

# ÇIKIK KUTUPLU SENKRON HİDROGENERATÖRLERİN DİNAMİK VE GEÇİCİ ZAMAN ANALİZ KOŞULLARINDA ARDIŞIK KARMA DEĞİŞKEN NONLİNEER PROGRAMLAMA METODU KULLANILARAK OPTİMİZASYONU

İsmail TOPALOĞLU ve Osman GÜRDAL\*

Çankırı Meslek Yüksekokulu, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Taşmescit Mevki, Çankırı, 18100

\*Elektrik Eğitim Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 06500

[itopaloglu@karatekin.edu.tr](mailto:itopaloglu@karatekin.edu.tr), [ogurdal@gazi.edu.tr](mailto:ogurdal@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 11.05.2009 ; Kabul/Accepted: 12.01.2010)

## ÖZET

Enerji üretiminde kullanılan generatörlerin tasarımı oldukça karmaşık ve deneyim gerektiren bir süreçtir. Çıkık kutuplu senkron hidrogeneratörlerin tasarımları bir barajdan diğerine farklılık gösterebilir. Otomatik optimizasyon işlemi çok istenen bir süreçtir, çünkü tasarımcılar aynı makine tipinde çok az tecrübeye sahiptirler. Sunulan bu çalışma da amaç fonksiyonuna en büyük etki sağlayan değişkenler ana tasarım değişkenleri olarak kabul edilmiştir. Optimizasyon tasarım modeli üç boyutlu olarak geçici zaman ve dinamik analiz koşullarında birbirine bağlı karma nonlineer değişkenlerden oluşturulmuştur. Optimizasyon süreci boyunca nonlineer karma değişkenler ardışık olarak amaç fonksiyonunu lineerleştirmeye çalışmaktadır. Bu yöntem çok etkilidir, çünkü amaç fonksiyonu tamamıyla birbirine bağlı değişkenlerden oluşmaktadır. Bu yüzden optimum değerler sürekli belirlenen sınır aralığı içinde bulunmaktadır. Bu süreç birçok tasarım çalışmasında denenmiş ve kullanılan SMINLP optimizasyon tekniği amaç fonksiyonunu QS, PS ve SNLP'e göre % 3-%15 aralığında daha idealleştirmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çıkık kutup, hidrogeneratör, optimizasyon, nonlineer programlama, SMINLP.

## OPTIMIZATION OF SALIENT POLE SYNCHRONOUS HYDRO GENERATORS USING SEQUENTIAL MIXED INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING METHOD AT TRANSIENT AND DYNAMIC ANALYSIS CONDITIONS

### ABSTRACT

The designs of salient pole generators may differ considerably from one hydroelectric plant to another and it is complex and need to experiment to design of hydro-generator Automatic optimization procedure is highly desirable, because the designer may have little experience with a similar machine. The presented study; design space have been constituted nonlinear mixed variables which have the largest influence on the goal function at transient and dynamic analysis conditions. The optimization process is based on successive linearization of the goal function and the nonlinear mixed variables followed by a sequential procedure. The process is highly effective because the goal function is consist of nonlinear mixed variable, for this reason the optimum value is always on the boundary of the feasibility region. The procedure has been tested on a number of earlier designs. The goal function results could have been improved by using SMINLP and results are idealized better than QS, PS and SNLP between about % 3-%15 percent.

**Keywords:** Salient pole, hydrogenerator, optimization, nonlinear programming, SMINLP.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tarihsel olarak hidroelektrik generatör tasarımında 1930'lu yıllarda kullanılan malzemelerin kalitesizliği

ve yeterince gelişmemiş olan sayısal teknikler ve deneyim eksikliği az verimli büyük boyut değerlerine sahip generatör tasarımları ortaya çıkarmıştır. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise kaliteli malzeme kullanımı ve

