

Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Bazı Elektrik
Enerji Sistemi Optimal İşletim Problemlerine Uygulanması

Burak Urazel

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2011

Application of Modified Subgradient Algorithm Based on Feasible Values to Various
Types of Electrical Energy System Optimal Operation Problems

Burak Urazel

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical and Electronics Engineering

August 2011

Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Bazı Elektrik Enerji
Sistemi Optimal İşletim Problemlerine Uygulanması

Burak Urazel

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Tesisleri Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Salih FADIL

Ağustos 2011

ONAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Burak Urazel'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritmasının Bazı Elektrik Enerji Sistemi Optimal İşletim Problemlerine Uygulanması” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Salih FADIL

İkinci Danışman : -----

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Salih FADIL

Üye : Doç. Dr. Mehmet KURBAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAZICI

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bünyamin TAMYÜREK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümmühan BAŞARAN FİLİK

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada çeşitli elektrik enerji sistemi optimal işletim problemleri, uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient (F-MSG) algoritması kullanılarak çözülmüştür. Ele alınan bu problemler sırasıyla; optimal güç akış problemi, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde optimal güç dağıtım problemi, çevresel / ekonomik optimal güç dağıtım problemi ve pompayla doldurulmalı birim içeren elektrik enerji sistemlerinde optimal güç dağıtım problemi olarak sıralanabilir. Her bir problemin matematiksel modellemesi yapıldıktan sonra çeşitli test sistemlerinde bu problemler F-MSG algoritması ile çözülmüş ve tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Genişletilmiş LaGrange Fonksiyonu, F-MSG, Optimal Güç Akış Problemi, Ya Al Ya Da Öde Antlaşması, Çok Amaçlı Optimizasyon, Çevresel / Ekonomik Güç Dağıtım Problemi, Pompayla Doldurulmalı Hidrolik Birimler.

SUMMARY

In this study, various types of optimal power flow problems were solved by using a modified subgradient algorithm based on feasible values (F-MSG). These problems can be listed as optimal power flow problem, optimal power dispatch problem for a power system area including limited energy supply thermal units, environmental / economic optimal power dispatch problem and optimal power dispatch problem for a power system area including pumped-storage hydraulic units. After mathematical models of each problem are given, all these problems are solved by the F-MSG algorithm in various test systems and satisfactory results are obtained.

Keywords: Sharp Lagrange Function, F-MSG, Optimal Power Flow Problem, Take Or Pay Contract, Multiobjective Optimization, Environmental / Economic Dispatch Problem, Pumped Storage Hydraulic Units.

TEŞEKKÜR

Yoğun çalışma programına rağmen hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen, bilgi birikimi, akademisyenliği ve iş ahlâkıyla daima bana örnek olan danışmanım sayın Prof. Dr. Salih FADIL'a ne kadar teşekkür etsem azdır. Ayrıca tezimi hazırlarken bana her türlü konuda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Ahmet YAZICI'ya değerli katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarında her türlü kolaylığı sunan bütün hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Akademisyenliğe başlamam konusundaki teşviklerinden ve değerli tavsiyelerinden dolayı sayın Prof. Dr. Nejat KIRAÇ'a ve sayın Prof. Dr. Adnan KONUK'a teşekkürlerimi sunarım.

Başta beni özveriyle yetiştirip bugünlere gelmemi sağlayan aileme, beni daima kendi evlatları gibi gören rahmetli babaanneme ve halalarıma, yeğenleri olarak beni hiçbir zaman kendi çocuklarından ayırmayan amca ve yengelerime, abileri olarak her türlü kahrımı çeken kardeşim ve yeğenlerime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı, her şeyiyle kendime örnek aldığım, Nisan 2011'deki vefatından sonra bir yanım eksik kalan, üzerimde herkesten çok emeği olan dedem Cevat URAZEL'e adarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xiii
1 GİRİŞ	1
2 LAGRANGE FONKSİYONU VE UYGUN DEĞERLER TEMELLİ GENELLEŞTİRİLMİŞ SUBGRADİENT ALGORİTMASI	4
2.1 Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient Algoritması	5
2.2 F-MSG Algoritması Adımları	6
2.3 Eşitsizlik Kısıtlarının Eşitlik Kısıtlarına Dönüştürülmesi	9
2.3.1 Yapay değişkenler kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi	9
2.3.2 “max” fonksiyonu kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi	10
3 ENERJİ SİSTEMLERİNDE OPTİMAL İŞLETİM PROBLEMLERİ	12
3.1 Güç Akış Denklemleri	12
3.2 Optimal Güç Akış Problemi	15
3.3 Ham Enerji Kaynağı Kısıtlı Termik Birimler İçeren Sistemlerde Optimal Güç Dağıtım Problemi	18
3.4 Çevresel / Ekonomik Optimal Güç Dağıtım Problemi	21

İÇİNDEKİLER (devam)

3.5 Pompayla Doldurmalı Birim İçeren Elektrik Enerji Sistemlerinde Optimal Güç Dağıtım Problemi	24
4 UYGULAMA VE HESAPSAL SONUÇLAR	29
4.1 F-MSG Algoritması Kullanılarak Optimal Güç Akış Probleminin Çözülmesi	30
4.1.1 Konveks maliyet fonksiyonlarına sahip üretim birimleri içeren sistemlerde optimal güç akış probleminin F-MSG algoritması ile çözümü	31
4.1.2 Optimal çalışma noktasında elektriksel kısıtların kontrolü	35
4.1.3 Konveks olmayan maliyet fonksiyonlarına sahip üretim birimleri içeren sistemlerde optimal güç akış probleminin F-MSG algoritması ile çözümü	35
4.2 Ham Enerji Kaynağı Kısıtlı Termik Birimler İçeren Sistemlerde Optimal Güç Dağıtım Probleminin F-MSG Algoritması İle Çözümü	37
4.2.1 Ya al ya da öde antlaşması ihmal edilirse	39
4.2.2 Ya al ya da öde antlaşması göz önünde bulundurulursa	39
4.3 Çevresel / Ekonomik Optimal Güç Dağıtım Probleminin F-MSG Algoritması İle Çözümü	44
4.4 Pompayla Doldurmalı Birim İçeren Enerji Sistemlerinde Optimal Güç Dağıtım Probleminin F-MSG Algoritması İle Çözümü	49
4.4.1 Pompayla doldurmalı birimin devre dışı olursa	53
4.4.2 Pompayla doldurmalı birimin devrede olursa	54
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	62

İÇİNDEKİLER (devam)

EKLER

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 IEEE 30 baralı test sistemi için üretim birimlerinin alt ve üst üretim sınırları ile konveks maliyet fonksiyonu sabitleri	31
4.2 Optimal güç akış probleminde kullanılan başlangıç noktası ve elde edilen çözümler için güç üretim değerleri	32
4.3 Optimal güç akış problemi için elde edilen en küçük yakıt maliyetinin, literatürdeki diğer sonuçlar ile karşılaştırılması	32
4.4 Optimal güç akış probleminde kullanılan başlangıç noktası ve elde edilen optimum çalışma noktaları için bara gerilim genlikleri ve faz açıları	33
4.5 Optimal güç akış probleminin çözümü sırasında algoritmada üretilen uygun ve uygun olmayan değerler	34
4.6 IEEE 30 baralı test sisteminde 1 ve 2 nolu bralara bağlı birimlerin değiştirilmiş alt ve üst üretim sınırları ile konveks olmayan maliyet fonksiyonu sabitleri	36
4.7 Konveks olmayan maliyet fonksiyonu içeren optimal güç akış problemi için elde edilen en küçük yakıt maliyetinin, literatürdeki diğer sonuçlar ile karşılaştırılması	36
4.8 Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde optimal güç dağıtım probleminin çözümünde kullanılan başlangıç noktasındaki güç üretim değerleri	38
4.9 Ya al ya da öde antlaşması ihmal edildiğinde elde edilen optimal çalışma noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri ve termal kayıplar	39
4.10 Ya al ya da öde antlaşması göz önüne alındığında elde edilen optimal çalışma noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri ve termal kayıplar	42
4.11 Her bir ψ değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki toplam gaz tüketimi ve toplam yakıt maliyetleri	43
4.12 Çevresel / ekonomik optimal güç dağıtım probleminin çözümünde kullanılan başlangıç noktasındaki güç üretim değerleri	45

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

4.13 Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu ve emisyon fonksiyonu sabitleri ile güç üretimi alt ve üst sınırları	46
4.14 Birinci alt zaman aralığında her bir w değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki üretilen aktif güçler, hat kayıpları, yakıt maliyetleri ve emisyon değerleri	47
4.15 Birinci alt zaman aralığında $w = 0$ ve $w = 1$ değeri için, Diferansiyel Evrim Algoritması ile elde edilen optimal çalışma noktasındaki yakıt maliyetleri ve emisyon değerleri	47
4.16 24 saatlik işletim süresi için, her bir w değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki toplam yakıt maliyeti, toplam emisyon değerleri ve ham enerji kaynağı kısıtlı birimler tarafından harcanan gaz miktarı	48
4.17 Ya al ya da öde antlaşması gereği yeniden hesaplanan toplam yakıt maliyeti değerleri	48
4.18 Ya la ya da öde antlaşmasındaki en az gaz tüketim kısıtını sağlayan pareto-optimal sonuçlar için, toplam yakıt maliyetleri, toplam emisyon değerleri ve ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin toplam gaz tüketim değerleri	49
4.19 Pompayla doldurulmalı birim içeren enerji sistemlerinde optimal güç dağıtım probleminin çözümünde kullanılan başlangıç noktasındaki güç üretim değerleri	50
4.20 Termik birimlerin alt ve üst üretim sınırları ile konveks maliyet fonksiyonu sabitleri	51
4.21 Pompayla doldurulmalı birim devre dışı olduğunda elde edilen çözüm noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri, hat kayıpları ve yakıt maliyetleri	53
4.22 Pompayla doldurulmalı birim devrede iken elde edilen çözüm noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri, hat kayıpları ve yakıt maliyetleri	57
4.23 Alt zaman aralığı sonlarında rezervuarda mevcut su hacimleri ile o alt zaman aralığında pompalı doldurulmalı birimini aktif güç üretim değerleri	57
4.24 Her bir ψ değerine karşılık hesaplanan $q_{Harc,Net}$ değerleri	58

SİMGELER DİZİNİ

- R : hayali para birimi
- t_k : k alt zaman aralığının saat cinsinden süresi
- N : enerji sistemindeki tüm baraları içeren set
- N_G : tüm üretim birimlerinin bağlı olduğu baraları içeren set
- N_S, N_T : sırasıyla, normal yakıtlı termik birimlerin ve ham enerji kaynak kısıtlı birimlerin bağlı olduğu baraları içeren setler
- N_{Bi} : i barasına bir iletim hattı ile doğrudan bağlı baraları içeren set
- N_a : sistemdeki tüm nominal dışı çevrim oranına sahip trafoların bağlı olduğu baraları içeren set
- L : sistemdeki tüm iletim hatlarını içeren set
- J_{\max} : işletim süresinin sahip olduğu toplam alt zaman aralığı sayısı
- F_S, F_T : sırasıyla, normal yakıtlı termik birimlerin ve ham enerji kaynak kısıtlı birimlerin saat başı yakıt maliyetleri
- F_i : i barasına bağlı üretim biriminin saat başı yakıt maliyeti
- $F_{i,j}$: i barasına bağlı bir birimim j alt zaman aralığı boyunca saat başı maliyeti
- b_i, c_i, d_i, e_i, g_i : yakıt maliyeti fonksiyon sabitleri
- P_{Gi}, Q_{Gi} : i barasına bağlı birimin, sırasıyla, aktif ve reaktif güç üretim değeri
- $P_{Gi,j}, Q_{Gi,j}$: i barasına bağlı birimin j alt zaman aralığında, sırasıyla, aktif ve reaktif güç üretim değeri
- $P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$: i barasına bağlı termik birimin, sırasıyla, aktif güç alt ve üst üretim sınırları
- $Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$: i barasına bağlı termik birimin, sırasıyla, reaktif güç alt ve üst üretim sınırları
- $P_{Yük,i}, Q_{Yük,i}$: i barasına bağlı, sırasıyla, aktif ve reaktif yük değerleri
- $P_{yük i,j}, Q_{yük i,j}$: j alt zaman aralığında i barasına bağlı, sırasıyla, aktif ve reaktif yük değerleri

SİMGELER DİZİNİ (devam)

- p_{ij}, q_{ij} : i ve j baraları arasına bağlı olan hat üzerinden i barasından j barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin i barası sınırındaki değerleri
- $p_{ik,j}, q_{ik,j}$: j alt zaman aralığında i ve k baraları arasına bağlı olan hat üzerinden i barasından k barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin i barası sınırındaki değerleri
- p_l : l . iletim hattından akan aktif güç
- $p_{l,j}$: l . iletim hattından j alt zaman aralığında akan aktif güç
- p_l^{\max} : l . iletim hattının aktif güç taşıma kapasitesi
- a_i : i ve j baraları arasına bağlı olan hattın i . bara tarafına nominal dışı çevirme oranına sahip bir trafonun bağlı olması durumunda, bu trafoya ait nominal dışı çevirim oranı
- $a_{i,j}$: i ve k baraları arasına bağlı olan hattın i . bara tarafına nominal dışı çevirme oranına sahip bir trafonun bağlı olması durumunda, bu trafoya ait nominal dışı çevirim oranının j alt zaman aralığındaki değeri
- a_i^{\min}, a_i^{\max} : nominal dışı çevirme oranına sahip trafoya ait nominal dışı çevirim oranının, sırasıyla, alt ve üst sınırları
- U_i : i barasının gerilim genliği
- $U_{i,j}$: j alt zaman aralığında i barasının gerilim genliği
- U_i^{\min}, U_i^{\max} : i barasının gerilim genliğinin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarıdır
- $C_{Ti,j}$: i barasına bağlı birimin j alt zaman aralığında tükettiği saat başı yakıt miktarı
- $C_{T,j}$: j işletim süresi boyunca harcanacak toplam yakıt miktarı
- C_{TOT} : ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin tüketmek zorunda olduğu, ya al ya da öde antlaşmasında belirlenmiş en az yakıt miktarı
- E_i : i barasına bağlı birimin j alt zaman aralığında emisyon miktarı
- $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \lambda_i$: emisyon fonksiyonu sabitleri

SİMGELER DİZİNİ (devam)

E_{tot} : toplam NO_x emisyon miktarı

q_{GH} : pompayla doldurulmalı bir birimin, enerji üretirken rezervuardan saldıdığı su miktarı,

q_{PH} : pompayla doldurulmalı birimin rezervuar hacmini doldurmak için rezervuara pompaladığı su miktarı

$P_{GH,j}$: j alt zaman aralığında pompayla doldurulmalı birimin aktif güç üretim değeri,

$P_{PH,j}$: j alt zaman aralığında pompayla doldurulmalı birimin rezervuara su pompalamak için harcadığı güç değeri

P_{GH}^{max} : pompayla doldurulmalı birimin aktif güç üretim üst sınırı;

P_{PH}^{max} : pompayla doldurulmalı birimin rezervuara su pompalamak için harcayabileceği en yüksek güç değeri,

$q_{Harc,Top}$: tüm işletim süresi boyunca, pompayla doldurulmalı birimin enerji üretmek için rezervuardan saldıdığı toplam su miktarı,

$q_{Pomp,Top}$: tüm işletim süresi boyunca, pompayla doldurulmalı birimin rezervuara pompaladığı toplam su miktarı,

$q_{Harc,Net}$: tüm işletim süresi boyunca, pompayla doldurulmalı birimin rezervuardan saldıdığı net su miktarı,

j_{Gen} : pompayla doldurulmalı birimin enerji ürettiği alt zaman aralığı içeren set,

j_{Pomp} : pompayla doldurulmalı birimin rezervuara su pompaladığı alt zaman aralığı içeren settir.

V_j : j alt zaman aralığı sonundaki rezervuar hacmi

V^{min} , V^{max} : rezervuar hacminin, sırasıyla, alt ve üst sınır değerleridir

U_i , δ_i : i barasının sırasıyla gerilim genliği ve faz açısı

$r_{ik} + jx_{ik}$: i ve k baraları arasında yer alan iletim hattının seri empedansı

$g_{ik} + jb_{ik}$: i ve k baraları arasında yer alan iletim hattının seri admitansdır

$g_{shi} + jb_{shi}$: şönt admitans değeri

SİMGELER DİZİNİ (devam)

$p_{kayıp,i k}$: i ve k baraları arasında yer alan iletim hattında meydana gelen termal kayıp

$p_{kayıp,l}$: l iletim hattında meydana gelen termal kayıp

P_{KAYIP} : ise enerji sisteminin bütününde oluşan toplam kayıp

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son zamanlarda teknolojiye gerçekleşen hızlı gelişim, günlük hayattaki birçok uygulama başta olmak üzere, her alanda kullanılan insan gücünü en aza indirmiştir. Ancak bu gelişimin beraberinde getirdiği enerji ihtiyacındaki artış, mevcut enerji kaynaklarının azalmasına ve enerji fiyatlarında büyük artışlara neden olmuştur.

Enerji sistemlerinde, üretim maliyetlerinin düşürülmesinin yanı sıra, çözülmesi gereken birçok problem mevcuttur. Enerji kaynaklarının her birine aynı kolaylıkta ulaşmanın mümkün olmamasından dolayı, kısıtlı hammaddenin temini için, aracı işletmeler ile fazladan maliyet doğuracak çeşitli antlaşmalar yapma zorunluluğu bu problemlerden yalnızca bir tanesidir. Ayrıca fosil kaynaklarla üretim yapan birimlerin, enerji üretirken atmosfere saldıkları çeşitli gazlar ve kül parçacıkları, küresel ısınma başta olmak üzere birçok çevre problemine neden olmaktadır. Bu sebeple enerji üretimi yapılırken çevresel koşullar da dikkate alınmalıdır. Bunlara ek olarak üretim kapasitesi belirlenirken günlük, aylık veya yıllık işletim sürelerinde enerji talebinde meydana gelebilecek, önceden belirlenmesi çok zor olan, ani artışlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Enerji ihtiyacındaki bu artışlara hızlı tepki verebilmek için çabuk devreye girebilen üretim tesislerinin kurulmalı ve bunların üretim kapasitelerinin dikkatlice hesaplanmalıdır.

Yukarıda çeşitli örnekleri verilen kısıtlar doğrultusunda, enerji sistemlerinde en düşük enerji üretim maliyetinin hesaplanması giderek önem kazanmaktadır. Bu konu hakkında literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Fadıl ve Sarioğlu (1998), aktif ve reaktif güç dağıtım probleminin çözümünde sözde elektrik fiyatı (pseudo price) kullanan bir metod kullanmışlardır. Abido (2002) ise optimal güç akış problemini tabu arama yöntemiyle çözmüştür. Jeyakumar vd. (2006)

aynı probleme parçacık sürü optimizasyon yöntemiyle çözüm yaklaşımı sunmuşlardır. Benzer problemlerin çözümünde Al-Othman ve El-Nagger (2007) şablon (pattern) arama metodu kullanırken Chiang (2007) genetik algoritma, Coelho ve Mariani (2007) diferansiyel evrim algoritması, Sun vd. (2009) geliştirilmiş kuantum davranışlı parçacık sürü optimizasyonu metodu kullanmışlardır. Selvakumar ve Thanushkodi (2007) parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile problemin çözümüne konveks olmayan maliyet fonksiyonuna sahip birimleri de dahil etmişlerdir. Böyle konveks olmayan maliyet fonksiyonuna sahip birimleri içeren sistemlerde güç akış problemlerinin çözümünde Sayah ve Zehar (2008) geliştirilmiş diferansiyel evrim metodu, Chaturvedi vd. (2008) kendini örgütleyen (self-organizing) hiyerarşik parçacık sürü optimizasyon metodu, Park vd. (2010) geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyon metodu kullanmışlardır. Bunlara ek olarak Filik ve Kurban (2010) uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient (F-MSG) algoritması ile birim yüklenme (unit commitment) probleminin çözümüne yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Ayrıca aynı probleme genelleştirilmiş subgradient (MSG) algoritması kullanarak çözüm aramışlardır (Filik ve Kurban 2010).

Fadıl ve Yaşar (2002), hammadde kaynak kısıtlı birimler içeren sistemlerde güç dağıtım problemini, sözde elektrik fiyatı (pseudo price) kullanan bir metotla çözmüşlerdir. Kumarappan ve Mohan (2003), benzer bir probleme evrimsel programlama kullanarak çözüm aramışlardır. Basu (2002) ise yakıt kısıdı içeren çevresel / ekonomik güç dağıtım problemini hopfield nöral ağırları yardımıyla çözmüştür.

Çevresel / ekonomik güç dağıtım probleminin çözümünde Abou El Ala (2010) diferansiyel evrim algoritmasından faydalanmışlardır. Abido (2009) çevresel / ekonomik güç dağıtım problemini, çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu kullanarak çözmüşlerdir. Osman vd. (2009) aynı problemi ε egemen temelli çok amaçlı genetik algoritma kullanarak çözerken, Chaturvedi vd. (2008) geliştirilmiş yeni bulanık (neofuzzy) nöron temelli bir yaklaşım kullanmışlardır.

