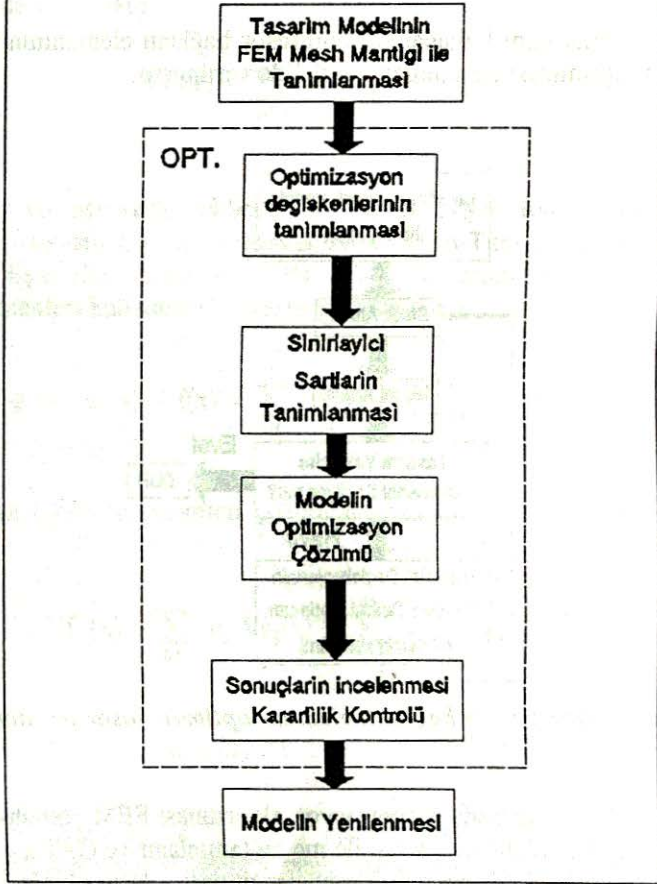
ANSYS optimizasyon algoritmasında n tasarım değişkeni ve m şart içeren problemde amaç ve sınırlayıcı koşullar içeren bir tasarım probleminin modelleme notasyonları aşağıda verilen şekilde tanımlanır³:

$$OBJ = OBJ(DV_1, DV_2, \dots, DV_n)$$

$$SV_j = SV_j(DV_1, DV_2, \dots, DV_n) \quad j=1, \dots, m$$

OBJ: amaç fonksiyon, DV_1, \dots, DV_n : tasarım parametreleri, SV_j : durum parametreleri.

CAD Modelleme ve Analiz (FEM ve FEA)



Şekil: 2. ANSYS optimizasyon işlem adımları

Bu notasyonları kullanarak problemin ANSYS programında tanımlanması aşağıda verilen şekildedir:

Amaç Fonksiyon : OBJ_{min}

Sınırlayıcı Koşullar : $DV_{i,alt} \leq DV_i \leq DV_{i,üst} \quad (i = 1, \dots, n)$

$SV_{j,alt} \leq SV_j \leq SV_{j,üst} \quad (j = 1, \dots, m)$

$DV_{i,alt}, SV_{j,alt}$: Alt Limit Değerleri.

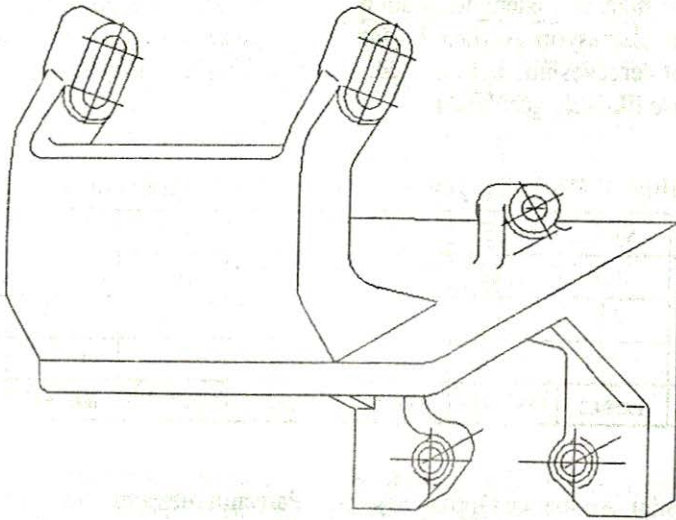
$DV_{j,üst}, SV_{j,üst}$: Üst limit değerleri.