geliştirilen sayısal teknikler sayesinde 1930'lara göre daha iyi tasarımlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise daha az hacime daha büyük güç ilkesiyle ve geliştirilen sayısal optimizasyon teknikleri sayesinde ilk tasarımlarına göre gelişen malzeme teknolojisini de dikkate alırsak çok büyük gelişmeler kat edilmiştir. Hidrogeneratörlerin tasarım sürecinde, hemen hemen tüm tasarım sürecinde kullanılacak parametreler elektromanyetik tasarımdan elde edilen sonuçlara göre şekillenmektedir[1-4]. 1990'larda H. Hoole ve diğerleri yaptıkları araştırmada geometrik parametre ve değişken optimizasyon tekniği ile çıkık kutuplu senkron generatörün optimizasyonu üzerine çalışmışlar ve yapısal haritalama yöntemi ve ilgili eşitlikleri çalışmalarında sunmuşlardır[5]. N. FUJII boyut optimizasyon problemlerinin sınıflandırılmasında kullanılacak ikinci dereceden hassasiyet analizi içeren bir optimizasyon metodunu yaptığı çalışmada sunmuştur. Bu metotta amaç fonksiyonu olarak sınır değerlerin integral biçimi kullanılmıştır. Senkron generatör kutup yayı optimizasyonu üzerine çalışmışlardır [6]. San Baeck Yoon ve diğerleri 2000'li yıllarda elektromekanik aygıtların boyut optimizasyonunda kullanılacak robust boyut optimizasyon tekniğini sunmuşlardır. Bu teknikte çok amaçlı amaç fonksiyonu ardışık karesel programlama optimizasyon tekniği ile senkron generatör kutup optimizasyon problemini çözmek için uygulanmıştır[7]. Bu çalışmada dinamik ve geçici zaman koşullarında ardışık karma değişken nonlineer programlama metodu kullanılarak hidrogeneratörün optimizasyonu verim, aktif materyal kullanımı,  $\cos\phi$ , kısa devre oranı, uyarım gerilimi, mil torku, ve stator boyunduruk akı yoğunluğu, amaç fonksiyonları optimize edilmiştir. Hidrogeneratörlerin analizleri sonlu elemanlar metodu kullanılan Ansoft Maxwell 3D programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım modelinde simetriden yararlanılarak modelin  $\frac{1}{4}$ 'ü kullanılmıştır. Şekil 1'de simetriden yararlanılarak oluşturulan sınır koşulları gösterilmiştir. Şekil 1-a'da master sınır koşulu, şekil 1-b'de slave sınır koşulu

tanımlanmıştır. Bu durum kaçınılmaz bir şekilde hidrogeneratör rotor hareket yönüne bağlı olarak sınır koşullarını tanımlamayı zorunlu kılar.

Tasarım modelinin sınır koşulları tanımlandıktan sonra analitik hesaplamalar ile elde edilen hidrogeneratöre ait mekanik bilgilerin;

- Giriş mil torku (Bu çalışmada: 6011Nm).
- Rotor hızı (Bu çalışmada: 1000Rpm).
- Başlangıç eylemsizlik momenti (Bu çalışmada: 28 Kg/m<sup>2</sup>).

modelin çözüm sürecine eklenmesi gerekmektedir. Tasarım modelinde hareketli kısımlar;

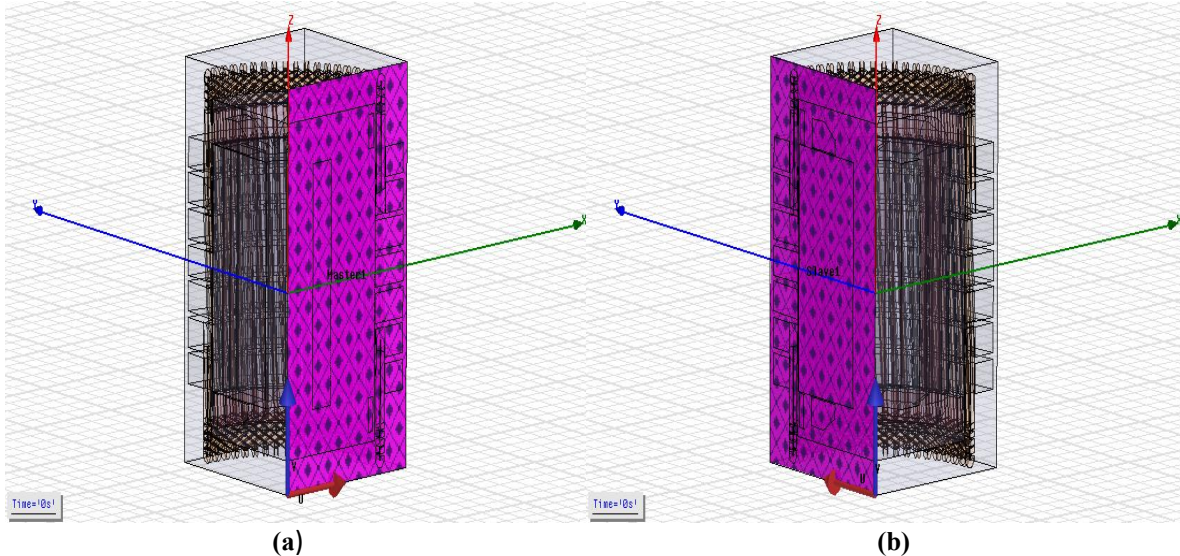
- Sönüm çubukları ve halkası.
- Rotor nüvesi.
- Uyarım sargıları ve hava aralığı.

olarak tanımlanır.