Lee vd. (1992) pompayla doldurmalı sistemlerin hidrotermal güç dağıtım problemine etkilerini araştırmışlardır. Fadıl ve Yaşar (2000) pompayla doldurmalı hidrolik birimlerin güç dağıtım problemine sözde elektrik fiyatı (pseudo price) yöntemini uygulamışlardır. Garcia-Gonzalez vd. (2008) rüzgarla enerji üreten birimler ile pompayla doldurmalı birimlerin stokastik birleşik optimizasyonu üzerine çalışmışlardır.

Bu çalışmada enerji sistemlerindeki çeşitli optimal işletim problemleri, uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient algoritması (F-MSG) kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Kasimbeyli vd. (2009) tarafından geliştirilmiş olan F-MSG algoritması, genişletilmiş Lagrange fonksiyonu kullanarak, ikil optimizasyon temelinde çözüm yaklaşımı sunmaktadır. Algoritmanın ana fikri, problemin uygun ve uygun olmayan değerlerini bularak optimal çözüm noktasına ulaşmaktır. F-MSG algoritmasının en önemli özelliği, konveks olmayan optimizasyon problemlerinde de global optimum değerlerin elde edilebilmesi ve çözüm noktasında sıfır ikil aralık (dual gap) sağlanabilmektedir.

Bu çalışmanın ikinci bölümde genişletilmiş Lagrange fonksiyonları incelenmiş ve F-MSG yöntemi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde çalışmada ele alınacak optimal güç akış problemleri tanımlanmış ve her probleme ait matematiksel modeller oluşturulmuştur. Öncesindeyse bu matematiksel modellerde yer alan elektriksel niceliklerin hesaplanmasında kullanılan güç akış denklemleri verilmiştir. Dördüncü bölümde; üçüncü bölümde açıklanan örnek problemler F-MSG algoritması kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Beşinci bölümde ise yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2

LAGRANGE FONKSİYONU VE UYGUN DEĞERLER TEMELLİ GENELLEŞTİRİLMİŞ SUBGRADİENT ALGORİTMASI

Lagrange temelli optimizasyon yöntemlerinde, kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümündeki ilk adım, en küçük değeri aranılan birincil problemin bir kısıtsız ikil (dual) probleme dönüştürülmesidir. Bu da Lagrange fonksiyonlarının kullanılması ile gerçekleştirilir (Rubinov ve Gasimov, 2002).

Lagrange yöntemleri ikil optimizasyon temelinde çözüm yaklaşımı sunar. Lagrange çarpanlarının değerleri bulunarak, ikil amaç fonksiyonu değeri maksimum yapılmaya çalışılır. Optimal çözüm noktasında birincil problemin en iyi sonucu, ki birincil problemin en küçük değeridir, ile ikil problemin en iyi sonucu, ki ikil problemin en büyük değeridir, eşit olmalıdır. Aksi takdirde her iki problemin en iyi sonuçları arasında ikil aralık (dual gap) adı verilen bir fark oluşacaktır. Bu ikil aralık değeri, optimizasyon problemlerinde çözüm kalitesini belirlemekte, ikil aralık değeri azaldıkça çözümün kalitesi artmaktadır.

Klasik Lagrange fonksiyonları sadece dışbükey (convex) problemler için sıfır ikil aralığı sağlarken, amaç fonksiyonunun veya herhangi bir kısıtın dışbükey olmaması (non-convex) durumunda sıfır ikil aralığın sağlanması için genişletilmiş Lagrange fonksiyonu kullanılmalıdır (Gasimov 2002).

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\
 & \mathbf{x} \in K \\
 & \text{kısıtları altında enk } F(\mathbf{x})
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Burada \mathbf{x} ; bağımsız değişkenleri içeren vektör, $F(\mathbf{x})$; amaç fonksiyonu, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$; eşitlik kısıtlarını içeren vektör, K ; bağımsız değişkenlerin alt ve üst sınırları ile belirlenmiş, olası \mathbf{x} elemanlarını içeren settir.

Denklem (2.1)'de verilen birincil problem için, genişletilmiş Lagrange fonksiyonu, L ve ikil fonksiyon, H , aşağıdaki şekilde tanımlanır (Gasimov 2002).

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) &= F(\mathbf{x}) + c \|\mathbf{h}(\mathbf{x})\| - \langle \mathbf{u}, \mathbf{h}(\mathbf{x}) \rangle \\ &= F(\mathbf{x}) + c \left([h_1(\mathbf{x})]^2 + [h_2(\mathbf{x})]^2 + \dots + [h_N(\mathbf{x})]^2 \right)^{1/2} \\ &\quad - (u_1 h_1(\mathbf{x}) + u_2 h_2(\mathbf{x}) + \dots + u_N h_N(\mathbf{x})) \end{aligned} \quad (2.2)$$

ve

$$H(\mathbf{u}, c) = \underset{\mathbf{x} \in K}{\text{enk}} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) \quad (2.3)$$

Burada $u_1, u_2, \dots, u_N \in R$ ve $c \geq 0$ Lagrange çarpanları ya da ikil değişkenlerdir. Denklem (2.1)'de verilen birincil probleme ait, genişletilmiş Lagrange fonksiyonu kullanılarak oluşturulan kısıtsız ikil problem ise aşağıdaki şekilde ifade edilir (Gasimov, 2002).

$$\underset{(\mathbf{u}, c) \in R^{N_{es}} \times R_+}{\text{enb}} H(\mathbf{u}, c) \quad (2.3)$$

2.1 Uygun Değerler Temelli Genelleştirilmiş Subgradient (F-MSG) Yöntemi

Kasimbeyli vd. (2009) tarafından geliştirilmiş olan uygun değerler temelli genelleştirilmiş subgradient algoritmasının temel fikri, asıl-ikil en iyi amaç fonksiyonu değerinin, uygun (feasible) ve uygun olmayan (infeasible) değerler yardımıyla bulunmasıdır.

Denklem (2.1)'de verilen problem için uygun ve uygun olmayan değerlerin tanımını şu şekilde yapmak mümkündür; Eğer bir \tilde{H} değeri için, $\mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}}) = 0$ ve $F(\tilde{\mathbf{x}}) \leq \tilde{H}$ koşullarını sağlayan bir $\tilde{\mathbf{x}} \in K$ bağımsız değişken seti bulunabiliyorsa, \tilde{H} değeri bu problem için uygun bir değerdir. Aksi takdirde \tilde{H} değeri uygun olmayan bir değerdir (Kasimbeyli vd., 2009).

Temelinde verilen problem için uygun ve uygun olmayan değerlerin bulunması yer alan F-MSG algoritması, keyfi bir H_1 sayısı ve (\mathbf{u}_1, c_1) ikil başlangıç değişkenlerinin seçilmesi ile başlar. Daha sonra aşağıda verilen kısıt sağlama problemine (KSP) çözüm arayarak seçilen H_1 değerinin uygun veya uygun olmayan değer olduğunu kontrol eder

$$F(\tilde{\mathbf{x}}) + c_1 \|\mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}})\| - \langle \mathbf{u}_1, \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{x}}) \rangle \leq H_1 \quad (2.4)$$

eşitsizliğini sağlayan bir $\tilde{\mathbf{x}} \in K$ çözümü bul

Sonraki adımda H_1 'in uygun bir değer olup olmamasına bağlı olarak H_1 , $H_1 = \min\{F(\tilde{\mathbf{x}}), H_1 - \Delta_1\}$ veya $H_1 = H_1 + \Delta_1$ olacak şekilde güncellenir. Burada Δ_1 aralık genişliğini gösteren bir parametredir. H_1 'in güncellenmesi bir uygun, bir de uygun olmayan alt ve üst değerler elde edilinceye kadar bu şekilde devam eder. Eğer uygun ve uygun olmayan alt ve üst değerli bir aralık bulunmuş ise; uygun değer için $H_1 = H_1 - \Delta_1 / 2$, uygun olmayan değerler için $H_1 = H_1 + \Delta_1 / 2$ şeklinde H_1 değerinin güncellenmesine devam edilir (Kasimbeyli vd., 2009).

2.2 F-MSG Algoritması Adımları

F-MSG algoritmasının işleyişi aşağıda verilen adımlar ile gerçekleşmektedir.

1.Adım: Pozitif ε_1 , ε_2 , Δ_1 , ve M parametrelerini ve H_1 sayısını belirle. $n=1$, $p=0$, $q=0$ al ve 2.Adım'a git.

2.Adım: $(\mathbf{u}_1^n, c_1^n) \in R^{N_{ES}} \times R_+$ olacak şekilde ikil değişkenleri seç. $k=1$, $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_1^n$, $c_k = c_1^n$ al ve 3.Adım'a git.

3.Adım: Seçilen (\mathbf{u}_k, c_k) ikil değişkenleri için aşağıdaki kısıt sağlama problemini (KSP) çöz.

$$F(\mathbf{x}_k) + c_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| - \langle \mathbf{u}_k, \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \rangle \leq H_n \quad (2.5)$$

eşitsizliğini sağlayan bir $\mathbf{x}_k \in K$ çözümü bul

Eğer denklem (2.5)'de verilen KSP için bir çözüm mevcut değil ise (örneğin $l(k) > M$)

6.Adıma git. Eğer denklem (2.5) için bir \mathbf{x}_k çözümü varsa, $\|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ olup olmadığını kontrol et. $\|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ ise, 5.Adım'a git. Aksi takdirde 4.Adım'a git.

4.Adım: ikil değişkenleri aşağıdaki şekilde yenile.

$$\mathbf{u}_{k+1} = \mathbf{u}_k - \alpha s_k \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \quad (2.6)$$

$$c_{k+1} = c_k + (1 + \alpha) s_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \quad (2.7)$$

Burada s_k pozitif adım boyutu olup aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$0 < s_k = \frac{\lambda \alpha (H_n - L(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, c_k))}{[\alpha^2 + (1 + \alpha)^2] \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\|^2} \quad (2.8)$$

Denklem (2.8)'de α ve λ sabit parametreler olup $\alpha > 0$ ve $0 < \lambda < 2$ olacak şekilde seçilmelidir. Ayrıca çözümün optimal değere yakınsaması için mevcut ikil değişkenler için aşağıdaki eşitsizlik de sağlanmalıdır.

$$\left(s_k \|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| + c_k - \|\mathbf{u}_k\| \right) > \ell(k) \quad (2.9)$$

$k = k + 1$ yap, $\ell(k)$ fonksiyonunu $k \rightarrow +\infty$ iken $\ell(k) \rightarrow +\infty$ olacak şekilde güncelle. Tekrar 3.Adıma git.

5.Adım: \mathbf{x}_k , $\|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ şartını sağlayan, 3.Adımda denklem (2.5)'deki KSP'nin bir çözümü olsun. Bu durumda $L(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, c_k) \cong F(\mathbf{x}_k)$ olur. p 'i kontrol et. Eğer $p = 0$ ise $\Delta_{n+1} = \Delta_n$, aksi takdirde $\Delta_{n+1} = \Delta_n / 2$ yap ve Δ_{n+1} 'i kontrol et. Eğer $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ ise burada dur. \mathbf{x}_k en iyi birincil çözümdür. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ değilse $H_{n+1} = \min\{F(\mathbf{x}_k), H_n - \Delta_{n+1}\}$, $n = n + 1$, $q = q + 1$ yap ve 2.Adım'a git.

6.Adım: Eğer $q = 0$ ise $\Delta_{n+1} = \Delta_n$, aksi takdirde $\Delta_{n+1} = \Delta_n / 2$ yap ve Δ_{n+1} 'i kontrol et. Eğer $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ ise burada dur. Son uygun H_n değeri için 3.Adımdaki KSP'nin, $\|\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)\| \leq \varepsilon_1$ şartını sağlayan \mathbf{x}_k çözümü en iyi birincil çözümdür. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ değilse $H_{n+1} = H_n + \Delta_{n+1}$, $n = n + 1$, $p = p + 1$ yap ve 2.Adım'a git.

Algoritmanın 3 ve 4. adımları iç döngü, 2, 5 ve 6. adımları ise dış döngü olarak düşünülebilir. n indisi dış döngü, k indisi iç döngü için birer sayaçtır. İç döngüde, seçilen H_n için (KSP) problemine bir çözüm bulunmaya çalışılırken dış döngüde uygun ve uygun olmayan değerler için aralığın daraltılmasına çalışılır. İç döngüde kontrol edilen M sayısı, H_n 'in uygun olup olmadığını tahmin etmek için kullanılan sonlandırma toleransıdır. Eğer $l(k) > M$ olana kadar herhangi bir çözüme erişilemez ise H_n 'in uygun olmayan bir değer olduğu sonucuna ulaşılır. Bu durumda dış

döngüdeki 6.Adıma gidilir. Eğer (KSP) problemini sağlayan ancak $\|h(x_k)\| \geq \varepsilon_1$ olan bir çözüm bulunmuşsa 4.Adıma gidilir. 4.Adımda ikil değişkenleri güncellemede kullanılan adım uzunluğu formülasyonları, elde edilen x_k çözümlerinin uygun bir çözüme yakınsamasını sağlayacaktır (Kasimbeyli vd., 2009).

Adım 1'de seçilen Δ_1 sayısı, dış döngüde H_n 'in güncellenmesi için kullanılan parametredir. p ve q sayaçları, çözüm süresince algoritma tarafından oluşturulan uygun ve uygun olmayan değerlerin sayılarını gösterir. p ve q parametrelerinin her ikisinin de sıfırdan farklı olması, uygun ve uygun olmayan değerli alt ve üst sınırlara sahip aralığın yakalandığı anlamına gelir. Bu aralık yakalandıktan sonraki her adımda Δ_n değeri azaltılacaktır. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ koşulu sağlandığında algoritma sona erer. En son elde edilen uygun değer, asıl problemin yaklaşık en iyi değeridir (Kasimbeyli vd., 2009).

2.3 Eşitsizlik Kısıtlarının Eşitlik Kısıtlarına Dönüştürülmesi

F-MSG algoritması yalnızca eşitlik kısıtları üzerinde çözüm yaptığı için, problemdeki her bir eşitsizlik kısıtı bir eşitlik kısıtı şeklinde yazılmalıdır. Bu dönüştürme aşağıda belirtilen metotlar kullanılarak gerçekleştirilebilir.

2.3.1 Yapay değişkenler kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi

Herhangi bir eşitsizlik kısıtını, eşitlik kısıtı olarak ifade edebilmenin bir yolu, aşağıda gösterildiği üzere, bu eşitsizlik kısıtlarına birer yapay değişken (slack variable) eklenmesidir (Wood ve Wollenberg, 1996).

$$h(x) = (x - x^+) \leq 0 \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da verilen $h(x)$ eşitsizlik kısıtı, bu eşitsizliğe pozitif bir değişken, S^2 , eklenmesiyle aşağıdaki $h_{eq}(x, S)$ eşitlik kısıtına çevrilebilir.

$$h_{eq}(x, S) = (x - x^+ + S^2) = 0 \quad (2.11)$$

burada S yapay değişken olup, pozitif bir değişken olması gerektiğinden S^2 olarak kullanılmıştır. $h(x)$ eşitsizlik kısıtını sağlayan herhangi bir x değişkeni için $(x - x^+) \leq 0$ olacağı açıkça görülmektedir. O halde bu negatif $(x - x^+)$ değerine eklendiğinde sonucu sıfır yapan pozitif bir S^2 değeri her zaman bulunabilir. Bu S^2 değeri için hem $h(x) \leq 0$ kısıtı, hem de $h_{eq}(x, S) = 0$ kısıtı sağlanır. Böylece denklem (2.10)'da verilen $h(x)$ eşitsizlik kısıtı, denklem (2.11)'da verilen $h_{eq}(x, S)$ eşitlik kısıtı ile ifade edilmiş olur. Ancak bu metot kullanıldığında probleme yeni değişkenler eklendiğinden dolayı, bağımsız değişkenleri içeren x vektörünün boyutu artacak ve dolayısıyla problemin daha karmaşık bir hal alacaktır. Bunun sonucunda çözüm süresinde artış meydana gelecektir.

2.3.2 “max” fonksiyonu kullanılarak eşitsizlik kısıtlarının eşitlik kısıtlarına dönüştürülmesi

Bu metotta kullanılacak “max” fonksiyonu aşağıdaki tanımlanabilir (Burachik vd., 2006).

$$\max\{a, b\} = \begin{cases} a, & \text{eğer } a \geq b \\ b, & \text{eğer } b > a \end{cases} \quad (2.11)$$

$h(x) = (x - x^+) \leq 0$ eşitsizlik kısıtı, yukarıda tanımlanmış olan “max” fonksiyonu kullanılarak $h_{eq}(x)$ eşitlik kısıtına çevrilebilir. Bu durumda $h_{eq}(x)$ şu şekilde yazılır.

$$h_{eq}(x) = \max\{0, (x - x^+)\} = 0 \quad (2.12)$$

$h(x)$ eşitsizlik kısıtını sağlayan herhangi bir x değişkeni için $(x - x^+) \leq 0$ dır. “max” fonksiyonu, girdilerinden büyük olanı çıktı olarak ürettiğinden, bu x değişkeni için $\max\{0, (x - x^+)\} = 0$ olacaktır. Bu durumda hem $h(x) \leq 0$ kısıtı, hem de $h_{eq}(x) = 0$ kısıtı sağlanır. Böylece denklem (2.10)’da verilen $h(x)$ eşitsizlik kısıtı, denklem (2.12)’de verilen $h_{eq}(x)$ eşitlik kısıtı ile ifade edilmiş olur. Bu yöntemde probleme yeni değişkenler eklenmediğinden dolayı, bağımsız değişkenleri içeren x vektörünün boyutunda herhangi bir değişiklik olmayacaktır. Bu nedenle yapay değişkenler kullanıldığında problemin çözüm süresinde meydana gelen artış, bu metot kullanıldığında gerçekleşmeyecektir.

BÖLÜM 3

ENERJİ SİSTEMLERİNDE OPTİMAL İŞLETİM PROBLEMLERİ

Günümüzde enerji ihtiyacının giderek artması, buna karşın fosil kaynak rezerv miktarlarının giderek azalması enerji üretim maliyetlerinde hızlı yükselişlere neden olmaktadır. Bu sebeple enerji ihtiyacının kesintisiz olarak en ucuz şekilde karşılanması için mevcut üretim birimlerinin hangi miktarda üretim yapacaklarının planlanması önem kazanmıştır. Yakıt maliyetinin en düşük değerde tutulmasını amaçlayan bu probleme, enerji sistemlerinde optimal işletim problemi adı verilebilir (Wood ve Wollenberg, 1996).

Bu bölümde enerji sistemlerinde optimal işletim problemlerinden bazılarına değinilecek, bu problemlerin matematiksel modelleri açıklanmaya çalışılacaktır. Ancak daha öncesinde bu modellerde yer alan elektriksel niceliklerin hesabında kullanılan güç akış denklemleri verilmesi faydalı olacaktır.

3.1 Güç Akış Denklemleri

Daha sonra anlatılacak optimal işletim problemlerinin matematiksel modellerinde yer alan; baralardan sisteme gönderilen net aktif ve reaktif güçler, iletim hatlarında taşınan aktif ve reaktif güçler ve sistemdeki kayıplar gibi elektriksel nicelikler, bara gerilim genliklerinin ve faz açılarının birer fonksiyonudur (Wood ve Wollenberg, 1996). O halde bu elektriksel nicelikler ile bara gerilim genlikleri ve faz açıları arasındaki matematiksel ilişkilerin açıklanması gerekmektedir.

i ve k baraları arasında yer alan iletim elemanını ele alırsak, baralardan sisteme enjekte edilen aktif ve reaktif güçler şu şekilde formüle edilebilir (Jegatheesan vd., 2008).

$$p_{ik} = U_i^2 \left(\frac{g_{ik}}{a_i^2} + g_{shi} \right) - \frac{U_i U_k}{a_i} \left[g_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + b_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) \right] \quad (3.1)$$

$$p_{ki} = U_k^2 (g_{ik} + g_{shk}) - \frac{U_i U_k}{a_i} \left[g_{ik} \cos(\delta_k - \delta_i) + b_{ik} \sin(\delta_k - \delta_i) \right] \quad (3.2)$$

$$q_{ik} = -U_i^2 \left(\frac{b_{ik}}{a_i^2} + b_{shi} \right) - \frac{U_i U_k}{a_i} \left[g_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - b_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) \right] \quad (3.3)$$

$$q_{ki} = -U_k^2 (b_{ik} + b_{shk}) - \frac{U_i U_k}{a_i} \left[g_{ik} \sin(\delta_k - \delta_i) - b_{ik} \cos(\delta_k - \delta_i) \right] \quad (3.4)$$

Burada U_i ve δ_i ; i barasının sırasıyla gerilim genliği ve faz açısı, $r_{ik} + jx_{ik}$; i ve k baraları arasında yer alan iletim hattının seri empedansı, $g_{ik} + jb_{ik}$ ise seri admitansdır. Bu empedans ve admitans değerleri arasında $g_{ik} + jb_{ik} = 1/(r_{ik} + jx_{ik})$ şeklinde tanımlanabilecek bir ilişki mevcuttur. $g_{shi} + jb_{shi}$ şönt admitans değeri, a_i ise, varsa, i barası tarafında nominal dışı çevirme oranına sahip bir trafoya ait nominal dışı çevirim oranıdır.