Şekil 2'de verilen ANSYS çözüm yönteminde tasarım optimizasyon işlemi, yakınsama durumunda veya iterasyon sınırlamasına ulaşıncaya sona erer. Yakınsama olmadan döngü iterasyonunun durdurulması, seçilen maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığı zaman mümkün olmaktadır³.

5. ÖRNEK BİR TASARIM - OPTİMİZASYON UYGULAMASI

Parametrik olarak tasarımı ve optimizasyonu yapılan parça; bir kompresörün motor bloğuna bağlanması işlevini gerçekleştirecektir. Parçanın tasarımı yapılırken sınırlayıcı şartlar (constraints) olarak; çalışma alanının konumu ve bağlantı civatalarının boy ve konum olarak aynı kalması istenmiştir.

Parçanın ön tasarımının üç boyutlu olarak görünüşü şekil 3'te verilmiştir. Parça alüminyum döküm olarak imal edilecek ve mümkün olduğunca az talaş kaldırma işlemi yapılacaktır. Parçanın minimum titreşime izin verecek şekilde malzemenin emniyet gerilmesi de gözönüne alınarak çalışma şartlarına uyum sağlaması istenmektedir. Tasarım için istenen bu sınır şartları gözönüne alındığında önümüze iki seçenek çıkar: İlk seçenekte, çözüme bir prototip imal edip bunu çeşitli deneylere tabi tutarak ulaşılabilebilir. Ancak bu, uzun süren ve maliyeti arttıran bir çözüm olduğu için uygulanması zor bir çözümdür. Bu alternatifin yerine daha çabuk sonuca ulaşmayı sağlayan, Bilgisayar Yardımıyla Tasarım (CAD-Computer Aided Design) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde ilk önce bir çizim (drafting) programı kullanılarak parçanın ön tasarımı yapılır ve karar verilen şekil analizinin yapılmasına imkan verecek şekilde modellenir.



Şekil: 3. Ön tasarımın CAD çizimi

6. ANALİZ İŞLEMİ

Parça üzerinde yapılan ön analizde parçadaki maksimum yer değiştirme ve gerilmelerin civatalar ile bağlantının yapıldığı üst kısımlarda (kulak) olduğu görülmüştür. Bu nedenle; "sadece bu bölgenin analizinin yapılması yeterli olacaktır" varsayımı sonuçları pek fazla etkilemeyecek ancak büyük oranda zaman kazandıracaktır.

Parçaya iki değişik analiz uygulanmıştır:

- Statik analiz ve Optimizasyonu.

- Modal analiz ve Optimizasyonu.

Statik Analiz ve Optimizasyonu: Statik analiz ve optimizasyon işleminde aşağıdaki parametreler kullanılmıştır:

Tasarım Parametreleri : T: Kalınlık, min: 10 mm, max: 12 mm, tol:0.1 mm.

R: Yarıçap, min: 10 mm, max: 22 mm, tol:0.1 mm.

Durum Parametreleri : STRS: Max Normal Gerilme.
min: 40 N/mm², max: 80 N/mm², tol: 0.5 N/mm².

Amaç Fonksiyon : TVOL: Toplam alan, tol: 250 mm².

Optimizasyon işlemindeki adımlar ve parametrelerin değişimi Tablo 1'de verilmiştir. İterasyon, verilen başlangıç değerlerden başlamış ve verilen toleranslar çerçevesinde optimum çözüme ulaşılmıştır. Parametrelerin grafiksel değişimi ise Ek-A'da görülebilir.