Tasarım modeline ait hareketli kısımlar tanımlandıktan sonra tasarım değişkenlerinden olan uyarım gerilimi ve çözüm zaman aralığı değerlerinin tanımlanması gerekir. Ansoft Maxwell programında bu tip değişkenlerin tanımlanması için veri tanımlama yapılması gerekmektedir. Uyarım sargısı parametreleri;

- Uyarım sargısı direnci (Bu çalışmada: 217,962 ohm)
- Uyarım sargısı indüktansı (Bu çalışmada: 0,023478H)
- Uyarım sargısı gerilimi (Bu çalışmada: 82V, hazırlanan veri tanımlaması; dataset=ds1[(0sn,0V) (0,0002sn,82V) (1sn,82V)] gerilim tanımlamada kullanılır, örneğin: 1\*pwlx[dataset, time] şeklinde)

modele eklenmelidir.



**Şekil 1.** Hidrogeneratör sınır koşulları (a) Master sınır koşulu (b) Slave sınır koşulu (Boundary conditions of hydrogenerator (a) Master boundary (b) Slave boundary)

## 2. ARDIŞIK KARMA DEĞİŞKEN NONLİNEER PROGRAMLAMA METODU (Sequential Mixed Integer Nonlinear Programming Method)

AKDNPM optimizasyon tekniği tasarım modelinde kullanılan değişkenleri sürekli uzayda ve birbirine bağlı olarak tanımlamaya izin vermektedir. Bu teknikte kullanılan lineer değişkenler Denklem 1'deki gibi tanımlanabilir.

$$\sum_i \alpha_{ij} x_i < c_j \quad \forall j \quad (1)$$

$\alpha_{ij}$  ; katsayıları ifade eder.

$c_j$  ;  $j^{\text{th}}$  'ci lineer değişken için karşılaştırma değeridir.

$x_i$  ;  $i$  'nci tasarım parametresidir.

Amaç fonksiyonu  $f(y(x_k))$  aşağıdaki kısıtları karşılayacak şekilde değişken kullanılarak minimize edilir [8].

Min.  $f(y(x_k))$  veya Maks.  $f(y(x_k))$

$$h_i(y(x_k))=0, \quad i=1,2,3,\dots,m, \quad (2)$$

$$g_j(y(x_k))\leq 0, \quad j=1,2,3,\dots,j,$$

$$x_k^{\text{alt}} \geq x_k \geq x_k^{\text{üst}} \quad k=1,2,3,\dots,n, \quad (3)$$

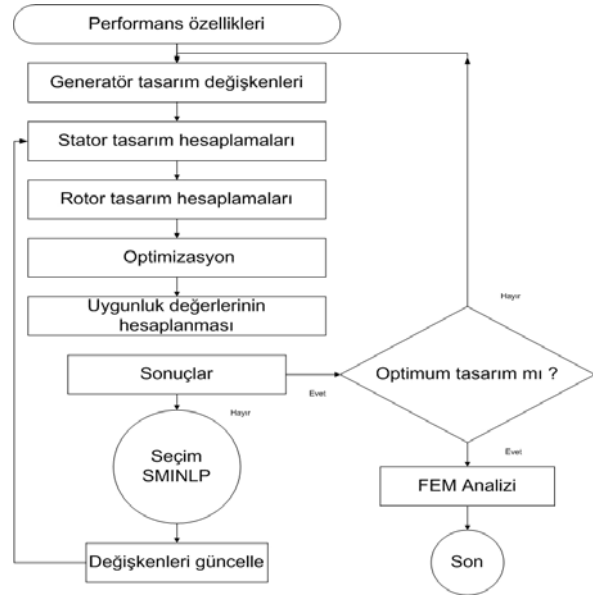
Bura da;  $f(y(x_k))=\{f_1(y_1(x_k)),f_2(y_2(x_k)),\dots,f_n(y_n(x_k))\}$  amaç fonksiyonu vektörü, sırasıyla  $g_j$  ve  $h_i$  eşitsizlik ve eşitlik kısıt fonksiyonları  $x_k^{\text{alt}}$  ve  $x_k^{\text{üst}}$  sırasıyla parametre alt ve üst sınırlarıdır. "y"  $x_k$  değişkenine bağlı ikinci değişkendir. Ardışık karma değişken non-linear programlama tekniği ile hazırlanmış ve generatör çıkış karakteristik değerlerini veren algoritma Şekil 2'de sunulmuştur. Bu algoritmada genetik algoritmaya benzer olarak çaprazlama mutasyon işlevini SMINLP almaktadır.