Denklem (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4)'de verilen güç akış denklemleri ile i barasından sisteme enjekte edilen net aktif ve reaktif güçler aşağıdaki eşitliklerdeki gibi hesaplanabilir.

$$P_i = \sum_{k \in N_{Bi}} p_{ik} \quad (3.5)$$

$$Q_i = \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik} \quad (3.6)$$

Her bir barada üretim tüketim dengesi mevcut olduğundan, sistemden her bir baraya giren toplam aktif ve reaktif güç akışı aynı baradan sisteme gönderilen toplam aktif ve reaktif güç akışına eşit olmalıdır. O halde i barası için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$P_{Gi} - P_{yük,i} - \sum_{k \in N_{Bi}} P_{ik} = 0 \quad (3.7)$$

$$Q_{Gi} - Q_{yük,i} - \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik} = 0 \quad (3.8)$$

Herhangi bir üretim birimi ya da yük bağlı olmayan baralarda üretim tüketim dengesi hesaplanırken, denklem (3.7) ve (3.8)'deki eşitliklerde mevcut olmayan bu güç üretim değerleri veya yük değerleri sıfır alınır. Denklem (3.7) ve (3.8)'deki eşitlikler yardımıyla i barasına bağlı birimin ürettiği aktif ve reaktif güç değerleri ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{Gi} = P_{yük,i} + \sum_{k \in N_{Bi}} P_{ik} \quad (3.9)$$

$$Q_{Gi} = Q_{yük,i} + \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik} \quad (3.10)$$

İletim hatlarında meydana gelen kayıpları ve sistemin toplam aktif güç kaybını ise şu şekilde hesaplamak mümkündür.

$$P_{ik} - P_{kayıp,ik} = -P_{ki} \quad (3.11)$$

$$P_{kayıp,ik} = P_{ik} + P_{ki} \quad (3.12)$$

$$P_{KAYIP} = \sum_{l \in L} P_{kayıp,l} = \sum_{i \in N} \sum_{k \in N, k \neq i} P_{ik} \quad (3.13)$$

Burada $p_{kayıp,i,k}$; i ve k baraları arasında yer alan iletim hattında meydana gelen termal kayıp, $p_{kayıp,l}$; l iletim hattında meydana gelen termal kayıp; P_{KAYIP} ise enerji sisteminin bütününde oluşan toplam kayıptır.

3.2 Optimal Güç Akış Problemi

Optimal güç akış problemi en temelde doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak tanımlanabilir. Problemin amacı enerji sisteminin enerji üretim maliyetinin, elektriksel ve fiziksel kısıtlar altında en küçük değerinin bulunmasıdır.

Bu problemde en küçük değeri bulunmaya çalışılan amaç fonksiyonu, bir işletim süresi boyunca sistemdeki bütün üretim birimlerinin yakıt maliyetlerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Bir birimin toplam yakıt maliyeti ise, bu birimin saat başı yakıt maliyet değeri ile üretim yaptığı sürenin saat cinsinden değerinin çarpımına eşittir. O halde k alt zaman aralığı boyunca çalışan i barasına bağlı bir birim için yakıt maliyeti $F_{Yakıt,i}$ aşağıdaki gibi verilebilir.

$$F_{Yakıt,i} = t_k \times F_i \quad (R) \quad (3.14)$$

Burada R ; hayali para birimi, t_k ; k alt zaman aralığının saat cinsinden süresi, F_i ; i barasına bağlı üretim biriminin saat başı yakıt maliyetidir. F_i , saat başına yakıt maliyeti ilgili birimin aktif güç üretim değerinin bir fonksiyonu olup genellikle ikinci dereceden bir fonksiyonla gösterilmektedir. Bu durumda F_i şu şekilde ifade edilir (Abido, 2002).

$$F_i = F_i(P_{Gi}) = b_i + c_i P_{Gi} + d_i P_{Gi}^2 \quad (3.15)$$

Burada P_{Gi} ; i barasına bağılı birimin aktif güç üretim değeri, b_i , c_i ve d_i ise sabitlerdir. Çok vanalı buhar tribünlerinden oluşan termik üretim birimleri için maliyet fonksiyonu konveks olmayan bir fonksiyon ile tanımlanmaktadır. Bu üretim birimleri için kullanılan maliyet fonksiyonu sinüzoidal dalgalanmalar içermektedir. Bu dalgalanmalara “Valf Nokta Etkisi” adı verilmektedir. Daha gerçekçi çözümlere ulaşmak için bu tür sistemlerde çözüm yapılırken valf nokta etkisi de probleme dahil edilmelidir. Valf nokta etkisi de göz önüne alındığında F_i şu şekilde ifade edilir (Abido, 2002).

$$F_i(P_{Gi}) = b_i + c_i P_{Gi} + d_i P_{Gi}^2 + e_i \left| \sin \left(g_i (P_{Gi}^{min} - P_{Gi}) \right) \right| \quad (3.16)$$

Burada P_{Gi}^{min} ; i barasına bağılı termik birimin aktif güç alt üretim sınırı, b_i , c_i , d_i , e_i ve g_i ise sabitlerdir.

Optimal güç akış problemine çözüm aranırken, enerji sistemindeki bütün aktif ve reaktif güçler, iletim hatlarındaki kayıplar da dahil olacak şekilde, üretim birimleri tarafından kesintisiz olarak karşılanmalıdır. Bunun için sistemdeki her bir barada, sistemden bu baraya giren toplam aktif ve reaktif güç akışı aynı baradan sisteme gönderilen toplam aktif ve reaktif güç akışına eşit olmalıdır.

Ayrıca her bir enerji üretim biriminin aktif ve reaktif güç üretimi için birer alt ve üst üretim sınırı mevcuttur. Bu nedenle sistemdeki üretim tüketim dengesi sağlanırken üretim birimlerinin çıkış güçleri bu alt ve üst sınırlar arasında yer almalıdır.

Bununla beraber sistemdeki iletim hatları da belirli bir aktif güç taşıma kapasitesine sahiptir. Eğer bir iletim hattının taşıma kapasitesi aşılacak olursa, bu hat artık fiziksel olarak devre dışı kalacak ve bu hattın taşınması gereken güç diğer iletim hatları tarafından taşınacaktır. Bu durumda diğer hatlar için taşıma kapasitesini aşma tehlikesi doğacak ve dolayısıyla sistemdeki diğer hatların devre dışı kalma riski ortaya çıkacaktır. Görüldüğü üzere bir hattın devre dışı kalması diğer bir hattın aşırı

yüklenmesine sebep olabilir ve bu birbirini tetikleme olayı enerji sistemin tamamen çökmesine sebebiyet verebilir. Bu nedenle hatlarda taşınan güçler, iletim hatlarının sahip olduğu taşıma kapasitesinin üzerine çıkmamalıdır (Wood ve Wollenberg, 1996). Ayrıca sistemde nominal dışı çevirme oranına sahip trafolar mevcut ise, bu trafoya ait nominal dışı çevirim oranının da belli sınırlar dışına çıkmaması gerekmektedir.

Bütün bu kısıtlara ek olarak, sistemden enerji talebinde bulunan kullanıcıların, kesintisiz ve güvenli bir şekilde bu ihtiyaçlarını karşılayabilmeleri için bara gerilim genlikleri belirli sınırlar arasında kalmalıdır.

Yukarıda açıklanan kısıtlar doğrultusunda, optimal güç akış problemi matematiksel olarak aşağıdaki gibi formüle edilebilir;

$$P_{Gi} - P_{yük,i} - \sum_{j \in N_{Bi}} p_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.17)$$

$$Q_{Gi} - Q_{yük,i} - \sum_{j \in N_{Bi}} q_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.18)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (3.19)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_G \quad (3.20)$$

$$-p_l^{max} \leq p_l \leq p_l^{max}, \quad l \in L \quad (3.21)$$

$$a_i^{min} \leq a_i \leq a_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_{tap} \quad (3.22)$$

$$U_i^{min} \leq U_i \leq U_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad i \neq ref \quad (3.23)$$

$$kısıtları \text{ altında enk } F_T = \sum_{i \in N_G} F_i(P_{Gi}) \quad (3.24)$$

Burada P_{Gi} ve Q_{Gi} ; i barasına bağlı birimin, sırasıyla, aktif ve reaktif güç üretim değeri, N_G ; tüm üretim birimlerinin bağlı olduğu baraları içeren set, $P_{Yük,i}$ ve $Q_{Yük,i}$; i barasına bağlı, sırasıyla, aktif ve reaktif yük değerleri, p_{ij} ve q_{ij} ; i ve j baraları arasına bağlı olan hat üzerinden i barasından j barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin i barası sınırındaki değerleri, N_{Bi} ; i barasına bir iletim hattı ile doğrudan bağlı baraları içeren set, N ; enerji sistemindeki tüm baraları içeren set, P_{Gi}^{\min} ve P_{Gi}^{\max} ; i barasına bağlı termik birimin, sırasıyla, aktif güç alt ve üst üretim sınırları, Q_{Gi}^{\min} ve Q_{Gi}^{\max} ; i barasına bağlı termik birimin, sırasıyla, reaktif güç alt ve üst üretim sınırları, p_l ; l . iletim hattından akan aktif güç, p_l^{\max} ; l . iletim hattının aktif güç taşıma kapasitesi, L ; sistemdeki tüm iletim hatlarını içeren set, a_i ; i ve j baraları arasına bağlı olan hattın i . bara tarafına nominal dışı çevirme oranına sahip bir trafonun bağlı olması durumunda, bu trafoya ait nominal dışı çevirim oranı, a_i^{\min} ve a_i^{\max} ; nominal dışı çevirme oranına sahip trafoya ait nominal dışı çevirim oranının, sırasıyla, alt ve üst sınırları, N_a ; sistemdeki tüm nominal dışı çevrim oranına sahip trafoların bağlı olduğu baraları içeren set, U_i ; i barasının gerilim genliği, U_i^{\min} ve U_i^{\max} ; i barasının gerilim genliğinin, sırasıyla, alt ve üst sınırlarıdır.

3.3 Ham Enerji Kaynağı Kısıtlı Termik Birimler İçeren Sistemlerde Optimal Güç Dağıtım Problemi

Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde optimal güç dağıtım problemi bir günden bir haftaya kadar olan işletim süresini kapsamaktadır. Problemden ele alınan işletim süresi, alt zaman aralıklarına bölünmüş ve her bir alt zaman aralığında aktif ve reaktif yüklerin sabit kaldığı varsayılmıştır. İşletim süresi zarfında toplam termal maliyet minimum düzeye çekilirken, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimlerin anlaşma gereği satın alınan miktarda yakıt harcaması da sağlanmaya çalışılmaktadır (Fadıl ve Yaşar, 2002).

Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimleri işleten şirketler kendilerine gerekli yakıtı, yakıt sağlayacak şirketlerden belirli antlaşmalarla temin etmektedirler. Tüketicinin yakıt sağlayıcı şirketlerden, ne olursa olsun, önceden belirlenmiş miktarda yakıt alacağını taahhüt ettiği antlaşmalara “ya al ya da öde” antlaşmaları adı verilir.

Ya al ya da öde anlaşması gereği enerji birimlerini işleten şirket, yakıt sağlayan şirketten belirli bir işletim zaman süresi için, anlaşmada belirlenen yakıt miktarından daha az yakıt almayacağını garanti etmektedir (Fadıl ve Yaşar, 2002). Belirlenen miktardan daha az yakıt alınması durumunda, tüketici tarafından yakıtı satan şirkete belirlenen alt sınırdaki yakıt almış gibi ödeme yapılmaktadır. Başka bir deyişle kullanılmamış yakıt miktarı için de ödeme yapılmış olacaktır. Bu durumda sistemdeki toplam termik maliyette de artış gerçekleşecektir. Böyle bir işletim noktasında toplam yakıt maliyetini düşürmek için ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin güç üretimlerinin, bu birimlerin toplam yakıt tüketimlerinin, anlaşmada belirlenen en az tüketim değerine eşit olacağı şekilde yeniden planlanması gerekmektedir.

Bir birimin yakıt tüketimi, bu birimin aktif güç üretim değerlerinin bir fonksiyonudur. i barasına bağlı bir birimim j alt zaman aralığı boyunca saat başı maliyeti, $F_{i,j}$, denklem (3.16)'da verildiği gibi konveks olmayan bir fonksiyon olsun. O halde $F_{i,j}$;

$$F_{i,j} = b_i + c_i P_{Gi,j} + d_i P_{Gi,j}^2 + e_i \left| \sin \left(g_i \left(P_{Gi}^{min} - P_{Gi,j} \right) \right) \right| \quad (R/h) \quad (3.25)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $P_{Gi,j}$; i barasına bağlı üretim biriminin j alt zaman aralığı boyunca aktif güç üretim değeridir. Bu birimin kullandığı yakıtın birim hacim fiyatı, $FP (R/ccf)$, bilindiğine göre, bu birimin j alt zaman aralığında tükettiği saat başı yakıt miktarı $C_{Ti,j} (ccf/h)$ şöyle hesaplanabilir.

$$C_{Ti,j} = C_{Ti,j}(P_{Gi,j}) = (1/FP) \times F_{i,j} \quad (ccf/h) \quad (3.26)$$

j işletim süresi boyunca harcanacak toplam yakıt miktarı ise aşağıdaki gibidir.

$$C_{T,j} = \sum_{i \in N_T} t_j \times C_{Ti,j} \quad (ccf) \quad (3.27)$$

Burada N_T ; ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin bağlı olduğu baraları içeren settir.

Ya al ya da öde türü yakıt antlaşmasına sahip ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde optimal güç dağıtım problemi, matematiksel olarak şu şekilde formüle edilebilir.

$$P_{Gi,j} - P_{yük\ i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} p_{ik,j} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.28)$$

$$Q_{Gi,j} - Q_{yük\ i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik,j} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.29)$$

$$\sum_{j=1}^{j_{max}} t_j \sum_{T \in N_T} C_{T,j}(P_{GT,j}) - C_{TOT} = 0 \quad (3.30)$$

$$P_{Gs}^{min} \leq P_{Gs,j} \leq P_{Gs}^{max}, \quad s \in N_s, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.31)$$

$$P_{GT}^{min} \leq P_{GT,j} \leq P_{GT}^{max}, \quad T \in N_T, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.32)$$

$$Q_{Gs}^{min} \leq Q_{Gs,j} \leq Q_{Gs}^{max}, \quad s \in N_s, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.33)$$

$$Q_{GT}^{min} \leq Q_{GT,j} \leq Q_{GT}^{max}, \quad T \in N_T, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.34)$$

$$p_{l,j} \leq p_l^{max}, \quad l \in L, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.35)$$

$$a_i^{min} \leq a_{i,j} \leq a_i^{max}, \quad i \in N_{tap}, \quad j=1, \dots, j_{max} \quad (3.36)$$

$$U_i^{min} \leq U_{i,j} \leq U_i^{max}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad i \neq ref, \quad j=1, \dots, j_{max} \quad (3.37)$$

$$kısıtları \text{ altında enk } F_{TOT} = \sum_{j=1}^{j_{max}} \left(\sum_{s \in N_s} F_s(P_{Gs,j}) + \sum_{T \in N_T} F_T(P_{GT,j}) \right) t_j \quad (3.38)$$

Burada F_S ve F_T ; sırasıyla, normal yakıtlı termik birimlerin ve ham enerji kaynak kısıtlı birimlerin saat başı yakıt maliyetleri, N_S ve N_T ; sırasıyla, normal yakıtlı termik birimlerin ve ham enerji kaynak kısıtlı birimlerin bağlı olduğu baraları içeren setler, j_{max} ; işletim süresinin sahip olduğu toplam alt zaman aralığı sayısı, $P_{Gi,j}$ ve $Q_{Gi,j}$; i barasına bağlı birimin j alt zaman aralığında, sırasıyla, aktif ve reaktif güç üretim değeri, $P_{yük i,j}$ ve $Q_{yük i,j}$; j alt zaman aralığında i barasına bağlı, sırasıyla, aktif ve reaktif yük değerleri, $p_{ik,j}$ ve $q_{ik,j}$; j alt zaman aralığında i ve k baraları arasında bağlı olan hat üzerinden i barasından k barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin i barası sınırındaki değerleri, C_{TOT} ; ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin tüketmek zorunda olduğu, ya al ya da öde antlaşmasında belirlenmiş en az yakıt miktarı, $p_{l,j}$; l . iletim hattından j alt zaman aralığında akan aktif güç, $a_{i,j}$; i ve k baraları arasında bağlı olan hattın i . bara tarafına nominal dışı çevirme oranına sahip bir trafonun bağlı olması durumunda, bu trafoya ait nominal dışı çevirim oranının j alt zaman aralığındaki değeri, $U_{i,j}$; j alt zaman aralığında i barasının gerilim genliğidir.

3.4 Çevresel / Ekonomik Optimal Güç Dağıtım Problemi

Temel enerji kaynağı olarak fosil yakıt kullanan üretim birimleri, enerji üretirken karbondioksit (CO_2), kükürt dioksit (SO_2) ve azot oksit (NO_x) içeren gaz ve kül parçacıkları da üretmektedirler. Bu salınım (emission) miktarlarının aşırı olarak

artması, geri dönülemez öldürücü çevresel etkilere yol açmaktadır. Oluşan bu kirlilik insanların yanı sıra diğer canlıları ve bitkileri de etkilemektedir. Ayrıca artan bu salınım miktarlarının küresel ısınmanın başlıca nedenlerinden biri olduğu da bilinmektedir. Bu sebeplerle en küçük yakıt maliyeti hesaplanırken fosil yakıtlı üretim birimlerinin yol açtığı çevre kirliliğinin de göz önüne alınması kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir (Abido, 2009).

Yalnızca enerji üretim maliyetinin en küçük eğerinin arandığı geleneksel optimal güç dağıtım probleminin çözümüyle elde edilen sonuçlar, çevresel kriterler dikkate alındığında en iyi sonuçlar olarak değerlendirilmeyebilir. Çünkü, çevrenin temiz tutulabilmesi için üretim birimleri tarafından üretilen emisyon miktarı azaltılmak zorundadır. Emisyon miktarını azaltmak için mevcut güç dağıtımının yeniden hesaplanması yoluna gidilebilir. Bu yaklaşımın ana fikri, toplam emisyonu düşürmek için daha az emisyon üreten birimleri daha fazla kullanmak üzerine kuruludur (Abido, 2009).

Yukarıda anlatıldığı gibi, hem yakıt maliyetinin hem de emisyon miktarının birlikte minimize edilmek istendiği bu tür problemlere “Çevresel / Ekonomik Optimal Güç Dağıtım Problemi” adı verilmektedir. Çevresel / ekonomik optimal güç dağıtım problemi çok amaçlı bir optimizasyon problemidir. Problemin çözümü, sistem kısıtları altında ağırlıklı toplamla birleştirilmiş amaç fonksiyonunun (toplam yakıt maliyet ve toplam emisyon miktarı) minimize edilmesi şekliyle bulunur. Bahsi geçen ağırlıklı toplamla birleştirilmiş amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Abido, 2009).

$$F_{TOT} = wF_{tot} + \xi(1-w)E_{tot} \quad (R), \quad 0 \leq w \leq 1 \quad (3.39)$$

Burada ξ (R/kg) olarak emisyon maliyeti, w ise $0 \leq w \leq 1$ şeklinde değişen ağırlık faktörüdür. $w=1$ değeri sadece termik maliyetin, $w=0$ değeri ise sadece NO_x emisyon miktarının göz önüne alındığı durumlara karşılık gelmektedir. Denklem (3.39)'da verilen ağırlıklı toplamla birleştirilmiş amaç fonksiyonunda yer alan toplam

yakıt maliyeti F_{tot} , ve toplam NO_x emisyon miktarı E_{tot} , aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Abido, 2009).

$$F_{tot} = \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{i \in \{N_s, N_T\}} F_i(P_{Gi,j}) t_j \quad (R) \quad (3.40)$$

$$E_{tot} = \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{i \in \{N_s, N_T\}} E_i(P_{Gi,j}) t_j \quad (kg) \quad (3.41)$$

Ayrıca i birimin j alt zaman aralığında (kg/h) cinsinden emisyon miktarı, $E_i(P_{Gi,j})$, aşağıdaki fonksiyon ile hesaplanmaktadır (Abido, 2009).

$$E_i(P_{Gi,j}) = 10^{-2} [\alpha_i + \beta_i P_{Gi,j} + \gamma_i P_{Gi,j}^2] + \zeta_i e^{(\lambda_i P_{Gi,j})} \quad (kg/h) \quad (3.42)$$

Burada α_i , β_i , γ_i , ζ_i ve λ_i sabitlerdir.

Genellikle bu tür çok amaçlı optimizasyon problemlerinde bir tek çözüm yoktur, fakat alternatif çözümler kümesi vardır. Bu alternatif çözümler kümesinin elemanları için bütün amaçlar düşünüldüğünde hiçbirinin diğerine göre daha iyi çözüm olduğu söylenemez. Bu tür çözümlere “Pareto - Optimal” çözümler denir (Abido, 2009). Çevresel / ekonomik güç dağıtım probleminde pareto - optimal çözüm kümesi, denklem (3.39)'da verilen w ağırlık faktörünün belirlenen her bir değeri için güç dağıtım probleminin çözülmesiyle elde edilir.