Tablo: I. Optimizasyon Adımları ve Parametrelerin Değişimi

Parametre	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7
T	10.0	11.69	10.77	11.07	11.73	11.77	11.93
R	10.0	15.48	18.31	17.42	15.51	15.65	15.55
STRS	147.39	81.38	74.71	76.42	81.00	80.02	79.41
TVOL	19284.2	58510.5	76517.4	70868.6	58898.7	60208.0	60252.9

Modal Analiz ve Optimizasyonu : Parçanın titreşim modlarının tespiti için yapılan analiz işlemi MODAL ANALİZ olarak adlandırılır. Parçaya ikinci analiz aşaması olarak, modal analiz şartlarında optimizasyon işlemi için bir

analiz uygulanmıştır. Bu işleme ilk modda meydana gelen yer değiştirmenin yüksek olması nedeni ile ihtiyaç duyulmuştur. Modal analizde şu parametreler kullanılmıştır:

- Tasarım Parametreleri :** T: Kalınlık, min: 10 mm, max: 25 mm, tol: 0.1 mm.
R: Yarıçap, min: 10 mm, max: 22 mm, tol: 0.1 mm.
- Durum Parametreleri :** FREO : 1. moddaki titreşim frekansı.
min: 25 Hz, max: 75 Hz, tol: 1 Hz.
- Amaç Fonksiyon :** DEFL : 1. fioddaki max yerdeğiştirme.
tol: 0.1 mm.

Analiz sonucundaki optimizasyon adımları ve parametrelerin değişimi Tablo 2' de verilmiştir. Parametrelerin grafiksel olarak değişimleri Ek-A' da görülebilir.

Tablo: 2. Optimizasyon Adımları ve Parametrelerin Değişimi

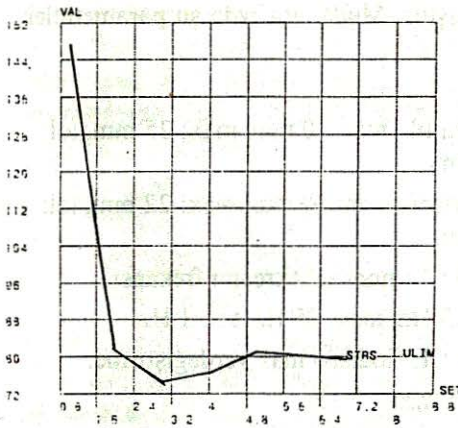
Parametre	SET 1	SET 2	SET 3	SET 4	SET 5	SET 6	SET 7	SET 8
R	10.00	22.70	15.82	18.06	20.71	11.75	10.68	13.44
T	10.00	16.86	20.39	19.27	19.95	11.39	11.74	18.15
FREQ	29.13	8.15	21.06	14.99	11.70	22.75	29.14	26.82
DEFL	11.87	3.39	4.64	4.07	3.47	8.92	9.94	5.96

Parametre	SET 9	SET 10	SET 11	SET 12	SET 13
R	14.78	16.36	15.08	15.83	15.98
T	22.83	24.33	23.55	24.61	24.87
FREQ	28.65	23.47	27.05	25.45	25.21
DEFL	4.84	4.11	4.51	4.24	4.18

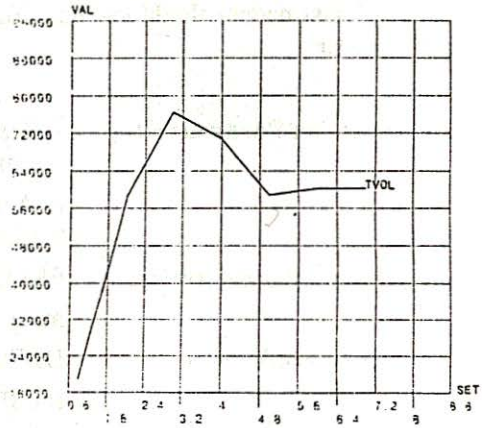
7. ANALİZ SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Yapılan optimizasyon işlemi sonucunda, verilen sınır şartlarında tasarım değişkenleri olarak belirlenen yarıçap (R) ve kalınlık (T) değişkenlerinin optimum değerleri şekil 4'te verildiği gibi bulunmuştur.