Değişkenlerin çözüm aralıklarını ve odak noktalarını gösteren şekil aşağıda Şekil 3'te gösterilmiştir.

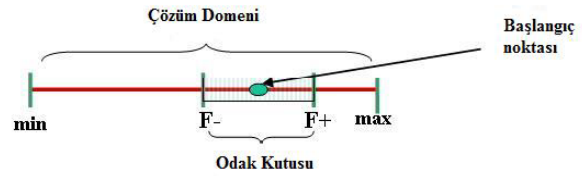
## 3. HİDROGENERATÖR AĞIRLIK VE MALİYET FONKSİYONU (Cost And Weight Function of Hydrogenerator)

Hidrogeneratör ana boyutları belirlendikten sonra kullanılan aktif malzemenin ağırlığı hesaplanabilir. Kullanılan bakır ağırlığı  $G_{cu}$  aktif bakır alanı  $k_{fill} A_{ss}$ , faz sargılarının uzunluğu ve bakır yoğunluğunun çarpımıyla elde edilebilir [4].

$$G_{cu} = \rho_{cu} (l_a + l_b + l_c) h_{ss} b_{ss} k_{fill} \quad (4)$$



Şekil 2. Hidrogeneratör ardışık karma nonlineer programlama metodu optimizasyon çözüm algoritması (Hydrogenerator sequential mixed integer nonlinear programming method flowchart)



Şekil 3. Ardışık karma değişken optimizasyon çözüm aralığı (Solution area of sequential mixed integer nonlinear programming optimization method)

Sargı izolasyon ağırlığı hesabında bakır için kullanılan alandan geriye kalan alanın izolasyon ile dolu olduğu düşünülerek hesaplama yapılır.

$$G_{ins} = \rho_{ins} (l_a + l_b + l_c) h_{ss} b_{ss} (1 - k_{fill}) \quad (5)$$

Stator boyunduruğunun ağırlığı  $G_{ys}$

$$G_{ys} = \rho_{fe} \frac{p}{2} \sum_{k=1}^{N_{seg}} \frac{1}{2} \frac{\pi - \xi}{N_{seg}} [R_{ys,out}^2 - R_{ys,in}^2] l_{st,r}(k) \quad (6)$$

Rotor boyunduruğunun ağırlığı  $G_{yr}$

$$G_{yr} = \rho_{fe} \left\{ 2\pi R_m (\pi - \xi) [R_s^2 (R_s - h_{yr})^2] + \frac{4\pi \sin \xi}{3} [R_s^3 (R_s - h_{yr})^3] \right\} \quad (7)$$

İç ve dış stator boyunduruğuk çapları:

$$R_{yr,out} = (R_s + g + h_m + h_{ss} + h_{ys}) \quad (8)$$

$$R_{yr,in} = (R_s + g + h_m + h_{ss})$$

Stator oluk dış kalınlıkları:

$$\begin{aligned}\tau_{ss2} &= \alpha_{p,s} (R_s + g + h_m + h_{ss}) \\ b_{ts2} &= \tau_{ss2} - b_{ss}\end{aligned}\quad (9)$$

Stator oluk dışlarının toplam ağırlığı:

$$G_{ts} = \rho_{fe} \frac{p}{2} \sum_{k=1}^{N_{seg}} \frac{1}{2} (b_{ts1} + b_{ts2}) h_{ss} l_{st,r}(k) \quad (10)$$

Hidrogeneratörde kullanılan toplam demir ağırlığı artık hesaplanabilir.