Çevresel / ekonomik optimal güç dağıtım problemini matematiksel olarak şu şekilde modellemek mümkündür.

$$P_{Gi,j} - P_{yük\ i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} P_{ik,j} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} \quad (3.43)$$

$$Q_{Gi,j} - Q_{yük i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik,j} = 0 \quad i=1,2,\dots,N, \quad j=1,2,\dots,j_{max} \quad (3.44)$$

$$P_{Gs}^{min} \leq P_{Gs,j} \leq P_{Gs}^{max} \quad s \in N_s, \quad j=1,2,\dots,j_{max} \quad (3.45)$$

$$Q_{Gs}^{min} \leq Q_{Gs,j} \leq Q_{Gs}^{max} \quad s \in N_s, \quad j=1,2,\dots,j_{max} \quad (3.46)$$

$$P_{GT}^{min} \leq P_{GT,j} \leq P_{GT}^{max} \quad T \in N_T, \quad j=1,2,\dots,j_{max} \quad (3.47)$$

$$Q_{GT}^{min} \leq Q_{GT,j} \leq Q_{GT}^{max} \quad T \in N_T, \quad j=1,2,\dots,j_{max} \quad (3.48)$$

$$p_{l,j} \leq p_l^{max}, \quad l \in L, \quad j=1,2,\dots,j_{max} \quad (3.49)$$

$$a_i^{min} \leq a_{i,j} \leq a_i^{max}, \quad i \in N_{tap}, \quad j=1,\dots,j_{max} \quad (3.50)$$

$$U_i^{min} \leq U_{i,j} \leq U_i^{max}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad i \neq ref, \quad j=1,\dots,j_{max} \quad (3.51)$$

$$kısıtları altında enk \quad F_{TOT} = wF_{tot} + \xi(1-w)E_{tot} \quad (R), \quad 0 \leq w \leq 1 \quad (3.52)$$

3.5 Pompayla Doldurmalı Birim İçeren Elektrik Enerji Sistemlerinde Optimal Güç Dağıtım Problemi

Termik birimler genellikle yük değişimlerine kolayca uyum sağlayamamaları nedeniyle daha çok temel yükte, hidroelektrik santraller ise kolayca işletilip durdurulabilen ve aynı zamanda kısa bir sürede tam kapasite yüke ulaşmada uyum sağlayabilmeleri nedeni ile tepe yükün karşılanmasında kullanılmaktadır. Tepe yük talebinin karşılanmasında kullanılan hidroelektrik santrallerin bir çeşidi de pompayla doldurmalı santrallerdir. Bu santrallerin amacı güç talebinin düşük olduğu durumlarda

suyu yüksekte bir haznede depolamak ve tepe yük talebinin gerçekleştiği zamanlarda biriktirilen suyla hidroelektrik enerji elde etmektir (Fadıl ve Yaşar, 2000).

Pompayla doldurmalı bir birimin, enerji üretirken rezervuardan saldığı, q_{GH} , ve rezervuar hacmini doldurmak için rezervuara pompaladığı su miktarları q_{PH} , sırasıyla, üretilen ve pompalamak için harcanan güçlerin fonksiyon olarak ifade edilebilir. j alt zaman aralığı boyunca salınan ve pompalan su miktarlarını aşağıdaki gibi ifade etmek mümkündür.

$$q_{GH}(P_{GH,j}) = \begin{cases} m + nP_{GH,j}, (ccf / h) & \text{eğer } 0 < P_{GH,j} \leq P_{GH}^{\max} \\ 0 & \text{eğer } P_{GH,j} = 0 \end{cases} \quad (3.53)$$

$$q_{PH}(|P_{PH,j}|) = \begin{cases} r + s|P_{PH,j}|, (ccf / h) & \text{eğer } 0 < |P_{PH,j}| \leq P_{PH}^{\max} \\ 0 & \text{eğer } |P_{PH,j}| = 0 \end{cases} \quad (3.54)$$

Burada $P_{GH,j}$; j alt zaman aralığında pompayla doldurmalı birimin aktif güç üretim değeri, P_{GH}^{\max} ; pompayla doldurmalı birimin aktif güç üretim üst sınırı; $P_{PH,j}$; j alt zaman aralığında pompayla doldurmalı birimin rezervuara su pompalamak için harcadığı güç değeri, P_{PH}^{\max} ; pompayla doldurmalı birimin rezervuara su pompalamak için harcayabileceği en yüksek güç değeri, m , n , r ve s ise sabitlerdir.

Pompayla doldurmalı bir birim pompalama modunda çalışırken rezervuara su pompalamak için, rezervuara doldurulacak su miktarı ile orantılı bir miktarda güç harcayacaktır. Bu durumda pompayla doldurmalı birim enerji üretmek yerine enerji harcadığından, bağlı olduğu barada bir aktif yük gibi düşünülebilir. O halde P_{PH} hesaplamalarda negatif bir değer olarak bulunacaktır. Bu sebeple rezervuara pompalanan su miktarı q_{PH} hesaplanırken pompalama gücü denklem (3.54)'de $|P_{PH,j}|$ şeklinde mutlak değer içinde kullanılmıştır.

Pompayla doldurmalı birimler rezervuarlarının büyüklüğüne ve işletme politikasına göre günlük, haftalık veya sezonluk biriktirme yapabilmektedir. İşletim süresi ne olursa olsun, pompayla doldurmalı birimin rezervuarındaki başlangıç ve bitiş su hacimleri birbirine eşit olması gerektiğinden, bu birimin net harcayacağı su miktarı sıfır olmalıdır. Başka bir deyişle üretim için harcanan toplam su miktarı pompalanan toplam su miktarına eşit olmalıdır (Fadıl ve Yaşar, 2000).

$$q_{Harc,Top} - q_{Pomp,Top} = q_{Harc,Net} = 0 \quad (3.55)$$

Burada

$$q_{Harc,Top} = \sum_{j \in j_{Gen}} q_{GH} (P_{GH,j}) t_j \quad (3.56)$$

$$q_{Pomp,Top} = \sum_{j \in j_{Pomp}} q_{PH} (|P_{PH,j}|) t_j \quad (3.57)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $q_{Harc,Top}$; tüm işletim süresi boyunca, pompayla doldurmalı birimin enerji üretmek için rezervuardan aldığı toplam su miktarı, $q_{Pomp,Top}$; tüm işletim süresi boyunca, pompayla doldurmalı birimin rezervuara pompaladığı toplam su miktarı, $q_{Harc,Net}$; tüm işletim süresi boyunca, pompayla doldurmalı birimin rezervuardan aldığı net su miktarı, j_{Gen} ; pompayla doldurmalı birimin enerji ürettiği alt zaman aralığı içeren set, j_{Pomp} ; pompayla doldurmalı birimin rezervuara su pompaladığı alt zaman aralığı içeren settir.

Bu tür birimlerin rezervuarları, daha fazla su doldurulamayacak bir üst sınır ile daha az su bırakılamayacak bir alt sınıra sahiptir. Çalışma süresi boyunca pompayla doldurmalı birimlerde suyun harcanması ve pompalanması gerçekleştirilirken, rezervuar hacmi bu alt ve üst sınırlar arasında kalmalıdır. Bu rezervuar hacminin alt ve üst sınırları, denklem (3.53) ve (3.54)'de görüleceği üzere, pompayla doldurmalı birimin

güç üretim değerini de sınırlayacaktır. j alt zaman aralığı sonundaki rezervuar hacmi, V_j , şöyle ifade edilebilir (Fadıl ve Yaşar, 2000).

$$V_j = \begin{cases} V_{j-1} + q_{PH} (|P_{PH,j}|) t_j & \text{eğer } j \in j_{Pomp} \\ V_{j-1} - q_{GH} (P_{GH,j}) t_j & \text{eğer } j \in j_{Gen} \end{cases} \quad (3.58)$$

$$V^{\min} \leq V_j \leq V^{\max}, \quad j = 1, \dots, j_{\max} \quad (3.59)$$

Burada V^{\min} ve V^{\max} ; rezervuar hacminin, sırasıyla, alt ve üst sınır değerleridir.

Bir pompayla doldurmalı birim için, q hacmindeki suyun harcanmasıyla üretilen gücün, aynı q hacmindeki suyun rezervuara pompalanması için gereken güce oranına bu birimin çevrim verimi (cycle efficiency), η , denir ve tanımlanan bu verim birden küçük bir değere sahiptir. Dolayısıyla harcanan suyu tekrar depolamak için, üretilenden daha fazla miktarda güç gerekmektedir. Bu sebeple, yük değerlerine de bağlı olarak, pompayla doldurmalı birimler devreye alındıklarında her zaman toplam yakıt maliyetini düşürmeyebilirler (Wood ve Wollenberg, 1996).

Pompayla doldurmalı birim içeren bir enerji sisteminde, pompayla doldurmalı hidrolik birimin optimal çalışma programının belirlenmesi matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{Gi,j} - P_{yük i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} p_{ik,j} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, j_{\max} \quad (3.60)$$

$$Q_{Gi,j} - Q_{yük i,j} - \sum_{k \in N_{Bi}} q_{ik,j} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, j_{\max} \quad (3.61)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi,j} \leq P_{Gi}^{\max}, \quad i \in N, \quad j = 1, 2, \dots, j_{\max} \quad (3.62)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi,j} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i \in N, \quad j=1,2,\dots, j_{max} \quad (3.63)$$

$$p_{l,j} \leq p_l^{max}, \quad l \in L, \quad j=1,2,\dots, j_{max} \quad (3.64)$$

$$U_i^{min} \leq U_{i,j} \leq U_i^{max}, \quad i=1,2,\dots, N, \quad i \neq ref, \quad j=1,\dots, j_{max} \quad (3.65)$$

$$a_i^{min} \leq a_{i,j} \leq a_i^{max}, \quad i \in N_{tap}, \quad j=1,\dots, j_{max} \quad (3.66)$$

$$V^{min} \leq V_j \leq V^{max}, \quad j=1,\dots, j_{max} \quad (3.67)$$

$$V_j = V_{j-1} + q_{PH} \left(|P_{PH,j}| \right) t_j \quad eğer j \in j_{pomp} \quad (3.68)$$

$$V_j = V_{j-1} - q_{GH} \left(P_{GH,j} \right) t_j \quad eğer j \in j_{gen} \quad (3.69)$$

$$V_0 = V_{j_{max}} = V^{başlangıç} = V^{son} \quad (3.70)$$

$$q_{Harc,Net} = 0 \quad (3.71)$$

$$kısıtları altında enk \quad F_T = \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_{i \in N_s} F_i(P_{Gi,j}) t_j \quad (3.72)$$

BÖLÜM 4

UYGULAMA VE HESAPSAL SONUÇLAR

Bu bölümde, Bölüm 3’de tanımlanan ve matematiksel modelleri verilmiş olan optimal enerji sistemi işletim problemleri F-MSG algoritması kullanılarak çözülmüş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Takip eden tüm çözümlerde, bara gerilim genlikleri ve faz açıları ile, varsa, trafolarla ait nominal dışı çevirim oranları, denklem (2.1) de yer alan bağımsız değişken seti \mathbf{x} vektörünün elemanları olarak alınmıştır.

$$\mathbf{x} = \left[U_1, U_2, \dots, U_{N-1}, U_N, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{N-1}, \delta_N, a_1, a_2, \dots, a_{N_{tap}-1}, a_{N_{tap}} \right] \quad (4.1)$$

Ancak salınım barasının gerilim genliği ve faz açısının bağımsız değişken olmadığı, bu sebeple \mathbf{x} vektörüne dahil edilmediği, ve önceden belirlenmiş değerlerde sabit tutulacağı unutulmamalıdır.

Her problemin çözümünde, Bölüm 2’de anlatıldığı üzere ilk dış döngüde uygun olup olmadığı kontrol edilecek H_1 değeri seçilirken şu yol izlenmiştir; öncelikle başlangıç noktası olarak seçilmiş aktif güç üretim değerleri için denklem (3.15) veya (3.16) kullanılarak toplam yakıt maliyeti F_T^0 hesaplanmış, sonrasında $H_1 \leq F_T^0$ sağlayacak bir H_1 değeri seçilmiştir.

Bütün uygulamalarda, F-MSG algoritmasının 3.Adımında denklem (2.5)’de verilen KSP probleminin çözümü ise, aşağıda verilmiş olan problemin çözülmesi ile gerçekleştirilmiştir (Kasimbeyli vd., 2009).

$$\begin{aligned}
L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) - H_n &\leq 0 \\
\mathbf{x} &\in K \\
\text{kısıtları altında enk } r &= 0
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Burada r hayali bir amaç fonksiyonu olup sıfır veya herhangi bir sabit sayı olarak alınabilir (Kasimbeyli vd., 2009). Verilen bu problem için elde edilen sonuçlar $L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, c) - H_n \leq 0$ eşitsizliğini sağlamakta ve dolayısıyla F-MSG algoritmasının 3.Adımındaki KSP probleminin de birer çözümü olmaktadır.

4.1 F-MSG Algoritması Kullanılarak Optimal Güç Akış Probleminin Çözülmesi

F-MSG algoritması kullanılarak optimal güç akış probleminin çözümünde, 6 üretim birimi ve 41 iletim hattı içeren IEEE 30 baralı test sistemi kullanılmıştır. Sistemin tek hat diagramı Ek.1'de, hat parametreleri, hatların taşıma kapasiteleri Ek.2'de, baralara bağlı yük değerleri Ek.3'de verilmiştir. Kullanılan test sisteminde 1 nolu bara referans barası olarak seçilmiş ve bu baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, $1.05 pu$ ve $0 rad$ olarak alınmıştır. Diğer tüm baralar için bara gerilim genliği alt sınırı $0.95 pu$, bara gerilim genliği üst sınırı ise yük bağlı baralar için $1.05 pu$ ve üretim baraları için $1.10 pu$ seçilmiştir. Trafolarla ait nominal dışı çevirim oranları için alt ve üst sınırlar ise 0.90 ve 1.10 kabul edilmiştir (Sayah ve Zehar, 2008).

Algoritmada kullanılacak parametreler ise $\alpha = 1$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_2 = 0.05$, $\Delta_1 = 50 R/h$ ve $M = 5000$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise $c_1^1 = 10$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0, 0, \dots, 0, 0]_{(1 \times 13)}$ seçilmiştir. Algoritmanın 3.Adımında iç döngüde iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu ise; $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

F-MSG algoritmasının Bölüm 2'de anlatılan adımlarının kodlanması ve (2.5) deki KSP'nin çözümünde MATLAB programı kullanılmıştır.

4.1.1 Konveks maliyet fonksiyonlarına sahip üretim birimleri içeren sistemlerde optimal güç akış probleminin F-MSG algoritması ile çözümü

Bu bölümde sistemdeki üretim birimlerin saat başı maliyet fonksiyonları denklem (3.15)'de verildiği gibi ikinci dereceden polinomlar olarak alınmıştır. Üretim birimlerinin alt ve üst üretim sınırları ile maliyet fonksiyonu sabitleri Çizelge 4.1' de verilmiştir (Sayah ve Zehar, 2008). Başlangıç güç üretim değerleri ise Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. IEEE 30 baralı test sistemi için üretim birimlerinin alt ve üst üretim sınırları ile konveks maliyet fonksiyonu sabitleri.

<i>Bara No (i)</i>	P_{Gi}^{max} (MW)	P_{Gi}^{min} (MW)	Q_{Gi}^{max} (MVar)	Q_{Gi}^{min} (MVar)	b_i	c_i	d_i
1	200	50	200	-20	0	2.00	0.00375
2	80	20	100	-20	0	1.75	0.01750
5	50	15	80	-15	0	1.00	0.06250
8	35	10	60	-15	0	3.25	0.00834
11	30	10	50	-10	0	3.00	0.02500
13	40	12	60	-15	0	3.00	0.02500

Çizelge 4.2'de verilen başlangıç güç üretim değerleri için güç akış analizi yapılarak, başlangıç bara gerilim genliği ve bara faz açıları bulunmuştur. Daha sonra F-MSG algoritması probleme uygulanmış, sonuç olarak en küçük maliyet değeri 803.1200 R/h olarak bulunmuştur. Çözüm noktasında birimlerin aktif ve reaktif güç üretim değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.3'de ise, F-MSG algoritması ile elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan diğer çözümler ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'de kullanılan kısaltmalardan TS; Tabu Arama (Abido, 2002), MDEA; Modifiye Edilmiş Diferansiyel Evrim Algoritması (Samir ve Zehar, 2008), RGA; Geliştirilmiş Genetik Algoritma (Paranjothi ve Anburaja, 2002) ile yapılan çözümleri ifade etmektedir. Görüleceği üzere F-MSG algoritması ile literatürdeki diğer çözümlere benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Optimal güç akış probleminde kullanılan başlangıç noktası ve elde edilen çözümler için güç üretim değerleri.

	<i>Başlangıç Noktası</i>	<i>Kısım 5.1.1</i>	<i>Kısım 5.1.2</i>	<i>Kısım 5.1.3</i>
$P_{G1} (MW)$	77.8973	169.3485	154.5093	191.5600
$Q_{G1} (MVar)$	-3.87	-1.2450	-3.5703	14.1873
$P_{G2} (MW)$	80.00	48.5986	40.0012	39.5893
$Q_{G2} (MVar)$	35.00	26.9990	34.0115	30.3721
$P_{G5} (MW)$	50.00	21.3490	25.7981	22.2150
$Q_{G5} (MVar)$	15.00	27.8731	18.9309	18.7189
$P_{G8} (MW)$	10.00	26.1178	32.5704	15.4250
$Q_{G8} (MVar)$	20.00	30.3209	22.1366	21.9273
$P_{G11} (MW)$	30.00	13.7576	19.3839	12.2392
$Q_{G11} (MVar)$	15.00	11.4726	18.0636	17.3531
$P_{G13} (MW)$	40.00	13.2351	18.5992	12.9228
$Q_{G13} (MVar)$	8.00	9.9127	10.7156	9.4544
$p_{12} (MW)$	45.3433	113.5813	105.0001	129.9978
$P_{Kayıp} (MW)$	4.5685	9.0406	7.6136	10.6642
$F_T (R/h)$	939.0884	803.1200	810.6338	929.1516

Çizelge 4.3. Optimal güç akış problemi için elde edilen en küçük yakıt maliyetinin, literatürdeki diğer sonuçlar ile karşılaştırılması

Metod	F-MSG	TS	MDEA	RGA
Optimal Yakıt Maliyeti (R/h)	803.12	802.29	802.376	804.019

Bulunan optimal çözüm noktasındaki bara gerilim genlikleri ve faz açıları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Optimal güç akış probleminde kullanılan başlangıç noktası ve elde edilen optimum çalışma noktaları için bara gerilim genlikleri ve faz açıları.