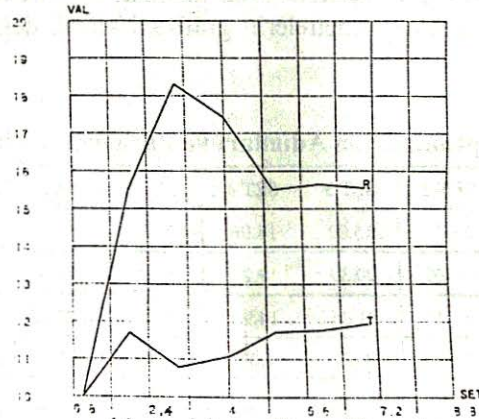
EK: A. Statik Analiz ve Modal Analiz Sonuçlarının Grafiksel İfadeleri



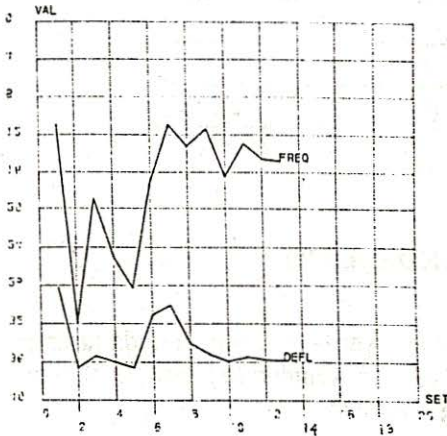
(a)



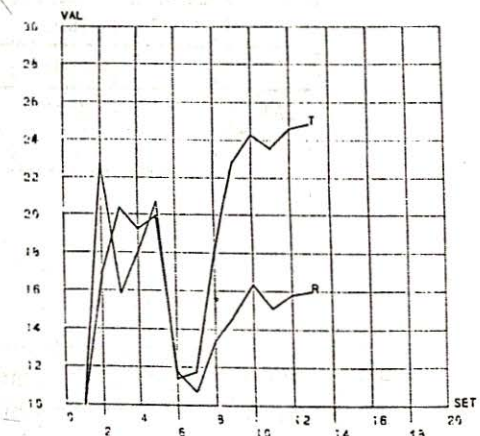
(b)



(c)

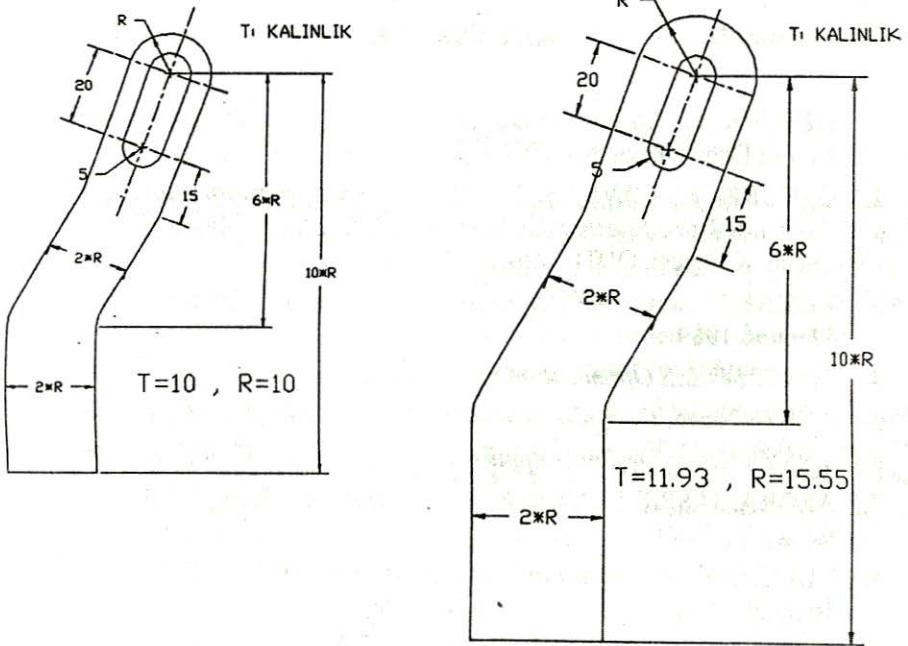


(b)



(e)