$$G_{fe} = G_{yr} + G_{ys} + G_{ts} \quad (11)$$

Hidrogeneratörde kullanılan aktif malzemenin ağırlığı artık aşağıdaki şekilde hesaplanabilir. Optimize edilecek hidrogeneratör ağırlık fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G_{total} = G_{cu} + G_{fe} + G_{ins} \quad (12)$$

Hidrogeneratör maliyet fonksiyonunda aşağıdaki gibi olacaktır.  $C_{cu}$  bakır kg fiyatı,  $C_{fe}$  laminasyon kg fiyatı ve  $C_{ins}$  izolasyon kg fiyatıdır.

$$C_{total} = G_{cu} \cdot C_{cu} + G_{fe} \cdot C_{fe} + G_{ins} \cdot C_{ins} \quad (13)$$

#### a) Hidrogeneratörlerde Verim Fonksiyonu (Efficiency Function in Hydrogenerators)

Hidrogeneratörlerde verim çıkış elektrik gücünün giriş mekanik gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Giriş mekanik gücünü optimize ederek verim artırılabilir.

$$\eta_{HG} = \frac{(P_2)_{electric}}{(P_1)_{mechanical}} = \frac{(P_2)_{electric}}{(P_2)_{electric} + \sum losses} \quad (14)$$

Gerilim ve hız sabitken mekanik kayıp, nüve kaybı, uyarıcı kaybı ve ek kayıplar da eklenecek olursa verim formülü:

$$\eta_{HG} = \frac{K_{sal} S_n \cos \phi}{K_{sal} S_n \cos \phi + p_{ro} + p_{mc} + p_{sal} K_{sal}^2 + p_{exh} \left( \frac{I_f}{I_n} \right)^2 + p_{msh} \left( \frac{I_f}{I_n} \right) + p_{smv}} \quad (15)$$

#### 4. HİDROGENERATÖR OPTİMİZASYONU (OPTIMIZATION OF HYDRO GENERATOR)

Optimizasyonda bağımlı değişken olarak kullanılan kısa devre oranı (SCR)

$$SCR = \frac{1}{x_{d(sat)}} \quad (16)$$

kısa devre oranı doymuş d- eksen reaktansının P.U (per unit) cinsinden tersine eşittir. SCR hidroelektrik generatörlerde verimi de direk olarak etkilemektedir. SCR değerinin 0.4'ten 0.5 değerine çıkması verimi yaklaşık olarak 0.02 ile 0.04 arasında azaltmaktadır, aynı zamanda makine hacmini de %5 ile %10 arasında arttırmaktadır. Buna ek olarak statik kararlılık ve reaktif güç kapasitesinde direk etkilidir. Büyük bir SCR değeri kaçınılmaz bir şekilde küçük bir  $x_{d(sat)}$  ile mümkündür. Bu da geniş bir hava aralığına işaret eder. Generatörde alan sargılarıyla aynı görünür gücü elde etmek için daha çok amper-sarım manasına gelmektedir [1-4].

Denklem (16) optimizasyon probleminde kullanıldığında;

$$f(SCR(\frac{1}{x_d})) = \left\{ \begin{aligned} &f_1(SCR_1(\frac{1}{x_{d(1)}})), f_2(SCR_2(\frac{1}{x_{d(2)}})), \\ &\dots, f_n(SCR_n(\frac{1}{x_{d(n)}})) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

elde edilir.

Denklem 17 aynı zaman da SMINLP tekniğindeki birbirine bağımlı nonlineer değişkenlerin tanımlanmasına iyi bir örnektir.

Bu çalışma da;

- 1) Kısa devre oranı (SCR), kutup yay merkezi uzaklıkları kullanılarak güç faktörü optimize edilmiştir.
- 2) Kısa devre oranı (SCR), rotor kutup gövde yükseklik, gövde genişlik, kutup ayak genişliği, ayak yüksekliği değişken alınarak hidrogeneratör net ağırlığı, rotor kutup ağırlığı ve alan sargısı optimize edilmiştir.
- 3) İç çap, rotor kutup gövde yükseklik, gövde genişlik, kutup ayak genişliği, ayak yüksekliği değişken alınarak net ağırlık, verim ve alan sargısı ağırlığı optimize edilmiştir.