Bara No (i)	Başlangıç Noktası		Kısım 5.1.1		Kısım 5.1.2		Kısım 5.1.3	
	U_i (pu)	δ_i (rad)	U_i (pu)	δ_i (rad)	U_i (pu)	δ_i (rad)	U_i (pu)	δ_i (rad)
1	1.050	0	1.050	0	1.050	0	1.050	0
2	1.045	-0.025	1.033	-0.061	1.035	-0.056	1.025	-0.068
3	1.026	-0.053	1.017	-0.094	1.020	-0.083	1.007	-0.103
4	1.020	-0.063	1.009	-0.112	1.013	-0.099	0.996	-0.123
5	1.010	-0.101	1.002	-0.177	0.997	-0.160	0.981	-0.187
6	1.016	-0.078	1.006	-0.131	1.008	-0.115	0.990	-0.145
7	1.005	-0.097	0.996	-0.160	0.996	-0.143	0.978	-0.172
8	1.010	-0.085	1.005	-0.134	1.006	-0.115	0.986	-0.151
9	1.054	-0.083	1.046	-0.165	1.049	-0.140	1.049	-0.180
10	1.048	-0.116	1.041	-0.196	1.043	-0.173	1.042	-0.211
11	1.082	-0.028	1.068	-0.139	1.083	-0.105	1.082	-0.158
12	1.062	-0.088	1.050	-0.182	1.050	-0.158	1.050	-0.195
13	1.071	-0.039	1.063	-0.165	1.064	-0.134	1.062	-0.179
14	1.048	-0.106	1.036	-0.198	1.036	-0.174	1.036	-0.211
15	1.042	-0.110	1.032	-0.200	1.032	-0.176	1.032	-0.213
16	1.048	-0.104	1.039	-0.193	1.040	-0.169	1.039	-0.207
17	1.043	-0.116	1.036	-0.199	1.036	-0.176	1.036	-0.213
18	1.032	-0.124	1.023	-0.211	1.024	-0.187	1.023	-0.225
19	1.029	-0.129	1.021	-0.214	1.022	-0.190	1.021	-0.228
20	1.033	-0.127	1.026	-0.211	1.026	-0.187	1.026	-0.225
21	1.036	-0.124	1.030	-0.204	1.031	-0.181	1.030	-0.219
22	1.036	-0.124	1.031	-0.204	1.032	-0.181	1.031	-0.219
23	1.031	-0.122	1.024	-0.208	1.025	-0.185	1.024	-0.222
24	1.024	-0.133	1.022	-0.212	1.023	-0.190	1.022	-0.227
25	1.018	-0.139	1.027	-0.210	1.029	-0.190	1.029	-0.225
26	1.000	-0.147	1.010	-0.217	1.012	-0.197	1.011	-0.232
27	1.023	-0.139	1.039	-0.204	1.041	-0.185	1.041	-0.219
28	1.011	-0.086	1.006	-0.140	1.003	-0.123	0.984	-0.154
29	1.003	-0.160	1.020	-0.225	1.022	-0.206	1.022	-0.240
30	0.992	-0.176	1.009	-0.240	1.011	-0.221	1.011	-0.254

Seçilen başlangıç üretim değerleri için saat başı maliyet değeri $F_T^0 = 939.0884 R/h$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer uygun bir değer olduğundan, ki başlangıç üretim değerleri bu maliyeti sağlamaktadır, algoritmada birinci olarak

$H_1 = F_T^0 - \Delta_0 = 939.0884 - 50 = 889.0884 R/h$ değerinin uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu H_1 değerinin uygun bir değer olduğu bulunmuştur. H_1 için KSP'yi sağlayan x^1 değişken vektörü için güç üretim değerleri ve bu güç üretimlerinin saat başı maliyeti $F_T^1 = 865.8999 R/h$ olarak hesaplanmıştır. $H_1 - \Delta_1 = 839.0884 R/h$ değeri, F_T^1 den küçük olduğundan $H_2 = H_1 - \Delta_1 = 839.0884$ olarak seçilmiş ve ikinci dış döngüde bu H_2 değerinin uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Üçüncü dış döngü sonucunda, ilk uygun olmayan maliyet değerine ulaşılmıştır. Üçüncü ve sonraki tüm dış döngülerde $\Delta_{n+1} = 1/2\Delta_n$ olarak seçilmiştir. On ikinci dış döngü sonucunda, saat başı maliyet için artırım değeri $\Delta_{12} = 0.04883 R/h$ olarak hesaplanmış, Δ_{12} durma kriterinden, $\varepsilon_2 = 0.05$, küçük olduğundan algoritma durdurulmuştur. Algoritmada son uygun değer için hesaplanmış olan saat başı maliyet değeri $F_T^8 = 803.1200 R/h$ güç akış probleminin çözümü olarak alınmıştır. Çözüm sırasında algoritmada üretilen uygun ve uygun olmayan değerler ise Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Optimal güç akış probleminin çözümü sırasında algoritmada üretilen uygun ve uygun olmayan değerler

n	H_n (R/h)	H_n Uygun değer mi? / Uygun Olmayan değer mi?	F_T^n (R/h)	Δ_n (R/h)	$H_n + \Delta_n$ (R/h)	p	q
0	939.0884	-	939.0884	-50	889.0884	-	-
1	889.0884	Uygun	865.8999	-50	839.0884	0	1
2	839.0884	Uygun	826.6391	-50	789.0884	0	2
3	789.0884	Uygun Olmayan		+25	814.0884	1	2
4	814.0884	Uygun	809.5353	-12.5	801.5884	1	3
5	801.5884	Uygun Olmayan		+6.25	807.8384	2	3
6	807.8384	Uygun	806.4606	-3.125	804.7134	2	4
7	803.5722	Uygun	803.6787	-1.5625	803.1509	2	5
8	803.1509	Uygun	803.1200	-0.78125	802.3696	2	6
9	802.3696	Uygun Olmayan		+0.39062	802.7602	3	6
10	802.7602	Uygun Olmayan		+0.19531	802.9555	4	6
11	802.9555	Uygun Olmayan		+0.09765	803.0531	5	6
12	803.0531	Uygun Olmayan		+0.04883	803.1019	6	6

4.1.2 Optimal çalışma noktasında elektriksel kısıtların kontrolü

Çizelge 4.2’de görüleceği üzere, Bölüm 4.1.1 de elde edilmiş en düşük maliyetli çözüm için $P_{G2} = 48.5986 MW$ ve $p_{12} = 113.5813 MW$ olarak hesaplanmıştır. Eğer $P_{G2}^{\max} = 40MW$ ve $p_{12}^{\max} = 105 MW$ olarak değiştirilirse; 2 nolu baraya bağlı birim aktif güç üretim üst sınırının üzerine çıkmış, 1 ve 2 nolu baralar arasında yer alan iletim hattı da aktif güç taşıma kapasitesini aşmış olacaktır. O halde, bu yeni durum için çözüm yapıldığında, çözüm noktasında P_{G2} ve p_{12} ’nin, sırasıyla, P_{G2}^{\max} ve p_{12}^{\max} değerlerinde olması beklenmektedir.

Yukarıda belirtilen bu değişiklikler sonrasında optimal güç akış problemini F-MSG algoritmasını uygulayarak çözdüğümüzde en düşük maliyetli çözüm $F_T = 810.6338 R/h$ olarak elde edilmiştir. Bu en düşük maliyetli sonuçta $P_{G2} = 40.0012 MW$ ve $p_{12} = 105.0001 MW$ olarak hesaplanmıştır. Çözüm noktasında P_{G2} ve p_{12} yeni sınır değerlerinde bulunmuştur. Görüldüğü gibi F-MSG algoritması bağımsız değişkenlerin sınırdaki değer aldığı optimal çözümleri bulabilmektedir. Bu maliyeti veren güç üretim değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Aynı ED problemini MATPOWER 3.2 yazılımı ile çözdüğümüzde ise en düşük maliyetli çözüm $F_T = 810.19 R/h$ olarak bulunmuştur. MATPOWER 3.2 ile bulunan sonuçlar ile F-MSG algoritması ile elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

4.1.3 Konveks olmayan maliyet fonksiyonlarına sahip üretim birimleri içeren sistemlerde optimal güç akış probleminin F-MSG algoritması ile çözümü

Bölüm 3.1’de anlatılmış olan valf noktası etkisini probleme dahil etmek için, 1 ve 2 nolu baralara bağlı birimlerin saat başı maliyet fonksiyonlarına, denklem (3.16)’daki gibi sinüs bileşenleri eklenerek konveks olmayan maliyet fonksiyonları elde edilmiş ve yeni durum için F-MSG algoritması kullanılarak optimal güç akış problemi çözülmüştür. 1 ve 2 nolu baralara bağlı birimlerin yenilenmiş maliyet fonksiyonu

sabitleri ile güç üretim sınırları Çizelge 4.6’da verilmiştir (Samir ve Zehar, 2008). Sistemdeki diğer üretim birimlerinin maliyet fonksiyonları ise Çizelge 4.1’deki değerlerle aynı alınmıştır.

Çizelge 4.2’deki başlangıç değerleri ile F-MSG algoritması probleme uygulandığında, elde edilen çözüm noktasında en küçük maliyet değeri $F_T = 929.1516 R/h$ olarak bulunmuştur. Bu maliyeti veren güç üretim değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.7’de, F-MSG algoritması ile elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan diğer çözümler ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.7’de kullanılan kısaltmalardan MDEA; Modifiye Edilmiş Diferansiyel Evrim Algoritması (Samir ve Zehar, 2008), DEA; Diferansiyel Evrim Algoritması (Samir ve Zehar, 2008) ile yapılan çözümleri ifade etmektedir. F-MSG algoritması ile literatürdeki diğer çözümlerden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü üzere F-MSG algoritması, konveks olmayan maliyet fonksiyonuna sahip birimler içeren enerji sistemi için optimal güç akış probleminin çözümüne de uygulanabilmekte ve tatmin edici sonuçlar elde edilmektedir.

Çizelge 4.6. IEEE 30 baralı test sisteminde 1 ve 2 nolu baralara bağlı birimlerin değiştirilmiş alt ve üst üretim sınırları ile konveks olmayan maliyet fonksiyonu sabitleri.

<i>Bara No (i)</i>	P_{Gi}^{max} (MW)	P_{Gi}^{min} (MW)	Q_{Gi}^{max} (MVA _r)	Q_{Gi}^{min} (MVA _r)	b_i	c_i	d_i	e_i	g_i
1	200	50	250	-20	150.0	2.00	0.0016	50.00	0.0630
2	80	20	100	-20	25.0	2.50	0.0100	40.00	0.0980

Çizelge 4.7. Konveks olmayan maliyet fonksiyonu içeren optimal güç akış problemi için elde edilen en küçük yakıt maliyetinin, literatürdeki diğer sonuçlar ile karşılaştırılması

Metod	F-MSG	MDEA	DEA
Optimal Yakıt Maliyeti (R/h)	929.1516	930.793	931.085

4.2 Ham Enerji Kaynağı Kısıtlı Termik Birimler İçeren Sistemlerde Optimal Güç Dağıtım Probleminin F-MSG Algoritması İle Çözümü

F-MSG algoritması kullanılarak ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde optimal güç dağıtım probleminin çözümünde, 6 üretim birimi ve 41 iletim hattı içeren IEEE 30 baralı test sistemi kullanılmıştır. Üretim birimlerinden iki tanesi, 5 ve 8 nolu baralara bağlı birimler, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler olarak seçilmiştir. Mevcut enerji sistemi için, dört saatlik altı alt zaman aralığından oluşan, 24 saatlik çalışma zaman aralığı ele alınmıştır. Sistemin tek hat diyagramı Ek.1’de, hat parametreleri ve hatların taşıma kapasiteleri Ek.2’de, bütün alt zaman aralıklarındaki aktif ve reaktif yük değerleri Ek.4 ve Ek.5’de verilmiştir. Çözümde kullanılacak başlangıç üretim değerleri ise Çizelge 4.8’de yer almaktadır.

Kullanılan test sisteminde 1 nolu bara referans barası olarak seçilmiş ve bu baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, $1.05 pu$ ve $0 rad$ olarak alınmıştır. Diğer tüm baralar için bara gerilim genliği alt sınırı $0.95 pu$, bara gerilim genliği üst sınırı ise yük bağlı baralar için $1.05 pu$ ve üretim baraları için $1.10 pu$ seçilmiştir. Trafolara ait nominal dışı çevirim oranları için alt ve üst sınırlar ise 0.90 ve 1.10 kabul edilmiştir (Samir ve Zehar, 2008).

Algoritmada kullanılacak parametreler ise $\alpha = 1500$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = 0.05$, $\Delta_1 = 50 R/h$ ve $M = 250$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise $c_1^1 = 1500$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0, 0, \dots, 0, 0]_{(1 \times 13)}$ seçilmiştir. Algoritmanın 3.Adımında iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu ise $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

5 ve 8 nolu baralara bağlı üretim birimleri ham enerji kaynağı kısıtlı birimler olarak seçilmiştir. Bu birimler tarafından kullanılan gazın birim hacim fiyatı $2 R/ccf$ alınmıştır. Gazın temini için kaynak sağlayıcı ile “ya al ya da öde” antlaşması yapıldığı varsayılmıştır. Antlaşmaya göre ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin işletim süresi

boyunca yakması gereken gaz miktarı 2000 ccf olarak belirlenmiştir. Ayrıca gaz tüketimi için $TOL = 2 \text{ ccf}$ olarak alınmıştır.

F-MSG algoritmasının Bölüm 2’de anlatılan adımlarının kodlanması için MATLAB programı kullanılmışken, (2.5) deki KSP’nin çözümünde GAMS programı ve CONOPT çözücüsü (solver) kullanılmıştır.

Çizelge 4.8. Ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde optimal güç dağıtım probleminin çözümünde kullanılan başlangıç noktasındaki güç üretim değerleri.

		Alt Zaman Aralığı (j)						
		1	2	3	4	5	6	
Bara No (i)	2	$P_{Gi,j}$ (MW)	75	75	75	80	80	80
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	30	30
	5	$P_{Gi,j}$ (MW)	30	40	50	50	40	40
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	30	30
	8	$P_{Gi,j}$ (MW)	25	25	30	30	20	20
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	30	30
	11	$P_{Gi,j}$ (MW)	30	30	30	30	30	30
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	30	30
	13	$P_{Gi,j}$ (MW)	35	35	40	40	35	35
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	30	30

Ya al ya da öde antlaşmasının etkisinin gözlemlenebilmesi için önce yakıt antlaşması ihmal edilerek problem çözülmüştür. Daha sonra bulunan bu optimal işletim noktasındaki toplam yakıt maliyeti, ya al ya da öde antlaşması göz önünde bulundurularak tekrar hesaplanmış ve meydana gelen değişim gözlemlenmiştir. Son olarak yakıt tüketim kısıtının da sağlanacağı bir çözüm noktasının bulunmasına çalışılmıştır.

4.2.1 Ya al ya da öde antlaşması ihmal edilirse

Ya al ya da öde antlaşmasının etkisini göstermek için önce eşitlik (3.30)'da verilen yakıt tüketim kısıtı ihmal edilerek her bir alt zaman aralığı için F-MSG algoritması ile çözüm yapılmış ve bu alt zaman aralıklarındaki en küçük işletim maliyet değerleri bulunmuştur. Elde edilen aktif ve reaktif güç üretimleri ve toplam hat kayıpları Çizelge 4.9'da verilmiştir. Çözüm noktasında, toplam yakıt maliyeti $F_T = 24330.1564 R$, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler tarafından tüketilen toplam gaz miktarı ise $C_{harcanan} = 1570.7836 ccf$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9. Ya al ya da öde antlaşması ihmal edildiğinde elde edilen optimal çalışma noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri (MW) ve termal kayıplar (MW).

i/j	1	2	3	4	5	6	Üretim Türü
1	193.0834	194.8952	198.4961	199.2548	196.8474	194.0780	Aktif
	-19.7935	-19.9995	-19.9999	-20.0000	-19.7780	-19.9997	Reaktif
2	41.8362	49.9135	62.6871	65.1937	56.5322	45.5772	Aktif
	17.7270	16.7580	17.5569	8.0651	17.7945	12.6783	Reaktif
5	20.8154	21.7590	22.9290	23.1749	21.8858	21.3014	Aktif
	28.5480	30.4433	29.1152	38.3363	32.5433	30.5438	Reaktif
8	15.0187	20.9698	27.8314	31.6655	22.5086	18.8023	Aktif
	33.3793	35.3979	50.9717	60.0000	36.3687	38.1280	Reaktif
11	11.3558	11.8378	13.8498	15.2952	12.3352	11.8152	Aktif
	25.8547	23.2735	29.6544	26.3671	25.7456	24.2837	Reaktif
13	12.0005	11.9999	12.1346	13.7264	12.0008	12.0002	Aktif
	26.6157	33.8425	40.8971	36.8856	38.7121	30.8670	Reaktif
$P_{Kayıp,j}$	10.7101	11.3843	12.9281	13.3121	12.1103	11.0792	

4.2.2 Ya al ya da öde antlaşması göz önünde bulundurulursa

Kısım 4.2.1'de elde edilen optimal çözüm noktasında hesaplanan ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler tarafından tüketilen toplam gaz miktarı, $C_{harcanan} = 1570.7836 ccf$, antlaşmada belirlenen yakıt tüketim değeri,

$C_{TOT} = 2000 \text{ ccf}$ 'den düşük olduğu için, “ya al ya da öde” antlaşmasına göre toplam maliyeti aşağıdaki gibi hesaplanır (Fadıl ve Yaşar, 2002).

$$F_T = 4 \times \left(\sum_{j=1}^6 \left(\sum_{i \in \{1,2,11,13\}} F_i(P_{Gi,j}) \right) \right) + 2 \times 2000 = 21188.5892 + 2 \times 2000 \quad (4.3)$$

$$= 25188.5892 \text{ R}$$

Denklem (4.3)'de hesaplanan 21188.5892 değeri, tüm normal yakıtlı termal birimlerin 24 saatlik yakıt maliyetlerinin toplamı, 4000 ise ya al ya da öde antlaşması gereği alınması zorunlu gaza ödenecek paradır (Fadıl ve Yaşar, 2002). C_{TOT} değerinden daha düşük gaz tüketilmesine rağmen, antlaşmaya göre $C_{TOT} = 2000 \text{ ccf}$ miktarında gaz tüketilmiş gibi para ödenmektedir. Kullanılmayan gaz miktarı için de para ödendiği için toplam yakıt maliyeti fazla çıkmaktadır.

Denklem (3.30)'da verildiği üzere, antlaşma ile belirlene miktarda, $C_{TOT} = 2000 \text{ ccf}$, gaz harcanan çözüm noktasını bulabilmek için aşağıdaki gibi bir metot kullanılmıştır.

Öncelikle denklem (3.38)'de verilmiş olan amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi değiştirilmiştir (Fadıl ve Yaşar, 2002).

$$F_{TOT,j} = \sum_{i \in \{N_s\}} F_i(P_{Gi,j}) t_j + \psi \sum_{i \in \{N_T\}} F_i(P_{Gi,j}) t_j \quad (4.4)$$

Burada ψ , ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin kullandığı yakıtın fiyatı için, $0 \leq \psi \leq 1$ olarak değişen, hayali bir ölçekleme katsayısı olarak adlandırılabilir. Çözümde izlenen metot şöyledir (Fadıl ve Yaşar, 2002).

Adım-1) $0 < \psi < 1$ olacak bir ψ değeri seç. $\psi_{eski}^{ist} = 1$, $\psi_{eski}^{alt} = \psi$ ve $Başla = 0$ al.

Adım-2) Bütün alt zaman aralıkları için F-MSG algoritması ile optimal güç akış problemini çöz.

Adım-3) Bulunan çözüm noktasında $hata = C_{harcanan} - C_{TOT}$ hesapla. Eğer $|hata| \leq TOL$ ise dur. Bulunan çözüm optimal çözümdür. Değilse Adım-4'e git.

Adım-4) Eğer $hata > 0$ ve $başla=0$ ise, $başla = 1$, $\psi_{yeni}^{üst} = \psi_{eski}^{üst}$, $\psi_{yeni}^{alt} = \psi_{eski}^{alt}$ yap ve Adım-8'e git. Değilse Adım-5'e git.

Adım-5) Eğer $hata < 0$ ve $başla=0$ ise, $\psi = 0.5\psi_{eski}^{alt}$ yap ve Adım-2'ye git. Değilse Adım-6'ya git.

Adım-6) Eğer $hata > 0$ ve $başla=1$ ise, $\psi_{yeni}^{üst} = \psi_{eski}^{üst}$, $\psi_{yeni}^{alt} = \psi$ yap ve Adım-8'e git. Değilse Adım-7'ye git.

Adım-7) Eğer $hata < 0$ ve $başla=1$ ise, $\psi_{yeni}^{üst} = \psi$, $\psi_{yeni}^{alt} = \psi_{eski}^{alt}$ yap ve Adım-8'e git.

Adım-8) $\psi = 0.5 (\psi_{yeni}^{alt} + \psi_{yeni}^{üst})$ yap ve Adım-3'e git.

Bu metodun temelinde ψ katsayısının değiştirilerek denklem (3.30)'da verilen yakıt tüketim kısıtının sağlandığı bir optimal çözüm noktasının bulunması yer almaktadır. Her bir ψ değeri için bütün alt zaman aralıklarında optimal güç akış problemi çözülerek, ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin tükettiği gaz miktarı ve $hata = C_{harcanan} - C_{TOT}$ hesaplanmaktadır. Eğer hata sıfırdan küçükse, ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin üretimlerinin ve dolayısıyla gaz tüketimlerinin artırılarak hatanın sıfıra yaklaşması istenilmektedir. Bunun için mevcut ψ değeri azaltılarak (Fadıl ve Yaşar, 2002), ki ψ 'nın azaltılması denklem (4.4)'e göre gaz fiyatının ucuzlaması gibi bir etki yapacaktır, adım 2'de yeniden F-MSG algoritması ile ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin daha fazla gaz tükettiği yeni bir optimal çözüm noktası

aranmaktadır. Eğer elde edilen çözüm noktasında hata sıfırdan büyük ise bu sefer ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin üretimlerinin ve dolayısıyla gaz tüketimlerinin azaltılarak hatanın sıfıra yaklaşması istenilmektedir. Bunun için mevcut ψ değeri artırılarak (Fadıl ve Yaşar, 2002), ki ψ 'nin artırılması denklem (4.4)'e göre gaz fiyatının artması gibi bir etki yapacaktır, adım 2'de yeniden F-MSG algoritması ile ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin daha az gaz tükettiği yeni bir optimal çözüm noktası aranmaktadır. Pozitif ve negatif birer hata değeri bulunduktan sonra, bu hataların elde edildiği ψ değerleri arasında ikiye ayırma (bisection) metodu ile yeni ψ hesaplanarak aynı işlemler tekrar edilmektedir (Fadıl ve Yaşar, 2002). $|hata|$ değerinin, önceden belirlenmiş tolerans değerinden küçük olduğu sonuç noktası, optimal sonuç noktası olarak kabul edilir.