Analize başlarken amacımız minimum malzeme kullanarak (min alan) oluşan gerilmelerin düşürülmesi ve 1. modda oluşan yer değiştirmenin minimuma indirgenmesiydi. Buna göre statik analiz sonuçlarına baktığımızda; max normal gerilme değerinin (STRS) 147.39 N/mm^2 değerinden 79.41 N/mm^2 değerine düşürüldüğünü (Ek A-a) ama aynı zamanda kesit alanının 19284.2 mm^2 değerinin üzerine çıkararak 60252.9 mm^2 değerine ulaştığını görmekteyiz (Ek A-b). Bu analiz sonucunda elde edilen kalınlık değeri $T=11.93 \text{ mm}$ ve yarıçap değeri ise $R=15.55 \text{ mm}$ olmuştur (Ek A-c). Ancak çalışma ortamını gözönüne aldığımızda gerçekte dikkate almamız gereken değerlerin modal analiz sonucu elde edilecek olan değerler olacağı açıktır. Bu nedenle modal analiz sonucu elde edilen R ve T değerleri ile prototip imali yapılacaktır.



Şekil: 4. Optimum tasarım sonuçları

Modal analiz sonuçlarına baktığımızda (Ek A-d ve e), 1. titreşim modunda 11.87 mm olan yer değiştirmenin 13 adım sonrasında 4.18 mm 'ye düştüğünü görmekteyiz. Buna bağlı olarak 1. mod frekansında yaklaşık 4 Hz 'lik bir düşme olmuştur. Optimizasyon sonucu elde edilen kalınlık değeri $T = 24.87 \text{ mm}$ ve yarıçap değeri ise $R = 15.98 \text{ mm}$ olmuştur (Ek A-e). Tasarım değişkenlerinin 13 iterasyon süresince aldığı diğer değerler şekillerden görülebilir.

Bu sonuçlara göre imalatta çevre ve konum şartları da gözönüne alınarak, işleme kolaylığı açısından kalınlık değerinin $T = 25 \text{ mm}$ ve yarıçap değerinin ise

R = 16 mm olarak alınması uygun olacaktır. Bu boyutların imalat tolerans değerleri için ise 0.1 mm önerilebilir.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Bilgisayar Destekli Optimizasyon mantığının tasarım aşamalarına nasıl entegre edildiği örnek bir tasarım çalışması ile gösterilmiştir. Bilgisayar yazılım ve donanım desteği sayesinde kompresör tasarım modelinin istenen özellikler doğrultusunda kolaylıkla optimize edildiği gözlenmiştir. Prototip imalatı gereksinimini ortadan kaldıran, CADO sürecinin CIM'a entegre olabilecek veri tabanını oluşturabilmesi de diğer önemli bir noktadır.

KAYNAKLAR

1. ÖZTÜRK, F.: "*Bilgisayar Destekli Tasarım*", Uludağ Üniversitesi Ders Notları Dizisi, Yayın No: 1990/6, 1990.
2. ÖZTÜRK, F., ÇAVDAR, K.: "*İş Bağlama Aparatlarının Sistematik Tasarımı İçin Algoritma Geliştirilmesi*", 5. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1992.
3. KOHNKE, P.C.: *ANSYS-Engineering Analysis System Theoretical Manual*, 1989.
4. SDRC: *I-DEAS Optimization*, Product Bulletin, 1990.
5. ANSYS News: *Design Optimisation Series*, Part 2, First issue, 1988.
6. ANSYS News: *Design Optimisation Series*, Part 1, First issue, 1987.
7. ARORA, JASPIR S.: "*Introduction to Optimum Design*", Mc Graw Hill Book Co., 1989.
8. TULUNAY, Y.: *Matematik Programlama*, İşl. Fak. Yayın No. 244, İstanbul, 1991.
9. MANGASRIAN, O.L.: "*Techniques of Optimisation*", Journal of Eng. for Industry, May 1972, pp.365-371.
10. KIMBLER, D.L., WYSK, R.A. and DAVIS, R. P.: "*Alternative Approaches to the Machining Parameter Optimisation Problem*", Comput. & Indus. Eng. Vol.2, pp.195-202, 1978.
11. IWATA, K., MUROTSU, Y., IWATSUBO, T., FUJII, S.: "*A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions*", Journal of Engineering for Industry, Nov. 1972, pp. 1099-1107.