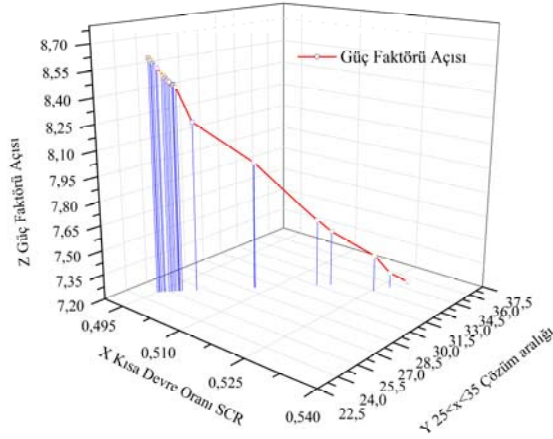
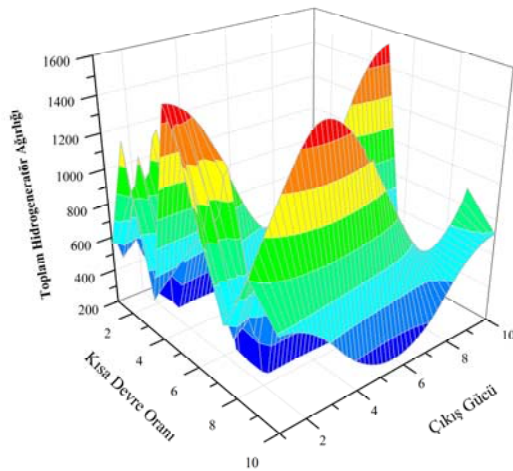
SMINLP kullanılarak ilk tasarıma göre iyileştirilen parametreler ve ilk tasarım değerleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlardan görülmektedir ki Şekil 4'te  $0,49 < SCR < 0,50$  değeri arasında en ideal güç faktörü açısı elde edilmiştir. Bu grafikte 23 ayrı çözüm yapılmış ve iki değişken 22532 değişik değerde sonuç almıştır. Problemin çözümü bilgisayar saatiyle 54 saat 32 dakika zaman almıştır. Daha iyi sonuçlar elde etmek ve hassasiyet analizini geliştirebilmek için gelişmiş bilgisayar sistemlerinden yararlanmak gerekmektedir.

Şekil 5'de hidrogeneratör toplam ağırlığının minimize edilmesi sonucunda stator ve rotor bakır kayıplarında

**Tablo 1.** Optimizasyon sonuçları tablosu (Table of optimization results)

Performans Listesi	Hedef	Prototip Tasarım	Optimize Edilmiş Tasarım	
			Stator1	Rotor1
% $\eta$	maksimum	% 84,37	% 92,232	% 95,369
$\cos\phi_p$	$\geq 0,95$	0,88	0,96912	0,98989
$G_{total}$	$\leq 1000$ Kg	1223 Kg	946,34 Kg	934 Kg
SCR ( $1/X_{dsat}$ )	$\leq 0,53$	0,537	0,49913	0,49012
$V_f$ uyarım gerilimi	$\leq 80$ Volt	82 Volt	76,34 Volt	76 Volt
$T_s$ mil torku	$\leq 6000$ Nm	6011 Nm	5039,26 Nm	5028 Nm
$B_p$ stator boyunduruk akı yoğunluğu	$\geq 1,5$ Tesla	1,3369 T	1,58 T	1,63 T

**Şekil 4.** SCR, kutup yayı merkezi uzaklığıyla güç faktörü açısının değişimi (Variation of power factor with pole arc offset and short circuit ratio)**Şekil 5.** Çıkış gücü, kısa devre oranı ve generatör toplam ağırlık değişimi (Variation of hydrogenerator total net weight with short circuit ratio and output power)

azalmalar görülmektedir. Yapılan çözümde  $0,49 < SCR < 0,53$  değeri arasında değişirken çıkış gücü

ise  $500 < kW < 600$  değerleri arasında değişmiştir. Sağlanan iyileştirme 1223 Kg olan makine toplam ağırlığı 934 Kg düşürülmüştür. Maliyet fonksiyonunda kullanılan aktif malzeme azaltıldığı için ağırlıkla doğru orantılı olarak düşmüştür.