Yukarıda anlatılan adımlar izlenerek, yakıt kısıtı göz önüne alındığı durum için çözüm yapılmıştır. Elde edilen aktif ve reaktif güç üretimleri ve alt zaman aralıklarındaki sistem kayıpları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Ya al ya da öde antlaşması göz önüne alındığında elde edilen optimal çalışma noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri (MW) ve termal kayıplar (MW).

i/j	1	2	3	4	5	6	Üretim Türü
1	191.6936	193.3133	197.3562	198.9714	194.6867	192.4970	Aktif
	-18.4533	-16.4073	-19.6311	-20.0000	-14.9844	-19.9682	Reaktif
2	35.1916	42.5345	57.5695	62.0945	46.1853	38.6383	Aktif
	14.7359	14.6081	19.0508	14.8996	13.2399	14.7587	Reaktif
5	21.9956	23.3789	24.3175	25.6903	24.0388	22.7229	Aktif
	25.5281	24.9850	27.6273	29.2084	24.1330	26.1027	Reaktif
8	22.7869	29.6423	34.8456	34.9997	34.4722	27.2260	Aktif
	34.6141	37.5835	49.1571	56.9134	42.0999	38.7050	Reaktif
11	9.9999	10.0000	11.2507	13.9262	9.9999	10.0000	Aktif
	23.6654	24.1357	29.6965	28.5085	27.0469	25.4807	Reaktif
13	12.0000	12.0000	11.9972	12.3278	11.9999	11.9999	Aktif
	30.7731	33.1792	41.0371	39.9782	37.5002	29.7825	Reaktif
$P_{Kayıp,j}$	10.2679	10.8692	12.5150	13.0152	11.3839	10.5843	

Ayrıca çözüm noktasında $C_{harcama} = 1998.2885 \text{ ccf}$ ve $|hata| = 1.7115 \leq TOL$ olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu çözüm noktasında toplam yakıt maliyeti, F_T , denklem (4.3)'de anlatıldığı gibi hesaplanmış ve $F_T = 24381.0148 R$ bulunmuştur.

$$F_T = 4 \times \left(\sum_{j=1}^6 \left(\sum_{i \in \{1,2,11,13\}} F_i(P_{Gi,j}) \right) \right) + 2 \times 2000 = 20381.0148 + 2 \times 2000 \quad (4.5)$$

$$= 24381.0148 R$$

Kısım 4.2.2'da anlatılan metot uygulanırken, optimal çözüm bulunana kadar her bir ψ değeri için elde edilen optimum çalışma noktasındaki toplam gaz tüketimi ve toplam yakıt maliyetleri de Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. Her bir ψ değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki toplam gaz tüketimi ve toplam yakıt maliyetleri

	$\psi = 1$	$\psi = 0.9$	$\psi = 0.95$	$\psi = 0.925$	$\psi = 0.9125$
$C_{speni} \text{ (ccf)}$	1570.7836	2054.103	1836.9336	1923.0282	1998.2885
$Hata \text{ (ccf)}$	-429.2164	54.103	-163.0664	-76.9718	-1.7115
$F_{TOT} \text{ (R)}$	25188.5892	24391.7144	24669.5828	24521.7580	24381.0148

Çizelge 4.11'de görüleceği üzere öncelikle $\psi = 1$ için çözüm yapılmış ve bulunan optimal çalışma noktasında hata negatif hesaplanmıştır. Hatayı sıfıra yaklaştırmak için ψ değeri azaltılarak $\psi = 0.9$ seçilmiş ve tekrar çözüm yapılmıştır. $\psi = 0.9$ için yapılan çözümde hata pozitif çıkmıştır. Bir pozitif ve bir de negatif hata değerleri bulunduğu için sonraki adımlarda ψ değeri $\psi = 0.5 (\psi_{yeni}^{alt} + \psi_{yeni}^{üst})$ şeklinde hesaplanmıştır. $\psi = 0.9125$ için elde edilen optimal çalışma noktasında $hata < Tol = 2 \text{ ccf}$ olduğundan elde edilen sonuç optimal sonuç kabul edilmiştir.

Yapılan hesaplamalardan görüleceği üzere; toplam maliyet $F_T = 25188.5892 R$ değerinden, yakıt kısıtı göz önüne alınarak problemin çözülmesi sonucu, $F_T = 24381.0148 R$ değerine düşürülmüş ve günlük $807.574 R$ bir kazanç sağlanmıştır.

4.3 Çevresel / Ekonomik Optimal Güç Dağıtım Probleminin F-MSG Algoritması İle Çözümü

F-MSG algoritması kullanılarak çevresel/ekonomik optimal güç dağıtım probleminin çözümünde, 6 üretim birimi ve 41 iletim hattı içeren IEEE 30 baralı test sistemi kullanılmıştır. Mevcut enerji sistemi için, dört saatlik altı alt zaman aralığından oluşan, 24 saatlik çalışma süresi ele alınmıştır. Sistemin tek hat diagramı Ek.1’de, hat parametreleri ve hatların taşıma kapasiteleri Ek.2’de, bütün alt zaman aralıklarındaki aktif ve reaktif yük değerleri Ek.4 ve Ek.5’de verilmiştir. Kullanılan test sisteminde 1 nolu bara referans barası olarak seçilmiş ve bu baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, $1.05 pu$ ve $0 rad$ olarak alınmıştır. Diğer tüm baralar için bara gerilim genliği alt sınırı $0.95 pu$, üst sınırı ise yük bağlı baralar için $1.05 pu$ ve üretim baraları için $1.10 pu$ seçilmiştir. Trafolarla ait nominal dışı çevirim oranları için alt ve üst sınırlar ise 0.90 ve 1.10 kabul edilmiştir (Abido, 2009).

Algoritmada kullanılacak parametreler ise $\alpha = 1$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 1 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_2 = 0.05$, $\Delta_1 = 50 R/h$ ve $M = 500$ olarak alınmıştır. İkili değişkenlerin başlangıç değerleri ise $c_1^1 = 10$ ve $\mathbf{u}_1^1 = [0, 0, \dots, 0, 0]_{(1 \times 13)}$ seçilmiştir. Algoritmanın 3.Adımında iterasyon sayısının sınırlandırılmasında kullanılan $\ell(k)$ fonksiyonu ise $\ell(k) = k$ olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca 2 ve 13 nolu baralara bağlı üretim birimleri ham enerji kaynağı kısıtlı birimler olarak seçilmiş ve bu birimlerin kullandığı gazın birim hacim fiyatı $2 R/ccf$ alınmıştır. Bu birimlerin kullanacağı gazın temini için yakıt sağlayan şirket ile “ya al ya da öde” antlaşması yapıldığı varsayılmıştır. Antlaşmaya göre ham enerji kaynağı kısıtlı

birimlerin yakması gereken en düşük gaz miktarı 2500 *ccf* olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak gaz tüketimi için $TOL = 2 \text{ ccf}$ olarak alınmıştır.

F-MSG algoritmasının Bölüm 2’de anlatılan adımlarının kodlanması için MATLAB programı kullanılmışken, (2.5) deki KSP’nin çözümünde GAMS programı ve CONOPT çözücüsü (solver) kullanılmıştır.

F-MSG algoritması ile çözüm yapılırken kullanılan birimlerin başlangıç üretim değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir. Sistemdeki üretim birimlerinin, denklem (3.15)’deki yakıt maliyeti sabitleri ile denklem (3.42)’daki emisyon fonksiyonu sabitleri ise Çizelge 4.13’de verilmiştir (Abido, 2009). Çevresel/ekonomik optimal güç dağıtım problemi için denklem (3.39)’da kullanılan emisyon fiyatı, ξ , ise 6046.173677 R/kg alınmıştır (Abido, 2009).

Çizelge 4.12. Çevresel / ekonomik optimal güç dağıtım probleminin çözümünde kullanılan başlangıç noktasındaki güç üretim değerleri.

			Alt					
			Zaman Aralıkları (<i>j</i>)					
			1	2	3	4	5	6
Bara No (<i>i</i>)	2	$P_{Gi,j}$ (MW)	40	45	50	50	40	30
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	20	20
	5	$P_{Gi,j}$ (MW)	60	65	70	70	65	65
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	20	20
	8	$P_{Gi,j}$ (MW)	60	65	70	70	60	65
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	20	20
	11	$P_{Gi,j}$ (MW)	60	65	70	70	65	65
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	20	20
	13	$P_{Gi,j}$ (MW)	40	45	50	50	40	30
		$Q_{Gi,j}$ (MVar)	20	20	25	25	20	20

Çizelge 4.13. Üretim birimlerinin maliyet fonksiyonu ve emisyon fonksiyonu sabitleri ile güç üretimi alt ve üst sınırları.

		Birimlerin Bağlı Olduğu Baralar (i)					
		1	2	5	8	11	13
Maliyet Fonksiyonu Sabitleri	b_i	10	10	20	10	20	10
	c_i	200	150	180	100	180	150
	d_i	100	120	40	60	40	100
Emisyon Fonksiyonu Sabitleri	α_i	4.091	2.543	4.258	5.326	4.258	6.131
	β_i	-5.554	-6.047	-5.094	-3.550	-5.094	-5.555
	γ_i	6.490	5.638	4.586	3.380	4.586	5.151
	ζ_i	2×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-6}	2×10^{-3}	1×10^{-6}	1×10^{-5}
	λ_i	2.857	3.333	8.000	2.000	8.000	6.667
Güç Üretimi Alt ve Üst Sınırları	P_{Gi}^{max} (MW)	50	60	100	120	100	60
	P_{Gi}^{min} (MW)	5	5	5	5	5	5
	Q_{Gi}^{max} (MVar)	250	100	80	60	50	60
	Q_{Gi}^{min} (MVar)	-20	-20	-15	-15	-10	-15

Pareto-optimal çözümler elde edilirken, denklem (3.39)'da geçen ağırlık faktörü, w ; $0 \leq w \leq 1$ aralığında 0.1'lik artışlar ile değiştirilmiş (Abido, 2009) ve her bir w değeri için F-MSG algoritması kullanılarak bütün alt zaman aralıklarında optimal güç dağıtım problemi çözülmüştür. Sadece birinci alt aralığında her bir w değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki güç üretim değerleri Çizelge 4.14'de verilmiştir. Ayrıca yalnızca birinci alt aralıkta $w=1$ ve $w=0$ değerleri için Diferansiyel Evrim Algoritması (Abou El Ela vd., 2008) ile elde edilmiş sonuçlar Çizelge 4.15'de verilmiştir. Bu çizelgelerde görüleceği üzere F-MSG algoritması ile daha düşük maliyet değerleri elde edilmiştir.

$w=1$ değeri sadece termik maliyetin, $w=0$ değeri ise sadece NO_x emisyon miktarının minimum olmasına karşılık düştüğünden, Çizelge 4.14'de görüldüğü üzere w artarken yakıt maliyeti düşmekte ama buna karşı emisyon değeri artmaktadır.

Çizelge 4.14. Birinci alt zaman aralığında her bir w değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki üretilen aktif güçler, hat kayıpları, yakıt maliyetleri ve emisyon değerleri.

w	$P_{G1,1}$ (MW)	$P_{G2,1}$ (MW)	$P_{G5,1}$ (MW)	$P_{G8,1}$ (MW)	$P_{G11,1}$ (MW)	$P_{G13,1}$ (MW)	$P_{Kayıp}$ (MW)	$F_{Yakıt}$ (R/h)	E_{Toplam} (ton/h)
0.0	41.12	46.41	54.50	39.11	54.51	51.58	3.81	646.8754	0.19417
0.1	40.11	45.72	54.34	40.45	54.27	50.89	2.42	641.6173	0.19420
0.2	39.17	45.13	54.46	42.37	54.30	50.31	2.37	639.1985	0.19427
0.3	37.94	44.41	54.61	44.67	54.34	49.70	2.33	636.3975	0.19443
0.4	36.56	43.65	54.78	47.36	54.35	48.94	2.28	633.2945	0.19471
0.5	34.90	42.70	55.00	50.77	54.42	47.80	2.24	629.6269	0.19521
0.6	32.71	41.37	55.42	54.93	54.39	46.73	2.18	625.5247	0.19606
0.7	29.91	39.79	55.88	60.43	54.53	45.05	2.13	620.6071	0.19758
0.8	25.85	37.60	56.55	68.15	54.34	42.95	2.09	614.8708	0.20048
0.9	20.21	34.66	57.60	79.30	53.73	39.95	2.11	609.0735	0.20621
1.0	12.41	30.88	60.31	99.70	48.39	33.89	2.24	605.4186	0.22086

Çizelge 4.15. Birinci alt zaman aralığında $w=0$ ve $w=1$ değeri için, Diferansiyel Evrim Algoritması ile elde edilen optimal çalışma noktasındaki yakıt maliyetleri ve emisyon değerleri.

w	$F_{Yakıt}$ (R/h)	E_{Toplam} (ton/h)
0 (en düşük emisyon)	645.0850	0.1942
1 (en düşük maliyet)	608.0658	0.2193

24 saatlik tüm çalışma süresi için her bir w değerinde bulunan aktif güç üretimleri, emisyon değerleri ve yakıt maliyetleri ise Çizelge 4.16’da verilmiştir. Eğer en az 2500 ccf gaz tüketimi gerektiren “ya al ya da öde” antlaşması geçerli olursa, Çizelge 4.16’dan görüleceği üzere çözüm noktasında 2500 ccf’den daha az gaz harcanmış olan $w=1$, $w=0.9$, $w=0.8$ ve $w=0.7$ için yakıt maliyetlerinin denklem (4.3)’de gösterildiği gibi tekrar hesaplanması gerekir. Yeniden hesaplanan yakıt maliyetleri Çizelge 4.17’da verilmiştir.

Çizelge 4.16. 24 saatlik işletim süresi için, her bir w değeri için elde edilen optimal çalışma noktasındaki toplam yakıt maliyeti, toplam emisyon değerleri ve ham enerji kaynağı kısıtlı birimler tarafından harcanan gaz miktarı.

w	$F_{Yakıt}$ (R)	E_{Toplam} (ton)	$C_{Harcanan}$ (ccf)
0.0	16825.41	4.67780	2843.2456
0.1	16760.01	4.67832	2807.7380
0.2	16699.63	4.67984	2770.1139
0.3	16633.84	4.68356	2726.5245
0.4	16556.66	4.69060	2673.8925
0.5	16467.49	4.70252	2609.0907
0.6	16370.08	4.72340	2533.5909
0.7	16243.75	4.76152	2428.7167
0.8	16105.15	4.83236	2292.6531
0.9	15960.51	4.97608	2107.3080
1.0	15863.14	5.34048	1818.9849

Çizelge 4.17. Ya al ya da öde antlaşması gereği yeniden hesaplanan toplam yakıt maliyeti değerleri

w	$F_{Yakıt}$ (R/h)	E_{Toplam} (ton)	$C_{Harcanan}$ (ccf)
0.0	16825.41	4.67780	2843.2456
0.1	16760.01	4.67832	2807.7380
0.2	16699.63	4.67984	2770.1139
0.3	16633.84	4.68356	2726.5245
0.4	16556.66	4.69060	2673.8925
0.5	16467.49	4.70252	2609.0907
0.6	16370.08	4.72340	2533.5909
0.7	16386.32	4.76152	2428.7167
0.8	16519.84	4.83236	2292.6531
0.9	16745.89	4.97608	2107.3080
1.0	17225.17	5.34048	1818.9849

Ya al ya da öde antlaşmasının geçerli olduğu durumda, $w=1$, $w=0.9$, $w=0.8$ ve $w=0.7$ için elde edilen optimal çalışma noktalarında 2500 ccf 'den daha az gaz harcanmış olduğu için tüketilmeyen gaz için de ödeme yapılmakta ve toplam yakıt

maliyetinde artış görülmektedir. Bu nedenle; $w=1$, $w=0.9$, $w=0.8$ ve $w=0.7$ için, ya al ya da öde antlaşması gereği $C_{harcanan} \geq C_{TOT}$ koşulu sağlayan yeni optimal çözüm noktaları bulunmalıdır. Kısım (4.2.2)'de anlatılan metot ile $w=1$, $w=0.9$, $w=0.8$ ve $w=0.7$ için tekrar çözümler yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.18'de verilmiştir.

Çizelge 4.18. Ya la ya da öde antlaşmasındaki en az gaz tüketim kısıtını sağlayan pareto-optimal sonuçlar için, toplam yakıt maliyetleri, toplam emisyon değerleri ve ham enerji kaynağı kısıtlı birimlerin toplam gaz tüketim değerleri.

w	F_{Yakit} (R/h)	E_{Toplam} (ton)	$C_{Harcanan}$ (ccf)
0.0	16825.41	4.67780	2843.2456
0.1	16760.01	4.67832	2807.7380
0.2	16699.63	4.67984	2770.1139
0.3	16633.84	4.68356	2726.5245
0.4	16556.66	4.69060	2673.8925
0.5	16467.49	4.70252	2609.0907
0.6	16370.08	4.72340	2533.5909
0.7	16261.15	4.76128	2501.9789
0.8	16155.47	4.81100	2499.0335
0.9	16035.96	4.92740	2500.7278
1.0	15957.64	5.22940	2503.2000

Görüldüğü üzere yeni yapılan çözüm sonucu $w=1$, $w=0.9$, $w=0.8$ ve $w=0.7$ için toplam yakıt maliyetlerinde, sırasıyla, günlük 125.17 R, 364.37 R, 709.93 R ve 1267.53 R kadar iyileştirmeler sağlanmıştır.

4.4 Pompayla Doldurmalı Birim İçeren Enerji Sistemlerinde Optimal Güç Dağıtım Probleminin F-MSG Algoritması İle Çözümü

F-MSG algoritması kullanılarak pompayla doldurmalı birim içeren enerji sistemlerinde optimal güç dağıtım probleminin F-MSG algoritması ile çözümünü test etmek için, 5 adet termik ve 1 adet pompayla doldurmalı üretim birimi ve 25 iletim hattı

içeren 12 baralı test sistemi kullanılmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2000). Mevcut enerji sistemi için, dört saatlik altı alt aralıktan oluşan, 24 saatlik çalışma zamanı ele alınmıştır. Sistemin tek hat diyagramı ve hat parametreleri Ek.6'da, vbütün çalışma alt zaman aralıklarındaki aktif ve reaktif yük değerleri Ek.7'de verilmiştir. Kullanılan test sisteminde 1 nolu bara referans barası olarak seçilmiş ve bu baranın gerilim genliği ile faz açısı, sırasıyla, $1.05 pu$ ve $0 rad$ olarak alınmıştır. Diğer tüm baralar için bara gerilim genliği alt sınırı $0.90 pu$, üst sınırı ise $1.10 pu$ seçilmiştir (Fadıl ve Yaşar, 2000). Bütün iletim hatları için aktif güç taşıma kapasitesi $1.5 pu$ alınmıştır.

F-MSG algoritması ile çözüm yapılırken kullanılacak birimlerin başlangıç üretim değerleri Çizelge 4.19'da, sistemdeki termik birimlerin üretim sınırları ve denklem (3.15)'de verilen maliyet fonksiyonu katsayıları ise Çizelge 4.20'de verilmiştir (Fadıl ve Yaşar, 2000).

Çizelge 4.19. Pompayla doldurulmalı birim içeren enerji sistemlerinde optimal güç dağıtım probleminin çözümünde kullanılan başlangıç noktasındaki güç üretim değerleri.

		Alt Zaman Aralıkları						
		(j)						
			1	2	3	4	5	6
Bara No (i)	4	$P_{Gi,j} (MW)$	45	150	170	150	70	45
		$Q_{Gi,j} (MVar)$	8	70	100	70	20	8
	6	$P_{Gi,j} (MW)$	2	2	2	2	2	2
		$Q_{Gi,j} (MVar)$	0	0	0	0	0	0
	7	$P_{Gi,j} (MW)$	40	140	170	140	60	40
		$Q_{Gi,j} (MVar)$	8	70	100	70	20	8
	9	$P_{Gi,j} (MW)$	20	45	55	45	35	20
		$Q_{Gi,j} (MVar)$	8	70	100	70	20	8
	11	$P_{Gi,j} (MW)$	20	35	45	35	30	20
		$Q_{Gi,j} (MVar)$	8	70	100	70	20	8

Çizelge 4.20. Termik birimlerin alt ve üst üretim sınırları ile konveks maliyet fonksiyonu sabitleri.

<i>Bara No (i)</i>	P_{Gi}^{max} (MW)	P_{Gi}^{min} (MW)	Q_{Gi}^{max} (MVar)	Q_{Gi}^{min} (MVar)	b_i	c_i	d_i
1	350	50	200	-200	527	7.48	0.001495
4	180	45	200	-200	561	7.92	0.001562
7	175	40	200	-200	310	7.85	0.00194
9	100	5	200	-200	476	9.52	0.00436
11	100	3	200	-200	460	9.40	0.00397

Sistemde 6 nolu baraya bağlı üretim birimi pompayla doldurmalı birim olarak kabul edilmiştir. Pompayla doldurmalı bu birim için başlangıç üst rezervuar su hacmi değeri ile bu rezervuara ait alt ve üst depolama sınırları, sırasıyla, 1000 *acre-ft*, 5000 *acre-ft* ve 15000 *acre-ft* alınmıştır. Harcanacak net su miktarı için ise $TOL=1.5$ *ccf* olarak kabul edilmiştir.

F-MSG algoritmasının Bölüm 2’de anlatılan adımlarının kodlanması için MATLAB programı kullanılmışken, (2.5) deki KSP’nin çözümünde GAMS programı ve CONOPT çözücüsü (solver) kullanılmıştır.

Bu birimin enerji üretirken rezervuardan saat başına saldığı ve rezervuar hacmini doldurmak için rezervuara saat başına pompaladığı su miktarları aşağıdaki fonksiyonlar ile tanımlanmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2000).

$$q_{GH}(P_{GH}) = \begin{cases} 200 + 2.0P_{GH}, & (\text{acre} - \text{ft} / \text{h}) & \text{eğer } 0 < P_{GH} \leq 130 \text{ MW} \\ 0 & (\text{acre} - \text{ft} / \text{h}) & \text{eğer } P_{GH} = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$q_{PH}(|P_{PH}|) = \begin{cases} 200 + \frac{4}{3}|P_{PH}|, & (\text{acre} - \text{ft} / \text{h}) & \text{eğer } 0 < |P_{PH}| \leq 130 \text{ MW} \\ 0 & (\text{acre} - \text{ft} / \text{h}) & \text{eğer } P_{PH} = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

q hacminde suyun salınması ile elde edilen güç, P_{GH} , ile q hacmindeki suyun rezervuara pompalanması için gereken güç, $|P_{PH}|$, denklem (4.6) ve (4.7) kullanılarak şöyle hesaplanır.

$$P_{GH} = \frac{(q-200)}{2} \quad (4.8)$$

$$|P_{PH}| = \left(\frac{q-200}{4/3} \right) \quad (4.9)$$

Denklem (4.8) ve (4.9) yardımıyla pompalı doldurmalı birimin çevrim verimi, η ise şu şekilde hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{P_{GH}}{|P_{PH}|} = \frac{\frac{(q-200)}{2}}{\left(\frac{q-200}{4/3} \right)} = \frac{4}{6} \cong 0.67 \quad (4.10)$$

Hesaplanan bu çevrim verimi değerine göre, sistemdeki pompalı doldurmalı birim için şu yorum yapılabilir; 67 MW güç üretebilmek için harcanan suyu tekrar rezervuara pompalamak için 100 MW güç gerekmektedir.