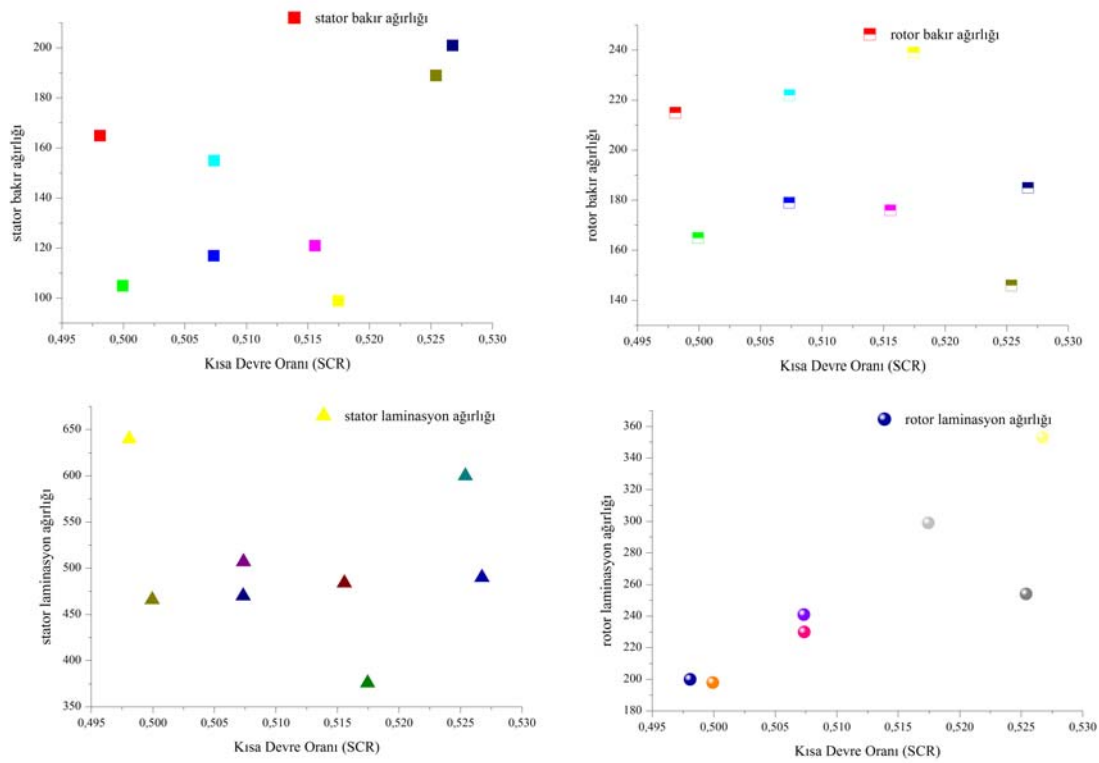
Toplam net hidrogeneratör ağırlıklarını oluşturan stator ve rotora ait aktif malzeme ağırlıklarının kısa devre oranıyla değişimini gösteren Şekil 6'da aynı SCR değerleri için ağırlık her parçada nonlineer değişmemektedir. Bu da göstermektedir ki hidrogeneratörlerde kısa devre oranı için optimum ağırlık aralıkları stator ve rotor için farklı farklı noktalardadır.

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hidroelektrik enerji üretimi için bir generatör tasarımı yapılmış ve yapılan tasarımın iyileştirilmesi için ardışık karma değişken nonlineer programlama tekniği kullanılarak tasarlanan hidrogeneratör optimize edilmiştir. Tasarlanan hidrogeneratör modelinde optimizasyon çözümüne generatöre ait mekanik, hareket ve geçici zaman değerleri dahil edilmiştir. Optimizasyon çözüm alanı dinamik ve geçici zaman analiz koşulları altında birbirine bağımlı nonlineer karma değişkenlerden oluşturulmuş ve yapılan optimizasyonlar sonucunda ideal bir hidrogeneratör tasarımı elde edilmiştir. Yapılan birçok tasarımda kullanılan değişik optimizasyon tekniklerinin bu tip bir problemi çok uzun çözüm zamanında sonuçlandırılabilirdiği ve bu çalışmada kullanılan SMINLP ile bu durumun iyileştirilebildiği Tablo 2 ve Tablo 3'te görülmüştür.

## SEMBOLLER LİSTESİ VE KISALTMALAR (GLOSSARY OF SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

- SMINLP** : Sequential Mixed İnteger Nonlinear Programming (Ardışık karma değişken nonlineer programlama)
- SNLP** : Sequential Nonlinear Programming (Ardışık nonlineer programlama)
- QS** : Quasi Newton Technique
- PS** : Pattern Search Technique
- AKDNPM** : Ardışık Karma Değişken Nonlineer Programlama Metodu
- SCR** : Short Circuit Ratio (Kısa devre oranı)
- $G_{total}$**  : Toplam hidrogeneratör ağırlığı



**Şekil 6.** SCR ile ağırlık değişimleri. (a) Stator bakır ağırlığı, (b) Rotor bakır ağırlığı, (c) Stator laminasyon ağırlığı, (d) Rotor laminasyon ağırlığı. (Variation of short circuit ratio with weight (a) Stator copper weight, (b) Rotor copper weight, (c) Stator lamination weight, (d) Rotor lamination weight.)

**Tablo 2.** Farklı optimizasyon teknikleri sonuçları karşılaştırma tablosu. (Comparison table of different optimization techniques results)

Performans Listesi	Hedef	Prototip Tasarım	Farklı Optimizasyon Teknikleri Sonuçları			
			QN	PS	SNLP	SMINLP
% $\eta$	maksimum	% 84,37	%90,002	%91,174	%92,21	%95,369
$\cos\phi$	$\geq 0,95$	0,88	0,9413	0,9487	0,9689	0,98989
$G_{total}$	$\leq 1000$ Kg	1223 Kg	1182 Kg	984 Kg	1021 Kg	934 Kg
SCR ( $1/X_{dsat}$ )	$\leq 0,53$	0,537	0,5172	0,49001	0,50610	0,49012
$V_f$ uyarım gerilimi	$\leq 80$ Volt	82 Volt	76,87 V	80,48 V	71,02 V	76 V
$T_s$ mil torku	$\leq 6000$ Nm	6011 Nm	4682 Nm	4938 Nm	5140 Nm	5028 Nm
$B_y$ stator boyunduruk akı yoğunluğu	$\geq 1,5$ Tesla	1,336 T	1,57 T	1,58 T	1,61 T	1,63 T

**Tablo 3.** Farklı optimizasyon teknikleri sonuçları iyileştirme değişim oranları tablosu. (Table of different optimization techniques goodness variation ratio results)

Performans Listesi	Hedef	Prototip Tasarım	Farklı Optimizasyon Teknikleri Sonuçları İyileştirme Değişim Oranları			
			QN	PS	SNLP	SMINLP
% $\eta$	maksimum	% 84,37	+%7,14	+%8,33	+%9,40	+%10,71
$\cos\phi$	$\geq 0,95$	0,88	+%6,96	+%7,80	+%10,10	+%12,47
$G_{total}$	$\leq 1000$ Kg	1223 Kg	+%3,46	+%24,28	+%19,78	+%30,94
SCR ( $1/X_{dsat}$ )	$\leq 0,53$	0,537	+%3,6	+%7,5	+%6,12	+%7,5
$V_f$ uyarım gerilimi	$\leq 80$ Volt	82 Volt	+%6,67	+%1,88	+%15,46	+%7,4
$T_s$ mil torku	$\leq 6000$ Nm	6011 Nm	+%2,838	+%21,72	+%16,94	+%19,55
$B_y$ stator boyunduruk akı yoğunluğu	$\geq 1,5$ Tesla	1,336 T	+%18,04	+%18,79	+%21,05	+%22,55

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Boldea, I. “**Synchronous generators**” Taylor & Francis Group, LLC, ISBN 0-8493-5725-X, New York, A.B.D., 2006.
2. Gürdal, O. “**Elektromanyetik Alan Teorisi**”, Nobel yayın dağıtım, Türkiye, Ankara, ISBN 975-591-178-2, 2000.
3. Gürdal, O. “**Elektrik Makinalarının Tasarımı**”, Atlas yayın dağıtım, Türkiye, Ankara, ISBN 975-6574-07-0, 2001.
4. Topaloğlu, İ. “**Hidroelektrik Generatör Tasarımında Optimizasyon Teknikleri**”, Yüksek lisans, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
5. Hoole, H. “**Geometric Parametrization and Constrained Optimization Techniques in the Design of Salient Pole Synchronous Machines**” IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 28, No. 4, July 1992.
6. Fujii, N. “**Second Order Sensitivity Analysis for a Class of Shape Optimization Problems**”, 0-7803-1328-3, IEEE Transactions On Magnetics, 1994.
7. Yoon, S-Baeck. “**Shape Optimization Of Selenoid Actuator Using The Fenite Element Method And Numerical Optimization Technique**”, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 33, No. 5, September 1997.
8. Mandic, I. “**Optimization of large electrical salient pole synchronous generators**”, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 20, No. 3, 2001.