Problemin çözümünde, 9 ve 11 nolu baralara bağlı pahalı birimlerin aktif güç üretimleri bu birimlerin aktif güç üretim sınırlarının altına düştüğünde, bu birimlerin aktif güç üretimleri sıfır alınmakta ve bu birimler senkron kompansatör olarak çalıştırılmaktadır (Fadıl ve Yaşar, 2000).

Pompayla doldurmalı birimin etkisini gözlemleyebilmek için önce bu birimin devre dışı olduğu varsayılarak optimal güç dağıtım problemi çözülmüştür. Daha sonra bu birim devreye alınarak tekrar çözüm yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.4.1 Pompayla doldurmalı birimin devre dışı olursa

Pompayla doldurmalı birim devre dışı olarak kabul edilmiş, her bir alt zaman aralığında optimal güç akış problemi çözülmüştür. Elde edilen optimal çözüm noktasında toplam yakıt maliyeti, $F_T = 124987.1462 R$ olarak hesaplanmıştır. Çözüm noktasındaki güç üretim değerleri, hat kayıpları ve yakıt maliyetleri Çizelge 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.21’de görüleceği üzere, 9 ve 11 nolu baralara bağlı birimler, yakıt maliyetleri yüksek olduğundan, çözüm noktasında sadece yük ihtiyacının yüksek olduğu alt zaman aralığında (3. alt zaman aralığı) devreye girmekte, diğer alt zaman aralıklarında ise senkron kompensatör olarak çalışmaktadırlar.

Çizelge 4.21. Pompayla doldurmalı birim devre dışı olduğunda elde edilen çözüm noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri, hat kayıpları ve yakıt maliyetleri.

Alt Per. (j)	$P_{Yük,j}$ (MW)	$P_{Kayıp,j}$ (MW)	Güç Üret.	Bara No (i)					$F_{T,j}$ (R)
				1	4	7	9	11	
1	200	3.498	$P_{Gi,j}$	112.07	44.99	46.43	—	—	11933.0349
			$Q_{Gi,j}$	9.65	10.75	20.87	10.94	2.14	
2	600	34.459	$P_{Gi,j}$	280.14	179.32	174.99	—	—	26057.4631
			$Q_{Gi,j}$	124.49	73.71	84.15	77.08	90.77	
3	700	40.333	$P_{Gi,j}$	310.96	180.00	174.99	38.07	36.31	33716.4652
			$Q_{Gi,j}$	131.62	103.05	105.52	103.68	102.62	
4	600	34.443	$P_{Gi,j}$	279.92	179.52	174.99	—	—	26056.9539
			$Q_{Gi,j}$	124.28	74.70	83.60	76.72	90.74	
5	300	7.285	$P_{Gi,j}$	127.38	76.88	103.02	—	—	15290.0380
			$Q_{Gi,j}$	38.33	10.92	56.35	24.99	22.37	
6	200	3.427	$P_{Gi,j}$	109.23	45.00	49.19	—	—	11933.1911
			$Q_{Gi,j}$	-0.45	12.27	23.20	10.11	2.14	
								F_T (R)	124987.1462

Pompalı doldurmalı birimin devre dışı olduğu durum için, sözde elektrik fiyatı yöntemi (PSPA) ile elde edilen çözüm noktasında toplam yakıt maliyeti $F_T = 125268.540 (R)$ olarak hesaplanmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2000). Görüleceği üzere F-MSG algoritması ile daha düşük maliyet değeri elde edilmiştir.

4.4.2 Pompayla doldurmalı birimin devrede olursa

Pompayla doldurmalı birim devrede olduğunda optimal güç dağıtım problemi F-MSG algoritması ile çözülürken, j alt zaman aralığı için toplam yakıt maliyeti, $F_{T,j}$, aşağıdaki şekilde yeniden tanımlanmıştır.

$$F_{T,j} = \sum_{i \in \{N_S\}} F_i(P_{Gi,j}) + \psi \sum_{j \in J_{gen}} q_{GH}(P_{GH,j})t_j - \psi \sum_{j \in J_{gen}} q_{PH}(|P_{PH,j}|)t_j \quad (4.11)$$

Burada ψ , pompalı doldurmalı birimin için hayali su fiyatı olarak düşünülebilir. ψ büyük değerler aldığı anda pompalı doldurmalı birim, düşük yük talebinin gerçekleştiği alt zaman aralıklarında daha fazla su pompalamaya başlayacaktır, ancak yüksek yük talebinin gerçekleştiği zaman aralıklarında daha az su kullanarak daha az güç üretecektir. Bunun sonucunda harcanan net su miktarı $q_{Harc,Net}$ daha düşük negatif değerlere ulaşacaktır. Benzer olarak ψ küçük değerler aldığı anda pompalı doldurmalı birim, düşük yük talebinin gerçekleştiği alt zaman aralıklarında daha az su pompalamaya başlayacaktır, ancak yüksek yük talebinin gerçekleştiği alt zaman aralıklarında daha fazla su kullanarak daha yüksek güç üretecektir. Bunun sonucunda harcanan net su miktarı $q_{Harc,Net}$ daha yüksek pozitif değerlere ulaşacaktır. ψ 'nin harcanan net su miktarına bu etkisi doğrultusunda, $q_{Harc,Net} = 0$ sağlayan bir çözüm noktası bulmak için bölüm 4.2.2 de anlatılan metoda benzer bir yol izlenmiştir. İzlenen bu yol aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

Adım-1) ψ^{avg} hesapla ve $\psi = \psi^{avg}$ al.

Adım-2) $test_üst = 0$ ve $test_alt = 0$ seç

Adım-3) Bağımsız değişkenlerin başlangıç değerleri ile, F-MSG algoritması kullanarak bütün alt zaman aralıklarındaki güç dağıtım problemlerini çöz.

Adım-4) Elde edilen çözüm noktası için $q_{Harc,Net} = q_{Harc,Top} - q_{Pomp,Top}$ hesapla. Eğer $|q_{Harc,Net}| \leq Tol$ ise dur. Elde edilen sonuçlar optimal sonuçlardır. Değilse adım-5'e git.

Adım-5) Eğer $test_alt = 0$ ve $q_{Harc,Net} > 0$ ise $test_alt = 1$, $\psi^{alt} = \psi$, $\psi^{üst} = 1.5 \times \psi^{alt}$, $\psi = \psi^{üst}$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-6'ya git.

Adım-6) Eğer $test_üst = 0$ ve $q_{Harc,Net} < 0$ ise $test_üst = 1$, $\psi^{üst} = \psi$, $\psi^{alt} = 0.5 \times \psi^{üst}$, $\psi = \psi^{alt}$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-7'ye git.

Adım-7) Eğer $test_alt = 1$, $test_üst = 0$ ve $q_{Harc,Net} > 0$ ise, $\psi = 1.5 \times \psi^{üst}$, $\psi^{üst} = \psi$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-8'e git.

Adım-8) Eğer $test_üst = 1$, $test_alt = 0$ ve $q_{Harc,Net} < 0$ ise, $\psi = 0.5 \times \psi^{alt}$, $\psi^{alt} = \psi$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-9'a git.

Adım-9) Eğer $test_üst = 1$, $test_alt = 0$ ve $q_{Harc,Net} > 0$ ise, $test_alt = 1$, $\psi^{alt} = \psi$, $\psi = 0.5(\psi^{üst} + \psi^{alt})$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-10'a git.

Adım-10) Eğer $test_alt = 1$, $test_üst = 0$ ve $q_{Harc,Net} < 0$ ise, $test_üst = 1$, $\psi^{üst} = \psi$, $\psi = 0.5(\psi^{üst} + \psi^{alt})$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-11'e git.

Adım-11) Eğer $test_üst = 1$, $test_alt = 1$ ve $q_{Harc,Net} > 0$ ise, $\psi^{alt} = \psi$, $\psi = 0.5(\psi^{üst} + \psi^{alt})$ yap ve adım-3'e git. Değilse adım-12'ye git.

Adım-12) Eğer $test_üst = 1$, $test_alt = 1$ ve $q_{Harc,Net} < 0$ ise, $\psi^{üst} = \psi$, $\psi = 0.5(\psi^{üst} + \psi^{alt})$ yap ve adım-3'e git.

Pompayla doldurmalı birim devrede iken, yukarıda anlatılan metot ile çözüm yapıldığında, çözüm noktasında toplam yakıt maliyeti $F_T = 124305.9890 R$, harcanan net su miktarı ise $q_{Harc,Net} = -0.1559 (acre-ft)$ olarak hesaplanmıştır. Görüleceği üzere pompalı doldurmalı birim devreye sokulduğunda, toplam yakıt maliyetinde günlük 681.1572 R bir iyileştirme sağlanmıştır. Çözüm noktasındaki güç üretim değerleri, hat kayıpları ve yakıt maliyetleri Çizelge 4.22'de verilmiştir.

Çizelge 4.22'de görüleceği üzere pompalı doldurmalı birim, yük talebinin yüksek olduğu 2, 3 ve 4. alt zaman aralıklarında enerji üretimi yaparken, yük talebinin düşük olduğu 1, 5 ve 6. alt zaman aralıklarındaysa, 24 saatlik çalışma süresinde $V^{başlangıç} = V^{son}$ sağlamak için rezervuara su pompalamaktadır. Çözüm noktasında her bir alt zaman aralığı ve işletim süresi sonunda rezervuardaki mevcut su miktarı, rezervuar hacmi alt ve üst sınırları arasında bulunmuştur. Zaman aralıkları sonlarında rezervuardaki mevcut su hacimleri ile o aralıklarındaki pompalı doldurmalı birimini aktif güç üretim/pompalama değerleri Çizelge 4.23'de verilmiştir. Bu üretim değerleri denklem (3.9)'da verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmış olup, elde edilen negatif aktif güç değerleri pompalı doldurmalı birimin pompalama gücünü, pozitif değerler ise bu birimin üretim gücünü göstermektedir.

Pompalı doldurmalı birimin devrede olduğu durum için, sözde elektrik fiyatı yöntemi (PSPA) ile elde edilen çözüm noktasında toplam yakıt maliyeti $F_T = 124604.982 (R)$ olarak hesaplanmıştır (Fadıl ve Yaşar, 2000). Görüleceği üzere F-MSG algoritması ile daha düşük maliyet değeri elde edilmiştir.

Çizelge 4.22. Pompayla doldurmalı birim devrede iken elde edilen çözüm noktasındaki aktif ve reaktif güç üretim değerleri, hat kayıpları ve yakıt maliyetleri.

Alt Per. (j)	$P_{Yük,j}$ (MW)	$P_{Kayıp,j}$ (MW)	Güç Üret.	Bara No (i)						$F_{T,j}$ (R)
				1	4	6	7	9	11	
1	200	7.937	$P_{Gi,j}$	174.16	54.92	-115.70	94.56	—	—	15781.4661
			$Q_{Gi,j}$	56.73	-35.25	5.51	18.84	17.67	1.59	
2	600	33.009	$P_{Gi,j}$	252.44	171.95	33.62	175.00	—	—	24890.7296
			$Q_{Gi,j}$	114.58	70.90	34.15	57.61	76.99	91.56	
3	700	45.763	$P_{Gi,j}$	260.94	179.83	130.00	174.98	—	—	25437.7056
			$Q_{Gi,j}$	101.06	88.51	-12.28	175.00	95.13	114.06	
4	600	33.009	$P_{Gi,j}$	252.44	171.95	33.62	175.00	—	—	24890.7296
			$Q_{Gi,j}$	114.58	70.90	34.15	57.61	76.99	91.56	
5	300	12.547	$P_{Gi,j}$	183.45	79.26	-64.50	114.34	—	—	17523.8929
			$Q_{Gi,j}$	106.97	29.53	-100.19	65.97	26.28	30.54	
6	200	7.937	$P_{Gi,j}$	174.16	54.92	-115.70	94.56	—	—	15781.4661
			$Q_{Gi,j}$	56.73	-35.25	5.51	18.84	17.67	1.59	
F_T (R)									124305.989	

Çizelge 4.23. Alt zaman aralığı sonlarında rezervuarda mevcut su hacimleri ile o alt zaman aralığında pompalı doldurmalı birimini aktif güç üretim değerleri

Alt Zaman Aralığı (j)	V_j (acre-ft)	$P_{s,j}$ (MW)
0	10000.0000	—
1	11417.0658	-115.6998
2	10348.0819	33.6229
3	8508.0745	130.0009
4	7439.0906	33.6229
5	8583.0901	-64.4999
6	10000.1550	-115.6998

Kısım 4.4.2’de anlatılan yöntem uyarınca her bir ψ değeri için yapılan çözüm sonucunda hesaplanan $q_{Harc,Net}$ değerleri çizelge 4.24’de verilmiştir.

Çizelge 4.24. Her bir ψ değerine karşılık hesaplanan $q_{Harc,Net}$ değerleri

ψ (R/acre – ft)	$q_{Harc,Net}$ (acre – ft)
5	253.8569
7.5	-220.4578
6.25	98.7536
6.875	-45.2369
6.5625	-12.2563
6.40625	7.8547
6.484375	-0.1559

Kısım 4.4.2’de 1.Adımda ψ^{avg} şöyle hesaplanmıştır; Kısım 4.4.1’de pompayla doldurulmalı birimin devrede olmadığı durum için en düşük yakıt maliyeti 124987.1462 R olarak bulunmuştur. Bulunan bu optimal çalışma noktasında 1,4 ve 7. baralara bağlı birimlerin her biri 24 saat, 9 ve 11. Baralara bağlı birimlerin her biri 4 saat boyunca enerji üretmektedir (Bkz. Çizelge 4.21). Bu durumda bütün birimlerin enerji ürettiği toplam süre $(3 \times 24) + (2 \times 4) = 80$ saat olarak hesaplanabilir. O halde pompayla doldurulmalı birim devre dışındayken optimal çalışma noktasında ortalama saat başı maliyeti $F^{ort} = 124987.1462 / 80 = 1562.3393$ (R/h) olarak hesaplanabilir.

Pompayla doldurulmalı birimin ortalama olarak aktif güç üretim üst sınırının yarısı kadar güç ürettiğini varsayalım ($P_{GH} = P_{GH}^{max} = 130 / 2 = 65$ MW). Bu durumda harcanacak su miktarı denklem (4.6) ile $q_{GH}^{ort} = 200 + (2 \times 65) = 330$ (acre – ft / h) olarak bulunur. Hesaplanan bu F^{ort} ve q_{GH}^{ort} değerleri ile pompalı doldurulmalı birimin ortalama hayali su fiyatı, ψ^{ort} , aşağıdaki gibi bulunur (Bkz. Kısım 4.4.2).

$$\psi^{ort} = \frac{F^{ort}}{q_{GH}^{ort}} = \frac{1562.3393 (R/h)}{330 (acre-ft/h)} = 4.73 (R/acre-ft) \quad (4.12)$$

Çizelge 4.24’de görüleceği üzere başlangıçta kullanılacak ψ^{ort} değeri, denklem (4.12) de hesaplanan $\psi^{ort} = 4.73 (R/acre-ft)$ değerine en yakın tamsayı olan $\psi^{ort} = 5 (R/acre-ft)$ olarak alınmış ve bu değer için F-MSG algoritması kullanılarak optimal çalışma noktası bulunmuştur. Çözüm noktasında $q_{Harc,Net} = 253.8569$ olarak hesaplanmıştır. $|q_{Harc,Net}| = 253.8569 > TOL$ olduğundan metoda devam edilmiştir. Mevcut çözüm noktasında $test_alt = 0$ ve $q_{Harc,Net} > 0$ olduğundan, adım-5 uyarınca $test_alt = 1$ yapılmış, $\psi^{alt} = \psi = 5$ seçilmiş, $\psi^{üst} = 1.5 \times \psi^{alt} = 1.5 \times 5 = 7.5$ olarak hesaplanmıştır. Bir sonraki döngüde kullanılmak üzere $\psi = 7.5$ alınarak tekrar adım-3’e dönmüş ve F-MSG algoritması kullanılarak tüm alt zaman aralıklarında optimal çalışma noktası bulunmuştur. $\psi = 7.5$ için yapılan çözüm sonucunda $q_{Harc,Net} = -220.4578$ olarak hesaplanmıştır. $|q_{Harc,Net}| = 220.4578 > TOL$ olduğundan metoda devam edilmiştir. Mevcut çözüm noktasında $test_alt = 1$, $test_üst = 0$ ve $q_{Harc,Net} < 0$ olduğundan, adım-10 uyarınca $test_üst = 1$ yapılmış, $\psi^{üst} = \psi = 7.5$ seçilmiş, $\psi = 0.5(\psi^{üst} + \psi^{alt}) = 0.5(7.5 + 5) = 6.25$ olarak hesaplanmıştır. Bir sonraki döngüde kullanılmak üzere $\psi = 6.25$ alınarak tekrar adım-3’e dönmüştür. Yukarıda anlatıldığı şekilde yöntemin uygulanmasına devam edilmiş, $\psi = 6.484375$ değeri için F-MSG algoritması kullanılarak bulunan çözüm noktasında $q_{Harc,Net} = -0.1559$ olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu $q_{Harc,Net}$ değeri, seçilmiş 2 acre-ft’lik tolerans değerinden düşük olduğu, $|q_{Harc,Net}| = 0.1559 < TOL$, için $\psi = 6.484375$ değeri için elde edilen sonuç optimal sonuç olarak kabul edilmiştir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada uygun değerler üzerinde çalışan genişletilmiş subgradyent (F-MSG) Algoritması, sırasıyla, optimal güç akış problemine, ham enerji kaynağı kısıtlı termik birimler içeren sistemlerde güç dağıtım problemine, çevresel / ekonomik optimal güç dağıtım problemine ve pompayla doldurulmalı birim içeren elektrik enerji sistemlerinde optimal güç dağıtım problemine uygulanmıştır.

F-MSG algoritmasının avantajlarından bir tanesi, maliyet fonksiyonları konveks olmayan birimlere sahip sistemlere de uygulanabilmesidir. Amaç fonksiyonu konveks olmadığına dahi F-MSG algoritması global minimum çözüm noktasına yakınsamaktadır (Bkz. Kısım 5.1.3).

Problemin çözümünde bara gerilim genlikleri ve faz açıları bağımsız değişkenler olarak seçildiğinden, başlangıç değişkenlerinin bulunması hariç, çözümde güç akış denklemlerinin çözülmesine gerek kalmamaktadır. Ayrıca bara gerilim genliklerinin alt ve üst sınırları arasında kalmaları da kolaylıkla sağlanabilmektedir. Bununla beraber üretim birimlerinin alt ve üst iletim sınırları ile iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri de çözüme kolaylıkla dahil edilebilmekte, elde edilen sonuçlar bu sınırlar dahilinde yer almaktadır (Bkz. Kısım 4.1.2). Bölüm 3'de verilen güç akış denklemleri ile iletim hatlarında meydana gelen kayıplar da hesaplanabilmekte, sistemdeki toplam güç kaybı da çözüme dahil edilebilmektedir (Bkz. Denklem 3.11, 3.12, 3.13).

Sistemde ham enerji kaynağı kısıtlı birimler mevcut ise, F-MSG algoritması ile elde edilen çözüm noktasında, tüketilmesi gereken en az yakıt miktarı koşulu da sağlanmaktadır (Bkz. Çizelge 4.11).

Ağırlıklı toplamla birleştirilmiş amaç fonksiyonuna sahip çevresel / ekonomik güç dağıtım problemi F-MSG algoritması ile çözüldüğünde tatmin edici sonuçlara ulaşılmıştır (Bkz. Çizelge 4.14).

Pompayla doldurmalı birimler içeren sistemlerde güç dağıtım probleminin F-MSG algoritması ile çözülmesiyle elde edilen çözüm noktasında, pompayla doldurmalı birimin net harcadığı su miktarı verilen tolerans değerinin altında bulunmuştur (Bkz. Çizelge 4.24). Ayrıca rezervuar hacminin alt zaman aralığı sonlarındaki değeri, verilen alt ve üst sınırları arasında tutulmuştur (Bkz. Çizelge 4.23).

Bundan sonraki çalışmalarda daha büyük boyutlardaki güç sistemlerinde bu optimal işletim problemleri F-MSG algoritması ile çözülmelidir. Ayrıca bu problemlerin çözüm zamanlarının iyileştirilebilmesine yönelik çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abido, M.A., 2002, Optimal power flow using tabu search algorithm, *Electric Power Components and Systems*, 30, 469-483.
- Abido, M.A., 2009, Multiobjective particle swarm optimization for environmental / economic dispatch problem, *Electric Power System Research*, 79, 1105-1113.
- Al-Othman, A.K. and EL-Naggar, K.M., 2007, Application of pattern search method to power system security constrained economic dispatch, *PWASET*, 21, 28-33
- Basu, M., 2002, Fuel constrained economic emission load dispatch using hopfield neural networks, *Electric Power Systems Research*, 63, 51-56.
- Burachik, R.S., Gasimov, N., Ismayilova, NA. ve Kaya, C.Y., 2006, On a modified subgradient algorithm for dual problems via sharp augmented lagrangian, *Journal Of Global Optimization*, 34, 1,55-78.
- Chaturvedi, K.T., Pandit. M. and Srivastava. L., 2008, Self-organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch, *IEEE Transactions On Power Systems*, 23, (3), 1079-1087.
- Chaturvedi, K.T., Pandit. M. and Srivastava. L., 2008, Modified neo-fuzzy neuron-based approach for economic and environmental optimal power dispatch, *Applied Soft Computing*, 8, 1428-1438.
- Chiang, C.L., 2007, Genetic-based algorithm for power economic load dispatch. *IET Gener. Transm. Distrib*, 1, (2), 261-269.

- Coelho, L.S. and Mariani, V.C., 2007, Improved differential evolution algorithms for handling economic dispatch optimization with generator constraints, *Energy Conversion And Management*, 48, 1631-1639.
- El Ala, A. A. Abou., 2010, Differential evolution algorithm for emission constrained economic dispatch problem, *Electric Power System Research*, 80, 1286-1292.
- Fadil, S. and Sarioglu, G.R., 1998, An active and reactive power dispatch technique using pseudo spot price of electricity, *Electrical Machines And Power Systems*, 26, (4), 87-95.
- Fadil, S. and Yasar, C., 2000, A pseudo spot price algorithm applied to the pumped-storage hydraulic unit scheduling problem, *Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Science*, 8, (2), 93-109.
- Fadil, S. and Yasar, C., 2002, An active power dispatch technique using pseudo price of electricity for a power system area including limited energy supply thermal units, *Electrical Power and Energy Systems*, 24, 87-95.
- Filik, B.U. and Kurban M., 2010, Feasible modified subgradient method for solving the thermal unit commitment problem as a new Approach, *Mathematical Problems in Engineering*, vol 2010 (2010), 11p.
- Filik, B.U. and Kurban M., 2010, Solving unit commitment problem using modified subgradient method combined with simulated annealing algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, vol 2010 (2010), 15p.
- Garcia-Gonzalez, J., de la Muela, R.M.R., Santos, L.M. and Gonzales, A.M., 2008, Stochastic joint optimization of wind generation and pumped-storage units in an electricity market, *IEEE Transaction On Power Systems*, 23,(2), 460-468.

- Gasimov, R.N., 2002, Augmented lagrangian duality and nondifferentiable optimization methods in nonconvex programming, *Journal Of Global Optimization*, 24,187–203.
- Jegatheesan, R., Nor, N.M. and Romlie, M.F., 2008, Newton-Raphson power flow solution employing systematically constructed Jacobian matrix, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy,180-185.
- Jeyakumar, D.N., Jayabarathi, T. and Raghunathan, T., 2006, Particle swarm optimization for various types of economic dispatch problems, *Electrical Power And Energy Systems*, 28, 36-42.
- Kasimbeyli, R., Ustun, O. and Rubinov, A.M., 2009, The modified subgradient algorithm based on feasible values, *Optimization* , 58, 5,535-560.
- Kumarappan, N. and Mohan, M.R., 2003, Fuel restricted short term economic dispatch using evolutionary programming for utility system, *Electrical Power and Energy Systems*, 25,821-828.
- Lee, T. and Chen, N., 1992, The effect of pumped storage and battery energy storage systems on hydrothermal generation coordination. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 7,4,631-637,
- Osman, M.S., Abo-Sinna, M. A. and Mousa, A. A., 2009, An ϵ -dominance-based multiobjective genetic algorithm for economic emission load dispatch optimization problem, *Electric Power System Research*, 79, 1561-1567.
- Park, J.B., Jeong. Y,W., Shin, J.R., and Lee, K.Y., 2010, An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems, *IEEE Transactions On Power Systems*, 25, 1,156-167.

- Rubinov, A.M. and Gasimov. R.N., 2002, The nonlinear and augmented lagrangians for nonconvex optimization problems with a single constraint, *Applied and Computational Mathematics*, 1,142-158.
- Samir, S. and Khaled, Z., 20089, Modified differential evolution algorithm for optimal power flow with non-smooth cost functions, *Energy Conversion and Management*, 49,3036-3043.
- Selvakumar, A.I., Thanushkodi, K.A., 2007, New particle swarm optimization solution to nonconvex economic dispatch problems, *IEEE Transactions On Power Systems* 22, 1,42-52
- Sun, J., Fang, W., Wang, D. and Xu, W., 2009, Solving the economic dispatch problem with a modified quantum-behaved particle swarm optimization method, *Energy Conversion and Management*, 50,2967-2976.
- Wood, A. J. and Wollenberg, B. F., 1996, *Power Generation Operation & Control*, Second Edition, John Wiley & Sons,1996,570 p.

EKLER

Ek.1 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Tek Hat Diyagramı

Ek.2 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Hat Parametreleri Ve İletim Hatlarının Taşıma Kapasiteleri

Ek.3 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Yük Değerleri

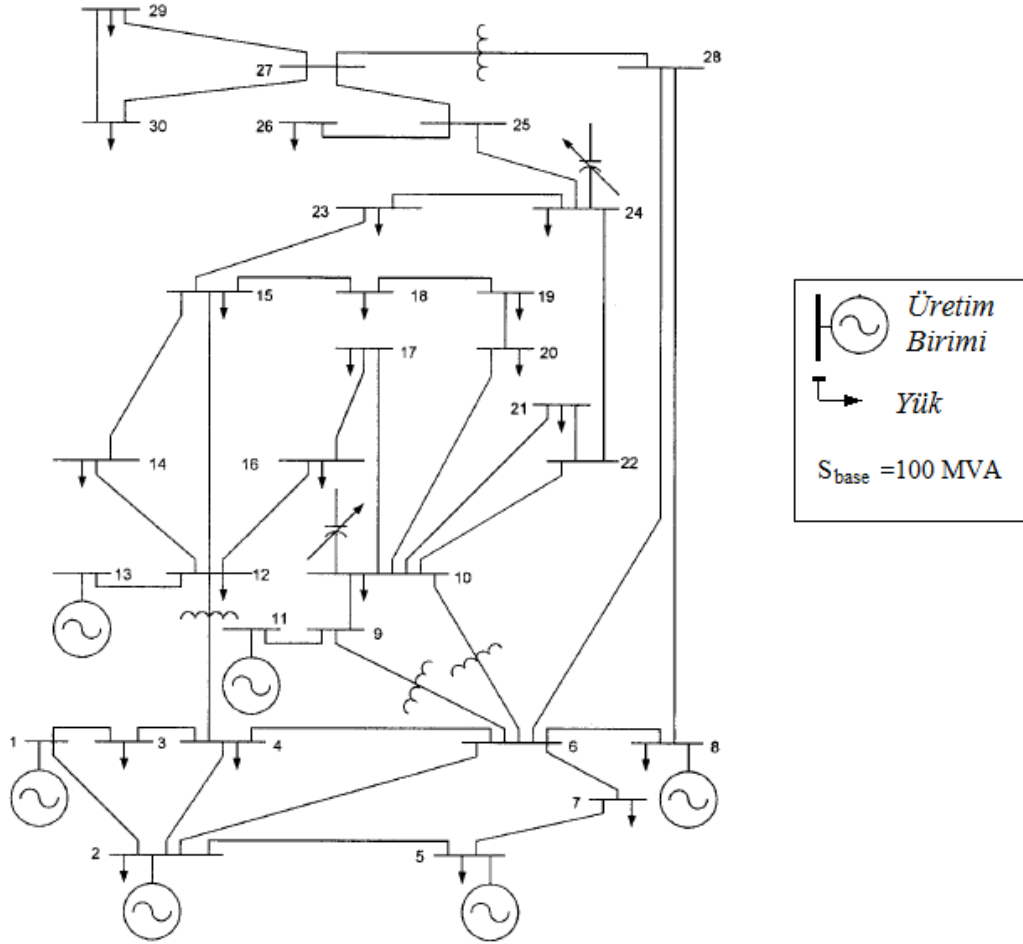
Ek.4 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Aktif Yüklerim Bütün Alt Zaman Aralıklarındaki Değerleri

Ek.5 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Reaktif Yüklerim Bütün Alt Zaman Aralıklarındaki Değerleri

Ek.6 12 Baralı Test Sistemi İçin Tek Hat Diagramı Ve Hat parametreleri (Fadıl ve Yaşar, 2000).

Ek.7 12 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Aktif Ve Reaktif Yüklerim Bütün Alt Zaman Aralıklarındaki Değerleri

Ek.1 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Tek Hat Diyagramı.



Ek.2 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Hat Parametreleri Ve İletim Hatlarının Taşıma Kapasiteleri

<i>Hat No</i> (<i>l</i>)	<i>Baradan</i> (<i>i</i>)	<i>Baraya</i> (<i>k</i>)	$r_{i,k}$ (<i>pu</i>)	$x_{i,k}$ (<i>pu</i>)	$0.5 \times b_{shi}$ (<i>pu</i>)	a_i	P_l^{\max} (<i>pu</i>)
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0264	-	1.30
2	1	3	0.0452	0.1852	0.0204	-	1.30
3	2	4	0.0570	0.1737	0.0184	-	0.65
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0042	-	1.30
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0209	-	1.30
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0187	-	0.65
7	4	6	0.0119	0.0414	0.0045	-	0.90
8	5	7	0.0460	0.1160	0.0102	-	0.70
9	6	7	0.0267	0.0820	0.0085	-	1.30
10	6	8	0.0120	0.0420	0.0045	-	0.32
11	6	9	0.0000	0.2080	0.0000	0.978	0.65
12	6	10	0.0000	0.5560	0.0000	0.969	0.32
13	9	11	0.0000	0.2080	0.0000	-	0.65
14	9	10	0.0000	0.1100	0.0000	-	0.65
15	4	12	0.0000	0.2560	0.0000	0.932	0.65
16	12	13	0.0000	0.1400	0.0000	-	0.65
17	12	14	0.1231	0.2559	0.0000	-	0.32
18	12	15	0.0662	0.1304	0.0000	-	0.32
19	12	16	0.0945	0.1987	0.0000	-	0.32
20	14	15	0.2210	0.1997	0.0000	-	0.16
21	16	17	0.0824	0.1923	0.0000	-	0.16
22	15	18	0.1070	0.2185	0.0000	-	0.16
23	18	19	0.0639	0.1292	0.0000	-	0.16
24	19	20	0.0340	0.0680	0.0000	-	0.32
25	10	20	0.0936	0.2090	0.0000	-	0.32
26	10	17	0.0324	0.0845	0.0000	-	0.32
27	10	21	0.0348	0.0749	0.0000	-	0.32
28	10	22	0.0727	0.1499	0.0000	-	0.32
29	21	22	0.0116	0.0236	0.0000	-	0.32
30	15	23	0.1000	0.2020	0.0000	-	0.16
31	22	24	0.1150	0.1790	0.0000	-	0.16
32	23	24	0.1320	0.2700	0.0000	-	0.16
33	24	25	0.1885	0.3292	0.0000	-	0.16
34	25	26	0.2544	0.3800	0.0000	-	0.16
35	25	27	0.1093	0.2087	0.0000	-	0.16
36	28	27	0.0000	0.3960	0.0000	0.968	0.65
37	27	29	0.2198	0.4153	0.0000	-	0.16
38	27	30	0.3202	0.6027	0.0000	-	0.16
39	29	30	0.2399	0.4533	0.0000	-	0.16
40	8	28	0.0636	0.2000	0.0214	-	0.32
41	6	28	0.0169	0.0599	0.0065	-	0.32

Ek.3 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Yük Değerleri

<i>Bara No (i)</i>	$P_{Yük,i}$ (MW)	$Q_{Yük,i}$ (MVar)	<i>Şönt Suseptans (MVar injected)</i>
1	0.00	0.00	-
2	21.70	12.70	-
3	2.40	1.20	-
4	7.60	1.60	-
5	94.20	19.00	-
6	0.00	0.00	-
7	22.80	10.90	-
8	30.00	30.00	-
9	0.00	0.00	-
10	5.80	2.00	19
11	0.00	0.00	-
12	11.20	7.50	-
13	0.00	0.00	-
14	6.20	1.60	-
15	8.20	2.50	-
16	3.50	1.80	-
17	9.00	5.80	-
18	3.20	0.90	-
19	9.50	3.40	-
20	2.20	0.70	-
21	17.50	11.20	-
22	0.00	0.00	-
23	3.20	1.60	-
24	8.70	6.70	4.3
25	0.00	0.00	-
26	3.50	2.30	-
27	0.00	0.00	-
28	0.00	0.00	-
29	2.40	0.90	-
30	10.60	1.90	-

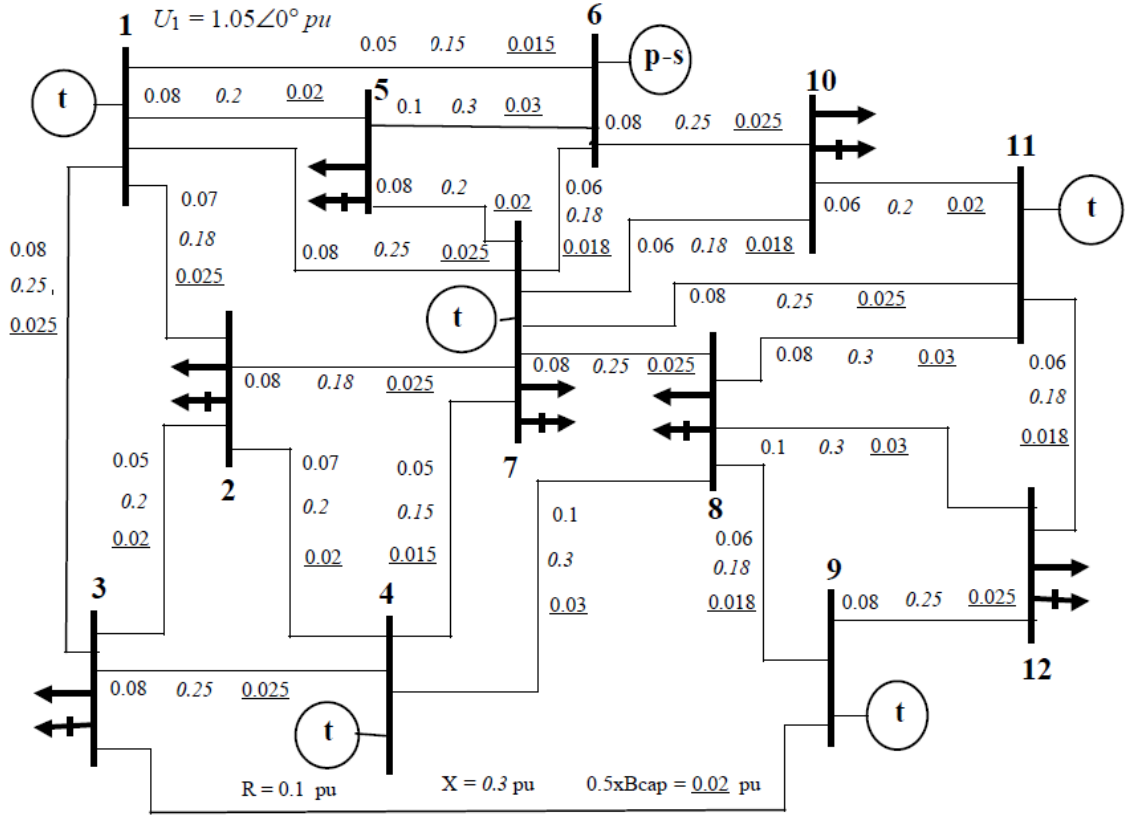
Ek.4 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Aktif Yüklerim Bütün Alt Zaman Aralıklarındaki Değerleri

		Alt Zaman Aralığı (j)						
		1	2	3	4	5	6	
Bara No (i)	2	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.2170	0.2250	0.2300	0.2350	0.2250	0.2200
	3	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0240	0.0250	0.0300	0.0300	0.0275	0.0245
	4	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0760	0.0800	0.0900	0.1000	0.0850	0.0775
	5	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.9420	0.9750	1.0000	1.0000	0.9750	0.9600
	7	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.2280	0.2500	0.2750	0.2750	0.2625	0.2350
	8	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.3000	0.3250	0.3500	0.3500	0.3275	0.3150
	10	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0580	0.0750	0.0800	0.0900	0.0775	0.0650
	12	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1120	0.1150	0.1200	0.1250	0.1175	0.1120
	14	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0620	0.0650	0.0750	0.0800	0.0700	0.0625
	15	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0820	0.0850	0.0900	0.0900	0.0875	0.0825
	16	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0350	0.0400	0.0500	0.0500	0.0450	0.0400
	17	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0900	0.1000	0.1000	0.1250	0.1000	0.0950
	18	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0320	0.0350	0.0500	0.0500	0.0425	0.0350
	19	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0950	0.1000	0.1000	0.1250	0.1000	0.1000
	20	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0220	0.0250	0.0500	0.0500	0.0375	0.0250
	21	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1750	0.1800	0.1900	0.2000	0.1850	0.1785
	23	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0320	0.0350	0.0500	0.0500	0.0425	0.0350
24	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0870	0.0900	0.1000	0.1000	0.0950	0.0900	
26	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0350	0.0400	0.0500	0.0500	0.0450	0.0400	
29	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0240	0.0250	0.0500	0.0500	0.0375	0.0250	
30	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1060	0.1100	0.1200	0.1250	0.1150	0.1075	
TOPLAM (pu)			2.834	3.000	3.250	3.350	3.100	2.925

Ek.5 IEEE 30 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Reaktif Yüklerin Bütün Alt Zaman Aralıklarındaki Değerleri

		Alt Zaman Aralığı (j)						
		1	2	3	4	5	6	
Bara No (i)	2	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1270	0.1275	0.1300	0.1300	0.1280	0.1275
	3	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0120	0.0125	0.0150	0.0150	0.0130	0.0125
	4	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0160	0.0175	0.0200	0.0200	0.0185	0.0175
	5	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1900	0.1900	0.2000	0.2000	0.1925	0.1900
	7	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1090	0.1100	0.1150	0.1150	0.1120	0.1095
	8	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.3000	0.3200	0.3500	0.3500	0.3300	0.3100
	10	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0200	0.0200	0.0250	0.0250	0.0220	0.0200
	12	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0750	0.0750	0.1000	0.1000	0.0875	0.0750
	14	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0160	0.0175	0.0250	0.0250	0.0200	0.0170
	15	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0250	0.0250	0.0500	0.0500	0.0350	0.0250
	16	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0180	0.0200	0.0250	0.0250	0.0225	0.0200
	17	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0580	0.0600	0.0750	0.0750	0.0700	0.0600
	18	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0090	0.0100	0.0150	0.0150	0.0150	0.0090
	19	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0340	0.0350	0.0500	0.0500	0.0400	0.0345
	20	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0070	0.0075	0.0100	0.0100	0.0100	0.0075
	21	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.1120	0.1125	0.1250	0.1250	0.1150	0.1125
	23	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0160	0.0175	0.0250	0.0250	0.0180	0.0175
	24	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0670	0.0675	0.0750	0.0750	0.0700	0.0675
26	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0230	0.0250	0.0300	0.0300	0.0250	0.0240	
29	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0090	0.0100	0.0150	0.0150	0.0110	0.0095	
30	$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.0190	0.0200	0.0250	0.0250	0.0200	0.0190	
TOPLAM (pu)			1.262	1.300	1.500	1.500	1.375	1.285

Ek.6 12 Baralı Test Sistemi İçin Tek Hat Diagramı Ve Hat parametreleri (Fadıl ve Yaşar, 2000).



(t) Termik Birim

→ Aktif Yük

(p-s) Pompayla Doldurmalı Hidrolik Birim

↔ Reaktif Yük

Ek.7 12 Baralı Test Sistemi İçin Baralara Bağlı Aktif Ve Reaktif Yüklerin Bütün Alt Zaman Aralıklarındaki Değerleri

		Alt Zaman Aralıkları						
		(j)						
		1	2	3	4	5	6	
Bara No (i)	2	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.20	0.80	1.00	0.80	0.40	0.20
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.15	0.60	0.75	0.60	0.30	0.15
	3	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.50	1.10	1.20	1.10	0.60	0.50
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.40	0.85	0.90	0.85	0.45	0.40
	5	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.30	0.90	0.80	0.90	0.25	0.30
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.24	0.70	0.60	0.70	0.20	0.24
	7	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.25	1.00	1.10	1.00	0.50	0.25
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.20	0.75	0.85	0.75	0.40	0.20
	8	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.40	0.70	0.90	0.70	0.30	0.40
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.30	0.52	0.70	0.52	0.24	0.30
	10	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.15	0.60	1.05	0.60	0.45	0.15
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.12	0.45	0.80	0.45	0.35	0.12
	12	$P_{Yük\ i,j} (pu)$	0.20	0.90	0.95	0.90	0.50	0.20
		$Q_{Yük\ i,j} (pu)$	0.15	0.70	0.75	0.70	0.40	0.15